

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGEM)**

**SISTEMA COMPACTO PARA TRATAMENTO E RECICLO DA
ÁGUA DE LAVAGEM DE VEÍCULOS POR FLOCULAÇÃO-
FLOTAÇÃO EM COLUNA**

**Rafael Newton Zaneti
Mestrado em Engenharia
Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral**

**Porto Alegre, RS.
2007**

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGEM)

SISTEMA COMPACTO PARA TRATAMENTO E RECICLO DA ÁGUA
DE LAVAGEM DE VEÍCULOS POR FLOCULAÇÃO-FLOTAÇÃO EM
COLUNA

RAFAEL NEWTON ZANETI

Engenheiro civil

Orientador: Jorge Rubio

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Elvis Carissimi

Dr. Jailton Joaquim da Rosa

Prof. Dr^a. Andréa Moura Bernardes

Dissertação de Mestrado como requisito parcial à obtenção do título de mestre
em Engenharia – Área de Concentração Tecnologia Mineral / Metalurgia
Extrativa
Porto Alegre, RS.
2007

Este trabalho de conclusão foi analisado e julgado adequado para obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovado em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do mestrado em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Jorge Rubio

Orientador

Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental

Escola de Engenharia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Elvis Carissimi

Universidade Luterana do Brasil – ULBRA

Dr. Jailton Joaquim da Rosa

Aquaflot Industrial Ltda.

Prof. Dr^a. Andréa Moura Bernardes

Escola de Engenharia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo conhecimento acumulado nos seus mais de 25 anos de existência e que me foi disponibilizado nos últimos 3 à 4 anos.

Ao Prof. Jorge Rubio pela orientação e atenção.

Aos colegas contemporâneos do LTM pela paciência e auxílio.

A empresa de Transportes Coletivos Viamão Ltda.

Ao Senhor Oly, funcionário da empresa Viamão e que sempre foi bastante prestativo.

A empresa Aquafлот Industrial Ltda.

A Dona Isabel, minha Mãe; Seu Hermes, meu Pai e meu irmão Hermes Junior, pelo exemplo de família e pelo suporte.

As pessoas que fazem parte direta da minha vida pessoal: meus amigos e namorada, Elisa Tormena, pelo incentivo e companheirismo.

Ao povo e ao governo brasileiros, que me custearam os estudos e a divulgação destes.

“Ora, olhando agora para nós todos, penso que se não começarmos a viver desde já como sobreviventes lúcidos e conscientes, amanhã poderá ser tarde demais. Quando os crimes contra o planeta em que vivemos se tornarem irreversíveis, quando o lixo invadir as casas, quando a poluição fizer desta atmosfera um tóxico, quando a destruição das florestas tornar o mundo um deserto, quando os rios e os mares se transformarem em cloacas fétidas, os sobreviventes não sobreviverão”.

José Saramago

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE SIMBOLOS.....	xvi
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 Processos de lavagem de veículos.....	4
2.1.1 Águas residuárias de lavagem de veículos.....	5
2.2 Tratamento, descarte e reúso de águas residuárias de lavagem de veículos.....	8
2.2.1 Generalidades, problemas e situação atual do Reciclo de água na lavagem de veículos	9
2.2.2 Descrição do processo de lavagem dos ônibus e do sistema de tratamento para reúso de água da Empresa de Transportes Coletivos Viamão LTDA.....	16
2.3 Floculação-flotação (FAD) no tratamento de efluentes.....	22
2.3.1 Aspectos físico químicos da flotação (FAD).....	22
2.3.1.1 Microbolhas.....	25
2.3.1.2 Mecanismos de contato microbolhas/partículas na FAD.....	26
2.3.2 Aspectos físico-químicos da formação de flocos.....	29
2.3.2.1 Condições hidrodinâmicas na agregação (coagulação – floculação) de suspensões.....	31
2.3.2.2 Caracterização de flocos: resistência ao cisalhamento e dimensão fractal	34

2.4	Reatores de coagulação - floculação hidráulicos em linha.....	36
2.5	Colunas de flotação no tratamento de efluentes	39
3	EXPERIMENTAL	44
3.1	Materiais	44
3.1.1	Água residuária de lavagem de veículos	44
3.1.2	Reagentes.....	44
3.1.3	Equipamentos	45
3.2	Métodos	49
3.2.1	Estudos de floculação-flotação em coluna	49
3.2.2	Estudos de floculação hidráulica em linha	51
3.2.3	Estudos de variação da zona de contato bolha/partícula	53
3.2.4	Estudos de variação de taxa de aplicação na coluna de flotação.....	53
3.2.5	Estudos de variação da altura da coluna de flotação	54
3.2.6	Estudos com flocos aerados.....	55
3.2.7	Análises	57
3.2.8	Ensaio de validação.....	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Caracterização das águas do sistema de lavagem estudado	59
4.2	Seleção de reagentes coagulantes/floculantes	66
4.3	Efeito da configuração da floculação hidráulica em linha no sistema FFC	67
4.4	Efeito das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC	71
4.5	Efeito da taxa de aplicação do sistema FFC	74
4.6	Efeito da altura da coluna de flotação no sistema FFC	77
4.7	Caracterização dos flocos	82

4.8	Ensaio de validação.....	85
4.9	Comparação técnica entre o sistema ETAR [®] e o sistema FFC.....	87
5	CONCLUSÕES.....	90
6	TRABALHOS FUTUROS.....	91
7	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICES	99
	Apêndice A – Desenho técnico dos reatores de coagulação – floculação hidráulicos em linha.....	100
	Apêndice A.1 – SR 1	101
	Apêndice A.2 – SL 1	102
	Apêndice A.3 - RGF	103
	Apêndice B – Desenho técnico dos módulos constituintes da coluna de flotação	104
	Apêndice B.1 – Módulo constituinte da coluna de flotação.....	105
	Apêndice B.2 – Módulo constituinte da coluna de flotação com adaptação para coleta de material flotado (calha).....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fotografia de uma ETAR instalada em uma empresa de ônibus (capacidade de tratamento de $2.500L.h^{-1}$).	15
Figura 2. Fluxograma do sistema de tratamento para reciclagem de água do processo de lavagem de ônibus da empresa Viamão Ltda.	17
Figura 3. Fotografia de satélite do pátio da empresa de transportes coletivos Viamão Ltda. Localização dos pontos de lavagem: 1 Lavagem manual (chassi, parte interna e rodas), 2 lavagem manual (partes mecânicas / peças em manutenção) e 3 lavagem mecanizada (lataria).	17
Figura 4. Pontos de lavagem manual. (a) Lavagem de partes mecânicas / peças em manutenção e (b) lavagem interna e das rodas. 1 – Ralo para coleta de água residuária e 2 – calha para coleta de água residuária.	18
Figura 5. Ponto de lavagem mecanizado (tipo <i>roll-over</i>). 1 – Calha para coleta da água residuária.	18
Figura 6. Fotografia da ETAR em operação na empresa Viamão Ltda. 1 – Reator de floculação hidráulica em linha (tipo FF [®]) – mistura rápida; 2 – Tanques de reagente (floculante, soda, anti-espumante); 3 - Reator de tanque agitado – mistura lenta; 4 – Vaso saturador; 5 – Célula de flotação (FADAT).	20
Figura 7. Leito de secagem para lodo gerado nas unidades ETAR de tratamento para reciclagem de água de lavagem de veículos. P – profundidade; L – largura e C – comprimento. Aquafлот Industrial Ltda.	22
Figura 8. Nucleação e crescimento de uma microbolha na superfície de uma partícula de quartzo tratada com dodecilamina (Rodrigues e Rubio, 2007).	27
Figura 9. Microbolhas aprisionadas no interior de flocos de $Fe(OH)_3$. (Rodrigues e Rubio, 2007).	28
Figura 10. Floco de precipitados coloidais ($Fe(OH)_3$) sendo arrastado por microbolhas. (Rubio e Rodrigues, 2007).	29

Figura 11. Reatores de agregação de tanque agitado. 1 – Motor responsável pela agitação (RPM ajustável).....	37
Figura 12. Fotografia do RGF em escala de bancada, mostrando o crescimento dos flocos ao longo do seu eixo longitudinal.....	38
Figura 13. Fotografia do reator FF [®] em operação na empresa Viamão Ltda. (DN 50mm - capacidade de tratamento de 7m ³ .h ⁻¹). 1 – FF.	39
Figura 14. Colunas em co-corrente (FAD) e em contracorrente (bolhas de tamanho intermediário). 1 – Alimentação + microbolhas; 2 – BCMF; 3 – Alimentação e 4 – Entrada de bolhas de tamanho intermediário geradas por sparger.....	41
Figura 15. Esquema ilustrativo do sistema FFC. 1 – Reservatório de água residuária, 2 – bomba centrífuga, 3 – rotâmetro de água, 4 – bombas dosadoras e tanques de reagentes, 5 – SR 1 – Serpentina rápida 1 e RGF – Reator gerador de flocos, 6 – bomba centrífuga multifase, 7 – válvula agulha e manômetro de pressão, 8 – coluna de flotação e 9 – controle de nível da coluna.....	45
Figura 16. Direcionador de fluxo de placas paralelas instalado na saída da corrente de água tratada da coluna de flotação.	48
Figura 17. Tubos de ascensão externos à coluna de flotação. (a) Coluna com zona de contato bolha/partícula rápida (1 – Tubo de ascensão de 1 ^{1/2} ”; 2 – Tubo de descarga de água tratada); (b) Coluna com zona de contato bolha/partícula lenta (3 – Tubo de ascensão DN 110mm; 4 – Alimentação da coluna).....	48
Figura 18. Materiais e equipamentos utilizados nos estudos de Floculação-Flotação em Coluna - FFC: (a) caixas de armazenamento da água residuária; (b) bomba de alimentação do sistema FFC; (c) injeção dos reagentes na linha e rotâmetro para medição da vazão de alimentação; (d) SR 1 (uma das condições de floculação utilizada); (e) bomba centrífuga multifase Edur [®] ; (f) instrumentação para controle da pressurização (válvula agulha e manômetro) da corrente de água de reciclo e (g) coluna de flotação.....	50
Figura 19. (a) Célula de ascensão e (b) Floco visualizado individualmente.	56
Figura 20. Procedimento de análise de imagens no FreeHand MX para determinação de dimensão fractal D ₂ e de tamanho de floco.....	57

Figura 21. Potencial zeta das partículas em suspensão, na água afluyente ao tratamento, em	65
Figura 22. Distribuição do tamanho de partículas suspensas na água afluyente ao tratamento.	65
Figura 23. Valores de turbidez residual após floculação de sólidos suspensos na Água Residuária do Processo de Lavagem dos Ônibus (ARPLV) na empresa Viamão Ltda. Condição: [floculante]=20mgL ⁻¹ , pH 7±0,5.	66
Figura 24. Efeito do tempo e configuração de floculação no sistema FFC na diminuição de turbidez da água do Sistema de Tratamento para Reúso de Água de Lavagem de Veículos (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h ⁻¹ ; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Zona de contato bolha/partícula = φ 50 mm.	68
Figura 25. Efeito do tempo e da configuração de floculação no sistema FFC na diminuição de cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h ⁻¹ ; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Zona de contato bolha/partícula = φ 50 mm.	69
Figura 26. Efeito do tempo de ensaio e da configuração de floculação no sistema FFC no aumento da tensão superficial da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h ⁻¹ ; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Zona de contato bolha/partícula = φ 50 mm.	70
Figura 27. Efeito do tempo e da configuração de floculação sobre o sistema FFC no aumento da condutividade da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h ⁻¹ ; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Zona de contato bolha/partícula = φ 50 mm.	71
Figura 28. Efeito do tempo, da configuração de floculação (RGF ou RGF-S) e das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC, na diminuição da turbidez da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de	

aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4..... 72

Figura 29. Efeito do tempo, da configuração de floculação (SR 1 ou SR 1 + SL 1) e das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC na diminuição da turbidez da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4..... 72

Figura 30. Efeito do tempo, da configuração de floculação (RGF ou RGF-S) e das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC na diminuição da cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot SL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4..... 73

Figura 31. Efeito do tempo, da configuração de floculação (SR 1 ou SR 1 + SL 1) e das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC na diminuição da cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4..... 73

Figura 32. Efeito do tempo e da taxa de aplicação do sistema FFC na diminuição de turbidez da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 200-400ppm; pH 7,2 ± 0,4. 74

Figura 33. Efeito do tempo e da taxa de aplicação do sistema FFC na diminuição de cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. tratada. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 200-400ppm; pH 7,2 ± 0,4. 75

Figura 34. Efeito do tempo de ensaio e da taxa de aplicação no aumento da tensão superficial da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. tratada com o sistema FFC. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 200 – 400 ppm; pH 7,2 ± 0,4..... 77

Figura 35. Efeito do tempo e da altura da coluna de flotação no sistema FFC na diminuição de turbidez da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 200-400ppm; pH 7,2 ± 0,4; Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm.....	78
Figura 36. Efeito do tempo e da altura da coluna de flotação sobre o sistema FFC na diminuição de cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h ⁻¹ ; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4. Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm.....	79
Figura 37. Efeito do tempo de ensaio e da altura da coluna de flotação sobre o sistema FFC no aumento da tensão superficial da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm.....	80
Figura 38. Aumento da condutividade da água tratada em função do tempo de retenção na coluna de flotação para as diferentes alturas de coluna. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm e alturas de coluna = 3,6; 3,0; 2,4; 1,8 m.....	81
Figura 39. Efeito do tempo e da altura da coluna de flotação no sistema FFC no aumento da condutividade da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm.....	81
Figura 40. Valores (calculados) do diâmetro equivalente das bolhas em função da velocidade de ascensão dos flocos aerados.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Volume de água utilizado nos diferentes processos de lavagem de veículos.....	4
Tabela 2. Tipos de produtos químicos utilizados na lavagem de veículos e seus principais componentes.....	5
Tabela 3. Características físicas e físico-químicas das águas residuárias de lavagem de veículos em função do tipo de veículos.....	7
Tabela 4. Equipamentos para reciclagem de água de lavagem de veículos disponíveis comercialmente no Brasil.....	13
Tabela 5. Trabalhos realizados no Brasil sobre água de lavagem de veículos.....	14
Tabela 6. Aplicações do sistema ETAR.....	16
Tabela 7. Balanço hídrico do sistema de lavagem dos ônibus da empresa Viamão Ltda. ...	19
Tabela 8. Características construtivas, hidráulicas e operacionais do sistema ETAR.	20
Tabela 9. Algumas aplicações ambientais da flotação. Adaptado de Rubio et al. (2007)....	23
Tabela 10. Recentes aplicações não convencionais de FAD no Brasil. Adaptado de Rubio et al. (2007).....	24
Tabela 11. Microfotografias de microbolhas geradas com a técnica LTM-BSizer. Adaptado de Rubio e Rodrigues (2003).....	26
Tabela 12. Classificação das partículas e seus sistemas dispersos em água. Adaptado de Bratby (1980).....	30
Tabela 13. Parâmetros operacionais na geração das microbolhas.....	49
Tabela 14. Características hidráulicas dos reatores empregados.....	52
Tabela 15. Características hidráulicas e hidrodinâmicas dos tubos de ascensão (zona de contato bolha/partícula).....	53
Tabela 16. Características construtivas e hidráulicas da coluna de flotação.....	54
Tabela 17. Características construtivas e hidráulicas da coluna de flotação.....	54

Tabela 18. Parâmetros de dispersão de gás na coluna e do número de mistura.	55
Tabela 19. Caracterização da água bruta (água do tanque de equalização) afluente ao tratamento.	60
Tabela 20. Caracterização da água residuária da lavagem manual.	60
Tabela 21. Caracterização da água residuária da lavagem mecânica (<i>Roll-over</i>).	61
Tabela 22. Caracterização da água tratada pelo sistema ETAR [®]	62
Tabela 23. Caracterização da água da cisterna.	63
Tabela 24. Caracterização da água do poço.	63
Tabela 25. Concentração de sólidos dissolvidos e valores de condutividade nas diferentes águas do sistema de reúso de água de lavagem dos ônibus da Empresa Viamão.	64
Tabela 26. Variação da condutividade em função da taxa de aplicação e do tempo de ensaio. Valores em vermelho significam aumento na condutividade em relação a água bruta.	76
Tabela 27. Valores médios finais da qualidade da água tratada pelo sistema FFC na seguinte configuração: Floculador SR 1; Tubo de ascensão de 50 mm (tubo rápido); Taxa de aplicação de 25 m.h ⁻¹ e coluna de 1,8 m.	82
Tabela 28. Resistência teórica dos flocos (<i>floc-strength</i>) em função do tamanho médio e da concentração de reagentes.	83
Tabela 29. Diâmetro equivalente, coeficiente angular da reta log(A(r))-log(r) e dimensão fractal D ₂ dos flocos gerados pelo floculador SR 1.	84
Tabela 30. Características físico-químicos da qualidade da água bruta e da água tratada em função do tempo. Condições do ensaio: [Aquafloc Al] = 550 mg.L ⁻¹ , pH=6,8±0,4.	86
Tabela 31. Dureza das águas do sistema de lavagem de ônibus estudado.	87
Tabela 32. Concentração de íons de metais nas águas do sistema de lavagem da empresa Viamão Ltda.	87
Tabela 33. Comparação da qualidade da água tratada, parâmetros operacionais e construtivos entre o sistema FFC e o sistema ETAR [®]	88

LISTA DE SIMBOLOS

RGF – Reator Gerador de Flocos

FFC – Floculação-Flotação em Coluna

BCMF – Bomba Centrifuga MultiFase

CT – Carbono Total

COT – Carbono Orgânico Total

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETAR – Estação de Tratamento e Água de Reúso

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

OMS – Organização Mundial da Saúde

ST – Sólidos Totais

SST – Sólidos Suspensos Totais

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

SSED – Sólidos SEDimentáveis

SAO's – sistemas Separadores Água/Óleo

FAD – Flotação por Ar Dissolvido

LTM – Laboratório de Tecnologia Mineral e ambiental

FADAT – Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa

DTB – Distribuição de Tamanho de Bolhas

G – Gradiente de velocidades

g – aceleração da gravidade

D_2 – Dimensão fractal de duas dimensões

PAC – PoliCloreto de Alumínio

N_d – Número de mistura no reator de separação sólido/líquido

RESUMO

O trabalho apresenta resultados do tratamento para reúso de água de lavagem de veículos via floculação-flotação de coluna. Foi realizado um levantamento do estado da arte e ensaios experimentais de tratamento da água residuária da lavagem de ônibus de uma empresa de transportes coletivos na região metropolitana de Porto Alegre (Empresa de Transportes Coletivos Viamão Ltda.). A nova técnica, foi denominada floculação-flotação em coluna – FFC e o sistema correspondeu a uma unidade de floculação-flotação compacta, que utiliza floculadores hidráulicos (SR 1 – fluxo chicanado ($G = 1025s^{-1}$; $t_r = 10s$); RGF – fluxo helicoidal ($G = 1350s^{-1}$; $t_r = 15s$), RGF-S – SR 1 seguido de RGF; SR1 + SL1 – mistura lenta bem definida ($SL 1 - G = 50s^{-1}$ e $t_r = 150s$)) na floculação, bomba centrífuga multifase – BCMF na geração de microbolhas e coluna de flotação na separação sólido líquido (alta taxa de tratamento ($>10m.h^{-1}$)). Foram variados os parâmetros de projeto do sistema FFC; configuração da floculação hidráulica; taxa de aplicação e altura da coluna de flotação. As análises químicas e físico-químicas realizadas para avaliar a qualidade da água de reúso disponibilizada pelo sistema FFC foram: sólidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos, turbidez, cor, tensão superficial, condutividade, dureza, ferro, manganês, CT, COT, DQO e óleos e graxas. O sistema FFC, na condição otimizada no estudo (floculação em reator hidráulico em linha de fluxo chicanado com 10s de tempo de retenção; taxa de aplicação de $25m.h^{-1}$ e altura da coluna de flotação de 1,8m), foi comparado com o sistema de tratamento para reciclo de água residuária de lavagem de veículos empregado na empresa Viamão Ltda (sistema ETAR, projetado pela empresa Aquafлот Ltda e que propiciou a reciclagem de mais de $400.000m^3$ de água de lavagem de veículos nos últimos 6anos em 22 estações de tratamento localizadas principalmente no Rio Grande do Sul e em São Paulo). O FFC apresentou eficiência de tratamento igual ou superior ao sistema ETAR e disponibilizou água de reúso com qualidade suficiente para reciclagem de água na lavagem de veículos em uma unidade compacta e de baixo consumo energético. Outras vantagens do novo sistema, em relação ao sistema ETAR instalado na empresa Viamão Ltda., são as reduções de área em planta e de equipamentos de controle e de operação da estação de tratamento, o que provavelmente diminui os custos de

investimento e de operação das estações de tratamento de água residuária de lavagem de veículos por floculação-flotação.

ABSTRACT

The work presents results from the treatment for water recycling from a bus washing effluent through flocculation – column flotation. The state of the art from the recycling of the vehicles washing water was reviewed and experimental studies were carried out using the flocculation – column flotation, a new technique for the treatment of water from a bus washing unit installed in a Brazil metropolitan area. This new technique was named flocculation–column flotation - FFC and the system corresponded to a compact flocculation-flotation unit, which utilizes hydraulic flocculators (less electrical and mechanical energy consumption) in the flocculation, centrifugal multiphase pump - BCMF for the generation of microbubbles and column flotation for the solid/liquid separation (high hydraulic loading $>10\text{m.h}^{-1}$). The FFC design parameters variables, namely: configuration of the hydraulic flocculation; hydraulic loading and column flotation height, where varied. Chemical analyses to evaluate the quality of the recycling water were: total, suspended and dissolved solids content; turbidity; color; surface tension; conductivity; hardness; iron; manganese; CT; TOC; COD; and oils and greases. The FFC system, with optimized condition; i.e.: flocculation in an in-line hydraulic reactor of chicaned flow (FF[®] type) with 10s of retention time; hydraulic loading of 25m.h^{-1} and 1.8m column flotation, was compared running at the same bus washing unit (ETAR system, from Aquafлот Ltda.). This ETAR system, which uses a flocculation-flotation technology, favored the recycling of more than 400.000m^3 of water from almost 25 vehicles washing units, in the last 6 years, located in the RS state and São Paulo. The results showed that FFC presented high process efficiency, equal or higher than ETAR, proving that the FFC system provided water of reuse with good quality for water recycling in the vehicles washing in a rapid compact unity and low energy consumption. Other advantages of this new system are the reductions of foot print, control and operation, leading to less investment costs.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com recentes publicações internacionais, o atual padrão de consumo de água pela população mundial é muito elevado e não seria sustentável pela falta de quantidade e qualidade do recurso (Metcalf & Eddy, 2006). A Organização Mundial da Saúde – OMS, define escassez de água quando a disponibilidade de água de boa qualidade é inferior a 1000 m³/pessoa/ano. Desta maneira, até 2025, 20% da população poderia estar sofrendo problemas econômicos, políticos e sociais decorrentes da insuficiência de água.

As novas leis ambientais, mais restritivas, somadas a fiscalização mais rigorosa, o aumento gradativo da tarifa com a faixa de consumo de água e a necessidade de certificações ambientais (tais como a série ISO 14001) pressionam o setor produtivo (industrial, comercial e público) ao uso racional da água, ou seja, controle de perdas e desperdícios e minimização de consumo e de produção de efluentes.

Em nível internacional, a principal tendência nas indústrias é a implementação de sistemas para a recirculação ou reúso da água residuária (tratada ou não) dos processos e, no Brasil, já existem diretrizes e critérios gerais para o reúso não potável de águas residuárias urbanas e industriais (CNRH, 2005).

Entre as atividades industriais e comerciais que apresentam um potencial economicamente interessante para a reciclagem (reúso) de água destaca-se a lavagem de veículos. Segundo Rubio et al. (2007), o volume de água consumido nesta atividade no Brasil é de aproximadamente 3 milhões e 700 mil metros cúbicos. Ainda, considerando uma taxa de retorno de 80% dessa água (20 % é perdido na drenagem/coleta), 832 milhões de m³ de água poluída com xampus, óleos e graxas poderiam ser reaproveitados. Uma vez que normas a respeito da qualidade necessária a água de reúso na reciclagem de água na lavagem de veículos ainda estão sob discussão, Metcalf & Eddy (2006) comentam que esta deve ser função da segurança dos operadores dos pontos de lavagem e da satisfação dos usuários/clientes.

Os sistemas de tratamento, visando o reciclo da água ao processo, utilizados no país são poucos e são baseados na filtração, no tratamento biológico e na combinação de

floculação e flotação (Morelli, 2005). Entretanto, Hamada e Miyazaki (2004) comentam que os processos de tratamento para reúso de água via filtração em areia e tratamento biológico apresentam eficiência de tratamento insatisfatória (baixa qualidade da água de reúso disponibilizada), impossibilitando o emprego destes na reciclagem de água na lavagem de veículos.

Os equipamentos para o tratamento dessas águas, são mais atrativos se forem compactos, apresentando alta capacidade e eficiência de tratamento. A flotação, se comparada à sedimentação, na separação de sólidos, de detergentes e de compostos orgânicos (óleos), requer menor área em planta para os equipamentos de separação (Rubio, 2002a) e a combinação de floculação e flotação tem sido utilizada no tratamento para reúso de águas de lavagem de veículos (Rubio et al., 2007). A função da floculação é agregar as partículas presentes no efluente aumentando a probabilidade de colisão e eficiente contato com as microbolhas. Ainda, o tratamento deste efluente é possível via floculação rápida dos agregados leves (presença de óleo), o que aumenta gradualmente a cinética de flotação (Carissimi e Rubio, 2005).

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um sistema compacto de tratamento de água via Floculação-Flotação em Coluna – FFC, como avanço no setor de tratamento e reúso de água de lavagem de ônibus. Este sistema foi comparado com o sistema ETAR¹, que trata a mesma água residuária estudada e que está no mercado há mais de 5anos (aproximadamente 22 estações de tratamento em operação, principalmente nos estados do RS e SP), tendo viabilizado o reaproveitamento de mais de 400.000m³ de água residuária do processo de lavagem de veículos.

Os objetivos específicos do estudo foram:

- Caracterizar as águas do processo de lavagem de ônibus da Empresa de Transportes Coletivos Viamão Ltda;

¹ ETAR – Estação de Tratamento de água de Reuso; equipamento comercializado pela Aquafлот Industrial Ltda

- Estudar o efeito de diferentes geometrias e tempos de residência nos floculadores hidráulicos, acoplados em linha junto à coluna de flotação, na eficiência do sistema FFC;
- Estudar o efeito do tempo de residência e da velocidade do fluxo na zona de contato bolha partículas;
- Determinar as condições operacionais na obtenção da melhor (maior) taxa de aplicação para o sistema FFC;
- Estudar o efeito da altura da coluna de flotação na eficiência do sistema FFC;
- Comparar o sistema desenvolvido (FFC) com o sistema existente (ETAR).

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Processos de lavagem de veículos

O consumo de água por veículo lavado varia com o tipo (processo) de lavagem, com o tipo de veículo (carro, caminhões, ônibus, etc.) e com a atividade desses meios de transportes (urbanos ou rurais). Na Tabela 1 é apresentado o volume de água utilizado em função do processo de lavagem e das classes de veículos.

Tabela 1: Volume de água utilizado nos diferentes processos de lavagem de veículos.

Classe de veículo	Tipo de lavagem	Consumo (L)	Referência
Carros leves	<i>roll-over</i>	90 -400	Ceccato (2007)
Ônibus e veículos pesados	<i>roll-over</i>	350-600	Ceccato (2007)
Veículos pesados	Não apresentado	1200	Paxeús (1996)
Ônibus (Garagem de ônibus – 273 veículos)	<i>roll-over</i>	430	Rosa et al. (2001)
Veículo leve	Túnel	350	Prior (2000)

Na lavagem manual com operador e jato de pressão de água, o volume de água é muito variável e depende principalmente do número de ciclos de lavagem. O consumo pode variar desde 75L (Teixeira, 2003) até 190-380L (Al-Odwani et al., 2007).

Na drenagem da água empregada na lavagem ao sistema de coleta normalmente ocorrem perdas devido à evaporação e infiltrações. Estas perdas variam entre 20 e 30% e dependem do tipo de lavagem empregado, sendo maiores na lavagem do tipo manual do que no tipo túnel, por exemplo (U.S. EPA, 1980 apud Teixeira, 2003).

As etapas na lavagem comercial de veículos são basicamente três: Na primeira etapa é feita a limpeza pesada, onde são utilizados limpadores de alumínio e desengraxantes na limpeza de chassi, motor e partes mecânicas, removendo óleos, graxas, sólidos e fuligem. Em seguida, ocorre a lavagem da carroceria dos veículos. Nesta etapa pode ser adicionado xampu e/ou utilizada água sob pressão (lavadoras de jato de água de alta-pressão). A última (opcional) etapa é o enxágüe do veículo com soluções que entregam características

hidrofobizantes à superfície dos veículos, visando facilitar a secagem e eventual polimento (Jönsson & Jönsson, 1995).

Paxéus (1996) avaliou a composição dos desengraxantes a base de petróleo e reporta que estes apresentam na sua formulação 95-99% de hidrocarbonetos e 3-5% de surfactantes. Por outro lado, os desengraxantes do tipo microemulsões contem uma menor concentração de hidrocarbonetos (10-30%) e maior concentração de surfactantes (10-30%) e, ainda, alguns co-solventes. A Tabela 2 apresenta alguns produtos disponíveis no mercado para limpeza de veículos.

Tabela 2. Tipos de produtos químicos utilizados na lavagem de veículos e seus principais componentes.

Tipo de Produto	Indicação de uso	Principais constituintes	Fonte
Limpador de alumínio (detergente ácido)	Blocos de motores, motores, rodas, furgões de alumínio (limpeza pesada)	Ácido sulfônico, ácido clorídrico, ácido fluorídrico e conservantes.	(Sandet, 2007)
Xampu (detergente Neutro)	Limpeza externa de ônibus, carros, trailers e caminhões	Tensoativos não iônicos, ácido sulfônico, hidróxido de sódio, corante, conservante e seqüestrante.	(Bomtoque, 2007)
Desengraxante (detergente alcalino)	Desengraxante para chassis e motores	Hidróxido de sódio, seqüestrante, espessante, tensoativos não iônicos, Lauril éter sulfato de sódio, corante e conservantes.	(Lmquimica, 2007)

2.1.1 Águas residuárias de lavagem de veículos

O processo de lavagem de veículos pode gerar águas residuárias com diferentes características, que decorrem dos poluentes impregnados na superfície dos veículos, dos produtos químicos utilizados e da quantidade de água utilizados na lavagem, da parte do veículo enxaguada (lataria, chassi, rodas, etc.) e, ainda, de efeitos sazonais climáticos.

Além dos produtos químicos empregados na limpeza, a água residuária da lavagem dos veículos possui óleos (de freio, de motor, óleo diesel, óleo de direção hidráulica, etc.), graxas, areia, asfalto, carbono e sais. A Tabela 3 apresenta a caracterização da água residuária de lavagem de diferentes classes de veículos e locais de amostragem. Segundo a U.S.EPA (1999), quando não é realizado o enxágüe da parte inferior e do motor dos veículos, as concentrações de agentes desengraxantes, solventes e metais pesados são menores.

Os sólidos dissolvidos são principalmente sais inorgânicos e, portanto, modificam a condutividade da água (Metcalf & Eddy, 2003). O procedimento para determinação da quantidade de sólidos dissolvidos e dispersões coloidais presentes na água é realizado por filtração em membranas de 1,2 μ m (APHA, 1998).

Muitos compostos são mais facilmente degradados por via química (DQO) do que por via biológica (DBO). A Demanda Química de Oxigênio – DQO – é uma medida do conteúdo de matéria orgânica de águas residuárias e naturais. O oxigênio equivalente da matéria orgânica, que pode ser oxidada, é medido utilizando-se um agente oxidante forte em meio ácido.

Os sólidos (totais, suspensos e dissolvidos) podem ser separados em fixos e voláteis. Os sólidos fixos são os que não se volatilizam a 600°C. Braile (1979) explica que esta pode ser uma análise importante para determinação da possibilidade ou não de tratamento biológico de um efluente. Mesmo um efluente considerado biodegradável ($DBO/DQO \geq 0,5$), se apresenta alto teor de sólidos dissolvidos fixos, não pode ser tratado via degradação biológica por problemas de pressão osmótica (Braile, 1979).

A turbidez e a cor são parâmetros de especial importância para controle da qualidade da água e podem ser utilizados em estudos iniciais de otimização de processos de agregação como indicativos de eficiência. Bratby (1980) explica que uma água pode apresentar turbidez reduzida e cor elevada.

Para Braile (1979) a turbidez é um indicativo da presença de material coloidal e partículas minerais suspensas na água, ou seja, material suspenso, como silte, bactérias, algas, vírus, macromoléculas e derivados da matéria orgânica do solo.

Tabela 3. Características físicas e físico-químicas das águas residuárias de lavagem de veículos em função do tipo de veículos.

Classe de veículo	Amostragem	Parâmetros	Referência
Aviões e veículos pesados	12 postos de lavagem do exército americano	ST = 570-12.900mg.L ⁻¹ DQO = 64-3.200mg.L ⁻¹ COT = 24-1700g.L ⁻¹ Óleos e graxas = 20-8700mg.L ⁻¹ Detergentes = 0-2 mg.L ⁻¹	(Huang et al., 1984)
Veículos leves	35 postos de lavagem na Suécia (entre 1990 e 1992)	Óleo total = 10-1750 (*242)mg.L ⁻¹ Óleo mineral = 3-1300 (*107)mg.L ⁻¹ DQO = 120-4200 (*1180)mg.L ⁻¹	(Paxéus, 1996)
Veículos pesados	4 postos de lavagem na Suécia (entre 1990 e 1992)	Óleo total = 65-1200 (*460)mg.L ⁻¹ Óleo mineral = 50-830 (*380)mg.L ⁻¹ DQO = 1700-7500 (*4500)mg.L ⁻¹	
Veículos leves	1 posto de lavagem no Japão	SST = 16-94mg.L ⁻¹ DQO = 8-42mg.L ⁻¹ DBO = 5-50mg.L ⁻¹ Turbidez = 4-64mg.L ⁻¹ Cl ⁻ = 9-18mg.L ⁻¹ <i>E. Coli</i> = N.D.	(Hamada e Miyazaki, 2004)
Empresa de Transportes Coletivos Santa Brígida	1 Garagem de ônibus (500 veículos) em São Paulo - SP	ST = 587-718mg.L ⁻¹ SSED = 0,3-2mL.L ⁻¹ Óleos e graxas = 142-403mg.L ⁻¹ Turbidez = 118-180mg.L ⁻¹ Cor >500Hz pH = 6,5	(Morelli, 2005)
Empresa de Transportes Coletivos Viamão Ltda.	1 Garagem de ônibus (250 veículos) em Viamão - RS Lavagem da carroceria	ST = 213-755(*444) mg.L ⁻¹ SSED = 0,2-1(*0,5) mL.L ⁻¹ SST = 80-350 (*198) mg.L ⁻¹ DQO = 42-180(*91) mg.L ⁻¹ Tensão S. = 66-71(*69)mN.m Turbidez = 60-420(*190)mg.L ⁻¹ pH = 5,9-7,9 (*7)	(Godinho, 2003)
Empresa de Transportes Coletivos Viamão Ltda.	1 Garagem de ônibus (250 veículos) em Viamão - RS Lavagem do chassi e do motor	ST = 255-1410(*603) mg.L ⁻¹ SSED = 0,-2,4(*1,3) mL.L ⁻¹ SST = 85-830 (*303) mg.L ⁻¹ DQO = 60-311 (*154)mg.L ⁻¹ Tensão S. = 32-68 (*57)mN.m Turbidez = 61-747(*295)mg.L ⁻¹ pH = 5,9-7,3 (*7)	(Godinho, 2003)
Empresa de Transportes Coletivos Viamão Ltda.	1 Garagem de ônibus (250 veículos) em Viamão - RS Lavagem interna	ST = 395-785(*546) mg.L ⁻¹ SSED = 0,2-2,4(*1,4)mL.L ⁻¹ SST = 95-465 (*241)mg.L ⁻¹ DQO = 56-152(*96)mg.L ⁻¹ Tensão S. = 30-40(*34)mN.m Turbidez = 60-428(*206)mg.L ⁻¹ pH = 6,2-7 (*7)	(Godinho, 2003)

*Valores médios.

A cor é normalmente provocada pela presença de corantes orgânicos e inorgânicos. Material lixiviado do solo e matéria orgânica degradada (substâncias húmicas e fúlvicas) são as principais causadores de cor, assim, este parâmetro pode ser vinculado ao Carbono Orgânico Total - COT (Braile, 1979; Leal e Libânio, 2002; Bratby, 1980).

A tensão superficial da água é diretamente vinculada à presença de óleos e substâncias tensoativas (surfactantes) e depende da concentração e da presença de ar (geração de espumas).

Como observado na Tabela 3, a água residuária da lavagem de veículos pesados (Paxéus, 1996) é mais carregada com poluentes que a água residuária da lavagem de veículos leves, para uma mesma região e época. Ainda, quando a parte do veículo enxaguada é o chassi e as partes mecânicas, a água residuária é significativamente mais carregada que a água de lavagem da carroceria (Godinho, 2003).

A presença de óleos e graxas e também de substâncias surfactantes é evidência nestes efluentes pela baixa tensão superficial. Entretanto, processos de lavagem que não utilizem xampus podem produzir água residuária com tensão superficial próxima a da água natural (ver Tabela 3 – água residuária da lavagem da carroceria – (Godinho, 2003)).

2.2 Tratamento, descarte e reúso de águas residuárias de lavagem de veículos

As águas residuárias da atividade de lavagem de veículos devem ser tratadas previamente ao descarte, uma vez que o descarte sem tratamento nos corpos hídricos pode acarretar problemas à vida aquática (toxicidade), aumentar a turbidez das águas receptoras e gerar odores e espumas (Huang, 1984).

Na Suécia em 1990, aproximadamente 0,5% do esgoto urbano gerado era oriundo da lavagem de veículos e as contribuições de Naftaleno (30 %) e óleo mineral (14 %), por parte deste efluente, eram bastante significativas (Paxéus, 1996). Ainda, a carga de hidrocarbonetos que afluía a rede pública de esgotos era de aproximadamente 35.000 toneladas, equivalente a 25 % da emissão total deste poluente pela indústria no mesmo período (Jönsson & Jönsson, 1996).

Os sistemas separadores água/óleo (SAO's) são os dispositivos mais utilizados no tratamento para descarte da água residuária da lavagem de veículos. No Rio Grande do Sul a única exigência feita aos responsáveis por postos de lavagem de veículos (de empresas de transporte ou comerciais) é a instalação de caixas separadoras de óleo e areia antes do descarte da água residuária. Entretanto, Huang (1984) reporta que a maior parte do óleo presente na água residuária da lavagem de veículos, principalmente de veículos pesados, encontra-se na forma emulsificada, que é dificilmente separada do meio líquido por gravidade (SAO's). Além disso, os SAO's não são eficientes na clarificação desta água.

Assim, como alternativa aos SAO's diversos tipos de tratamento, visando o reciclo da água ao processo de lavagem, vem sendo estudados: filtração (Al-Odwani et al., 2007), Ultra Filtração (Jönsson & Jönsson, 1995), UF-adsorção em carvão ativado (Hamada e Miyazaki, 2004), Tratamento Biológico (Morelli, 2005), Tratamento Biológico Floculação-Flotação (Magalhães, 2005), Floculação-Sedimentação (Huang, 1984; Morelli, 2005) e Floculação-Flotação por Ar Dissolvido (FAD) (Rubio, 2002; Rubio et al., 2007). Entretanto, muitos destes processos não são viáveis em função dos seguintes fatos:

1. Disponibilizam água de reúso² com qualidade insuficiente para o processo de lavagem de veículos;
2. Ocupam muita área em planta;
3. Ocorrem em altos custos de investimento e/ou operação.

2.2.1 Generalidades, problemas e situação atual do Reciclo de água na lavagem de veículos

Existem três tipos de reciclagem da água na lavagem de veículos:

- Reciclo por tratamento preliminar e filtro de areia;

² A água de reúso é assim definida pela resolução nº 54 de 2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH: água residuária que se encontra dentro dos padrões de qualidades exigidos para a atividade a que se destina.

- Reciclo por tratamento primário e primário avançado,
- Reciclo em circuito fechado.

Reciclo com tratamento preliminar: Este tipo de reaproveitamento entrega ao operador entre 50 e 80% da água de enxágüe com qualidade suficiente para o reuso na lavagem de veículos. Normalmente, este sistema conta com simples remoção de partículas sólidas de areia e de óleos. Os métodos de tratamento utilizados são a separação gravimétrica (areia e óleo) e a filtração em leito de areia;

Reciclo com tratamento primário e primário avançado: Neste caso é empregada à coagulação/floculação (agregação) e a separação sólido/líquido. A água separada é filtrada usando filtros de areia e/ou carvão ativado (remoção de odores e surfactantes). Este processo recupera entre 80 e 100% da água coletada junto aos pontos de lavagem. O percentual de água perdida e/ou não reciclável pode ser repostado por enxágüe final dos veículos com água de abastecimento público ou poço (Metcalf & Eddy, 2006) ou via abastecimento do sistema (Aquaflot Ltda.). A função dessa água de abastecimento público ou poço é de, além de repor as perdas ocorridas no processo de lavagem e drenagem/coleta da água residuária junta a lavagem, manter os sólidos dissolvidos em níveis aceitáveis, uma vez que estes não são removidos por tratamentos primários;

Reciclo em ciclo fechado: Neste tipo de reciclo, cuidados especiais são considerados na remoção de sólidos dissolvidos. Os sistemas de tratamento utilizados são principalmente osmose reversa e nanofiltração e/ou colunas de troca iônica, que apresentam elevada eficiência de remoção de sólidos dissolvidos. A desvantagem destes sistemas é o alto custo de operação e aquisição da estação de tratamento e, ainda, dificuldades operacionais.

Os principais problemas observados na prática de reciclagem de água na lavagem de veículos são os seguintes:

- Formação de manchas na superfície dos veículos (*spot*);
- Odor na água de reuso;
- Presença de bactérias patológicas nos reservatórios, filtros ou outros componentes do sistema de tratamento ou armazenagem, acarretando em possíveis riscos à saúde dos

operadores do sistema e usuários do serviço (funcionários das empresas de transporte e motoristas de ônibus e proprietários de veículos de passeio);

- Corrosão dos veículos por íons cloretos residuais.

Os *spots* são manchas formadas pela evaporação da água e conseqüente precipitação dos sais presentes. A solução mais indicada para o problema é o controle da concentração de sólidos dissolvidos na água. Metcalf & Eddy (2006) recomendam a realização de enxágüe final com água de abastecimento público ou de poço ou, ainda, com água de osmose reversa.

O odor na água é causado principalmente por substâncias orgânicas (os produtos do petróleo são grandes responsáveis por odor na água (Peavy et al., 1986)) e produtos de decomposição bacteriana anaeróbia, tais como as mercaptanas, o gás sulfídrico, etc.

Quando o odor é causado pela matéria orgânica, mais especificamente pelos microrganismos, o processo de cloração e/ou adsorção em carvão ativado pode apresentar eficiência satisfatória. A cloração deve ser feita sempre em dosagens superiores ao “*break-point*”, caso contrário, pode-se produzir uma intensificação do odor. Na remoção com carvão ativado, utilizam-se concentrações entre 1 e 1000mg.L⁻¹. O tempo de contato entre carvão e efluente pode variar de 5 a 30 minutos.

A aeração da água pode ser eficiente para remoção de odores, principalmente se estes forem causados por decomposição anaeróbia.

A presença de bactérias e microrganismos oferece risco aos usuários de sistemas de reciclagem de água na lavagem de veículos. Como exemplo, Hart (2001) comenta que muitos fornecedores³ estão familiarizados com a presença da *Legionella*⁴ em sistemas de resfriamento de indústrias abastecidos com água de reúso (água de ETE principalmente).

³ Reúso macro externo (FIRJAN, 2006) – indústrias e empresas de saneamento que vendem água de reúso.

⁴ *Legionella pneumophila*, bactéria causadora de pneumonia.

Essa bactéria encontra local propício para desenvolvimento nos sistemas de reciclagem de água, dadas todas as condições necessárias de temperatura, relativamente quentes nos filtros de areia e carvão, e água parada.

No reciclo de água no processo de lavagem de veículos, acredita-se que a ocorrência de bactérias e microrganismos é reduzida. Por exemplo, em estudo realizado em diversos postos da Shell que utilizam o sistema *Rowafil*⁵ não foi constatada a contaminação do sistema por esta bactéria (Hart, 2001). Ainda, Hamada e Miyazaki (2004) reportam a não ocorrência de *E. Coli* tanto na água residuária do processo de lavagem, quanto na água tratada com ultrafiltração em membrana.

Apesar da baixa probabilidade de contaminação, no caso de ocorrência, as principais maneiras de eliminá-la são: Ozonização, tratamento biológico, cloração e aeração. O uso de cloro é um dos mais controversos, pois pode ser prejudicial aos veículos e ainda não garante a eliminação de bactérias por tempo suficiente, embora possa auxiliar na eliminação de odor. O ozônio, por sua vez, pode acelerar a corrosão das borrachas, mas possui como vantagem a rápida reação. A aeração constante somada à grande circulação de água é uma alternativa que não apresenta problemas, mas que pode ser ineficiente aos níveis desejados.

Os íons cloretos⁶ foram estudados por Nace (1975) apud Teixeira (2003) e a conclusão é de que a recirculação de água em sistemas de lavagem de veículos pode aumentar gradativamente a concentração destes, acelerando o processo de corrosão das carrocerias. A extensão da corrosão varia em função do aumento da umidade relativa do ar e da concentração de sulfatos na atmosfera, sendo maior em cidades industrializadas. Por

⁵ Sistema Holandês de reciclagem de água em ciclo fechado via tratamento físico e biológico e que é empregado principalmente na Europa e E.U.A.

⁶ Segundo estudos da U.S.EPA (1999) apud Magalhães (2003) são encontrados em maiores concentrações em processos de lavagem que contemplam o enxágüe do motor e da parte inferior dos veículos.

outro lado, cuidados especiais devem ser tomados na utilização de alguns reagentes à base de cloretos, que podem aumentar ainda mais esta corrosão.

A Tabela 4 mostra alguns equipamentos (sistemas de tratamento) disponíveis comercialmente no Brasil. A amortização do investimento depende do tipo de reciclagem empregado (custo de construção e operação do sistema de tratamento), do tipo de abastecimento do ponto de lavagem (água de poço, água da rede pública ou mista) e do custo com a emissão do efluente. Alguns investimentos podem ser amortizados em curto espaço de tempo (<2-6 meses).

Tabela 4. Equipamentos para reciclagem de água de lavagem de veículos disponíveis comercialmente no Brasil.

Equipamento	Empresa/instituição	Princípio	Referência
Equipamentos de eletrocoagulação	Naturaltec	Eletrocoagulação	(Naturaltec, 2007)
WSQ / C – Processo físico	Ceccato	Filtragem e sorção (cilindros de aço com filtros de quartzo e carvão ativado).	(Ceccato, 2007)
WSbio – Processo Biológico	Ceccato	Tratamento biológico e FAD	(Ceccato, 2007)
ETAR	Aquaflot	Floculação -FAD	(Aquaflot, 2007)
DAS RECYCLER®	Dynamic Aqua Science do Brasil - DAS	Precipitação química/sedimentação /filtração	(DASBRASIL, 2007)
Recicladora HDR 777	Kärcher Ind. e Com. Ltda.	Floculação/ Sedimentação/ Filtros.	(KARCHER, 2007)
Purificadora WPC	Kärcher Ind. e Com. Ltda.	Osmose reversa e sistema de filtros	(KARCHER, 2007)

Alguns trabalhos acadêmicos têm sido realizados visando avaliar o potencial poluidor da água residuária do processo de lavagem de veículos e/ou desenvolver técnicas de tratamento que possibilitem a reciclagem da água no processo. Estes trabalhos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Trabalhos realizados no Brasil sobre água de lavagem de veículos.

Trabalhos / Patentes	Estudo/Detalhamento
Rosa, J. J.; Beal, R. C.; Rubio, J. Tratamento e recirculação da água de lavagem de veículos da Cia. Carris Porto-Alegrense. Relatório final de convênio LTM-UFRGS/CARRIS não publicado. Porto Alegre, RS, 2001.	O estudo, em nível de bancada e piloto, avaliou o tratamento para recirculação da água residuária da lavagem de veículos por Floculação-Flotação (FF). Ainda, foi avaliada de forma comparativa à tecnologia de telas filtrantes, já utilizada na empresa com o mesmo fim. Os resultados mostraram a baixa eficiência do sistema de telas filtrantes e vincularam esta aos problemas ocasionados nos equipamentos de lavagem e na pintura dos veículos. Por outro lado, o sistema FF se mostrou bastante eficiente e com potencial para minimização dos problemas enfrentados.
Teixeira, P., C. Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de lavagem de veículos visando à reciclagem da água. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2003.	Discussão bibliográfica do processo de lavagem de veículos e das possíveis dificuldades a serem enfrentadas em sistemas de reciclagem da água deste processo. Avaliação do desempenho da flotação por ar dissolvido (FAD) no tratamento desta água.
Grobério, F. Estudo de Resíduos Gerados nas Atividades de Lavagem de Carros em Postos de Serviços Automotivos na Cidade de Vitória – ES. Dissertação de mestrado. – Faculdade de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória – ES, 2003.	Estudo sobre remoção de óleos e graxas por sistemas de separação água/óleo (SAO). Ainda, análise física e química dos resíduos sólidos de fundo das caixas separadoras.
Morelli, E.,B.. Reúso de água na lavagem de veículos. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.	Conceitos básicos sobre reúso de água e a prática, pela Sabesp, na Região Metropolitana de São Paulo, de reúso de água de ETE's de esgoto doméstico em diversas atividades. Apresenta aplicações tecnológicas no Brasil de processos e equipamentos de tratamento para reúso de água de lavagem de veículos.
Magalhães, A. F. R. Proposição, implantação, partida e ajustes de reatores biológicos e físico-químicos para tratamento e reciclagem de efluentes de lavadores de veículos em escala real. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.	Desenvolvimento de processo e equipamento para tratamento e reúso de água residuária de lavagem de veículos composto de biofiltros aerados submersos seguidos por flotação por ar dissolvido. Foi construído, instalado e operado protótipo “piloto” em uma empresa de transportes de carga.
Secron, M., B. Avaliação de sistemas separadores água e óleo no tratamento de efluentes de lavagem, abastecimento e manutenção de veículos automotores. 2006	Caracterização do efluente de lavagem, abastecimento e manutenção de veículos. Ênfase na formação de emulsões óleo/água e redução da eficiência das separadoras água/óleo (SAO's). Ainda, faz a caracterização do material de fundo (lodo) das caixas separadoras.
Ponciano, M., C.. Elaboração de um programa de reúso da água em lavagem de veículos nos postos de combustíveis do Distrito Federal. Dissertação de mestrado, Universidade Católica de Brasília, Brasília, DF, 2006.	Programa de reúso de água de lavagem de veículos em postos de combustíveis para otimizar benefícios sócio-ambientais e econômicos desta prática no Distrito Federal. Análise de pesquisa em 202 postos de combustíveis. Não existia, na época do estudo, reúso de água na lavagem de veículos.

Pesquisas iniciadas em 1999 sobre tratamento e recirculação de água na lavagem de veículos, no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental – LTM, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, resultaram patente (INPI: 0006390-8. Equipamento e processo para reciclagem de água de lavagem de veículos e efluentes similares). A comercialização da patente, via convênio com a UFRGS, que recebe royalties, é feita pela Aquafлот Industrial Ltda. desde 2001. Aproximadamente 400.000m³ de água já foram tratados e recirculados ao processo de lavagem de veículos em aproximadamente 22 estações instaladas principalmente nos estados do Rio Grande do Sul e São Paulo. As empresas que utilizam a tecnologia são as de transporte de passageiros e de carga e também postos comerciais de lavagem de veículos. O equipamento de tratamento recebeu o nome comercial de Estação de Tratamento de Água para Reúso – ETAR e possibilita a reutilização de cerca de 100% da água captada junto ao processo de lavagem. A Figura 1 mostra uma fotografia de um estação de tratamento do tipo ETAR e a Tabela 6 apresenta alguns exemplos existentes de equipamentos em operação e suas capacidades de tratamento.



Figura 1. Fotografia de uma ETAR instalada em uma empresa de ônibus (capacidade de tratamento de 2.500L.h⁻¹).

Tabela 6. Aplicações do sistema ETAR.

Empresa	Localidade	Veículos atendidos (dia⁻¹)	Capacidade de tratamento (m³.h⁻¹)
UNESUL TRANSPORTES LTDA	Porto Alegre, RS.	200 ônibus	10
VISATE VIAÇÃO SANTA TEREZA	Caxias do Sul, RS.	280 ônibus	7,5
EMPRESA DE TRANSPORTES COLETIVOS VIAMÃO LTDA	Viamão, RS	250 ônibus	5,0
SCAPINI TRANSPORTES E COMÉRCIO LTDA	Lajeado, RS	10 Caminhões	2,5

2.2.2 Descrição do processo de lavagem dos ônibus e do sistema de tratamento para reúso de água da Empresa de Transportes Coletivos Viamão LTDA.

O fluxograma do processo de lavagem dos ônibus da empresa é apresentado na Figura 2 e as Figuras 3, 4 e 5 ilustram, respectivamente, o pátio da empresa e os pontos de lavagem manual e mecanizado dos ônibus. A Tabela 7 apresenta o balanço hídrico da água nos distintos pontos de lavagem. A água residuária da lavagem é recolhida por calhas nos pontos de lavagem e em seguida passa por caixas de óleo e areia e finalmente é bombeada aos tanques de equalização.

A lavagem manual, abastecida com água do poço, ocorre em dois pontos distintos. Em um ponto são limpas as partes mecânicas em manutenção e, no outro, o chassi, as rodas e a parte interna dos ônibus. Neste procedimento são utilizados 400 L.mês⁻¹ de xampu

(detergente neutro), 1000 L.mês⁻¹ de detergente ácido e 1000 L.mês⁻¹ de detergente alcalino. Na lavagem mecanizada (tipo *roll-over*), abastecida com água de reúso, não são utilizados quaisquer produtos químicos para auxiliar na limpeza.

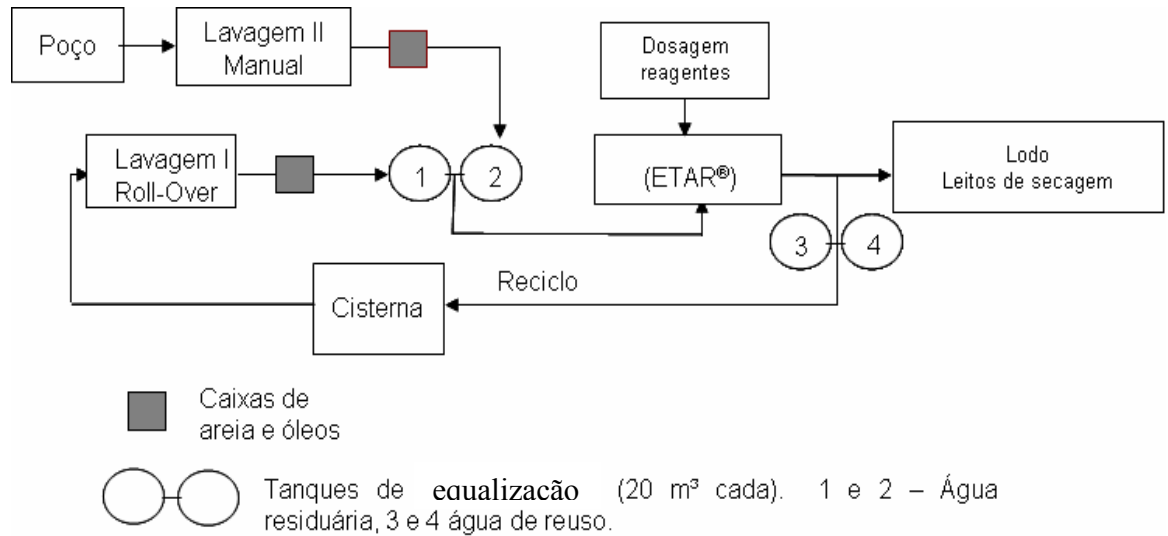


Figura 2. Fluxograma do sistema de tratamento para reciclagem de água do processo de lavagem de ônibus da empresa Viamão Ltda.



Figura 3. Fotografia de satélite do pátio da empresa de transportes coletivos Viamão Ltda. Localização dos pontos de lavagem: 1 Lavagem manual (chassi, parte interna e rodas), 2 lavagem manual (partes mecânicas / peças em manutenção) e 3 lavagem mecanizada (lataria).



Figura 4. Pontos de lavagem manual. (a) Lavagem de partes mecânicas / peças em manutenção e (b) lavagem interna e das rodas. 1 – Ralo para coleta de água residuária e 2 – calha para coleta de água residuária.






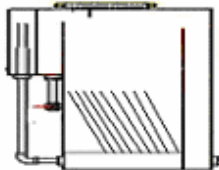
Figura 5. Ponto de lavagem mecanizado (tipo *roll-over*). 1 – Calha para coleta da água residuária.

Tabela 7. Balanço hídrico do sistema de lavagem dos ônibus da empresa Viamão Ltda.

	Lavagem manual (chassi + motor, rodas e interno)	Lavagem mecânica - Roll-over (Lavagem externa)
Consumo de água, L/ônibus	500	500
Frequência de lavagem	1 lavagem a cada 2 dias	Diária
Volume diário total consumido, m ³	31,25	125
Perdas, % consumo	30	20
Volume afluyente ao sistema de reciclo, m ³	22	100

A Empresa de Transportes Coletivos Viamão Ltda. conta com um sistema de tratamento para reciclagem da água de lavagem de veículos via floculação-flotação (FAD), operando desde 2006 e sem a necessidade de um operador exclusivo. Este sistema possui capacidade de tratamento de $7\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ e foi projetado pela empresa Aquafлот Industrial Ltda. A Tabela 8 apresenta as características construtivas, hidráulicas e operacionais da estação instalada na empresa Viamão Ltda. e a Figura 6 mostra uma vista da estação.

Tabela 8. Características construtivas, hidráulicas e operacionais do sistema ETAR.

Floculação	Floculadores		Reagentes	
		Floculador serpentinado (agitação rápida) $G = 1000s^{-1}$ $Tr = 10 s$	Na(OH) comercial para ajuste de pH~7 Polímero orgânico-catiônico biodegradável de baixo peso molecular Aquafлот AL [Aquafлот AL] = 300 - 700 mg.L ⁻¹ Anti-espumante	
Flotação	Unidade de geração de microbolhas			
		Vaso saturador: - Leito de anéis de pall; - Válvula solenóide para controle de nível; - Pressão de saturação de 4,5 Kgf.cm ⁻² ; - Vazão de ar = 480 mL.L ⁻¹ .		Célula de flotação de alta taxa (FADAT): - Corpo em fibra de vidro; - 1 m de profundidade; - Diâmetro interno de 1,05 m; - Taxa de aplicação 9m.h ⁻¹ .

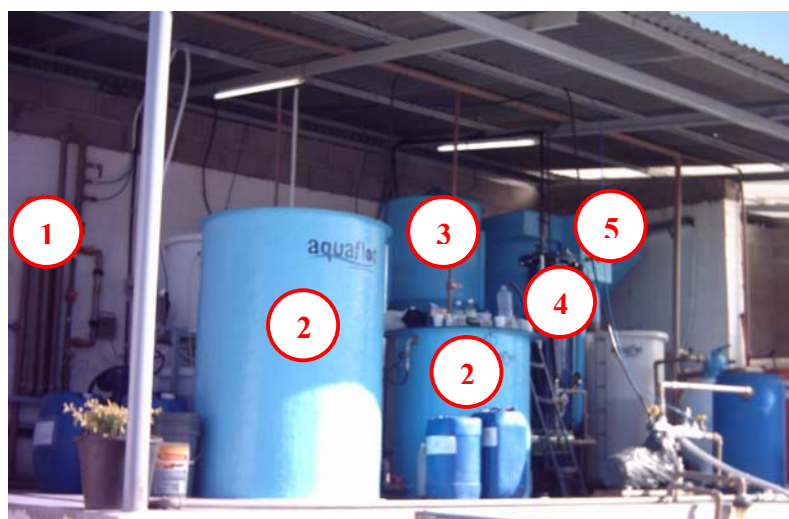


Figura 6. Fotografia da ETAR em operação na empresa Viamão Ltda. 1 – Reator de floculação hidráulica em linha (tipo FF[®]) – mistura rápida; 2 – Tanques de reagente (floculante, soda, anti-espumante); 3 - Reator de tanque agitado – mistura lenta; 4 – Vaso saturador; 5 – Célula de flotação (FADAT).

Existe ainda um filtro de areia após a unidade de separação sólido/líquido por flotação. Esta medida aumenta a segurança do sistema na retenção de algum particulado que possa danificar a pintura dos veículos (riscos e arranhões) e/ou os equipamentos de lavagem.

Uma alternativa é a instalação de um filtro de carvão ativado para remoção de surfactantes e odor, posteriormente ao filtro de areia. Em uma unidade de reciclagem de água em Porto Alegre – RS (Empresa Unesul Ltda.), foram instalados 2 filtros de carvão, operando em paralelo, após a filtração em leito de areia. O resultado é bastante satisfatório na redução de odor, porém o custo é elevado.

O lodo gerado no tratamento é recolhido a leitos de secagem. Na empresa Viamão Ltda. são operados dois leitos de secagem de 2,5 m³ de volume cada, em paralelo. Os leitos contam com drenagem de fundo do tipo “aranha” (ver Figura 7).

Os leitos são limpos com intervalo de aproximadamente 1 mês. O lodo têm sido encaminhado para aterro industrial classe II-A.

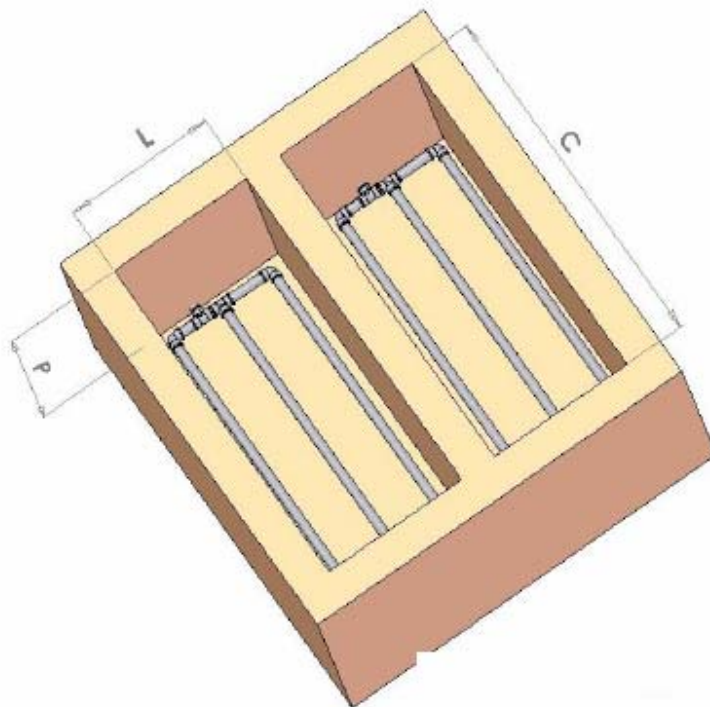


Figura 7. Leito de secagem para lodo gerado nas unidades ETAR de tratamento para reciclagem de água de lavagem de veículos. P – profundidade; L – largura e C – comprimento. Aquafлот Industrial Ltda.

2.3 Floculação-flotação (FAD) no tratamento de efluentes

2.3.1 Aspectos físico químicos da flotação (FAD)

O processo clássico de flotação por ar dissolvido – FAD é a tecnologia mais utilizada no tratamento de águas residuárias da indústria e acredita-se no aumento considerável de suas futuras aplicações (Rubio et al., 2002a; Rubio e Carissimi, 2005; Rubio et al., 2007). Nesse processo, microbolhas ($\leq 100 \mu\text{m}$) são formadas pela redução de pressão da água pré-saturada com ar a pressões maiores que a atmosférica.

A FAD é reconhecida como método de separação de partículas desde o início do século XX (Rubio, 2002a) e muitas são as suas aplicações – ver Tabela 9. Este processo proporciona unidades de tratamento compactas e, se desejado, alguma seletividade na separação sólido/líquido (novo paradigma - tecnologias limpas). Uma limitação é a capacidade de separação do processo, 1 a 3 % em massa.

Tabela 9. Algumas aplicações ambientais da flotação. Adaptado de Rubio et al. (2007).

Aplicações (Sólido/líquido, sólido/líquido1/líquido2 ou líquido/líquido)
Tratamento de componentes orgânicos (solventes de plantas industriais), óleos, gorduras e corantes (ágatas)
Tratamento de efluentes com metais pesados (As^{+3} , Cr^{+3}/Cr^{+6} , Cd^{+2} , Pb^{+2} , Mn^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} , Se^{+2}) e ânions (CrO_4 , AsO_4 , PO_4 , MoO_4)
Reciclo de água (filtro): Remoção de ânions e íons de cálcio
Tratamento e reúso de Drenagem Ácida de mina - DAM (Menezes et al., 2004; Rubio e Rodrigues, 2006)
Processos industriais
Separação de proteínas
Remoção de impurezas na indústria da cana de açúcar (produção de álcool, biodiesel)
Separação de óleos, gorduras, surfactantes (sabões), remoção de odor e sólidos na indústria alimentícia
Reciclagem de plásticos, pigmentos, corantes e fibras
Separação de tinta do papel, gomas, resinas, e pigmentos de toner da impressão
Remoção de óleos emulsificados na indústria química e petroquímica
Espessamento de lodo ativado
Reúso (Reciclo) de resíduos industriais (PET, Lavagem de veículos, aviões)
Outros
Separação-remoção de microorganismos (algas, fungos, bactérias)
Tratamento de solos: remoção de pesticidas, óleos e elementos radioativos
Tratamento de águas residuárias industriais no controle de corrosão, remoção de sabões e detergentes
Tratamento de efluentes domésticos e industriais
Tratamento de esgoto municipal (remoção de flocos biológicos e sólidos suspensos)

A Tabela 10 apresenta algumas aplicações não convencionais de FAD no Brasil: Tratamento de água oceânica poluída para alimentação de piscinas (uso recreacional) em praias, tratamento de águas contaminadas de lagos (parques municipais) e tratamento de águas de rios (Rubio et al., 2007).

Tabela 10. Recentes aplicações não convencionais de FAD no Brasil. Adaptado de Rubio et al. (2007).

Unidade FAD	Capacidade de tratamento, m³.h⁻¹
Favela da rocinha*: Rio de Janeiro (piscina de água salgada)	1080
Rio Carioca (Praia do Flamengo): RJ (tratamento de rio)	1080
Lagoa da Imboassica*: RJ (Recuperação de lagoa)	900
Piscinão de Ramos: RJ (piscina de água salgada)	270
Lagoa da Aclimação*: São Paulo – SP (Recuperação de lagoa em parque)	180
Parque do Ibirapuera: São Paulo – SP (Recuperação de lagoa em parque)	540
Ribeirão Guavirutuba: SP (tratamento de rio)	720
Canal Pinheiros**: SP (tratamento de rio)	36000
Rio Negro**: Manaus – AM (tratamento de rio)	25000
Brasília: Clarificação e polimento de efluentes de reatores biológico de tratamento de esgoto urbano (doméstico).	1750

*Projetos em fase de licenciamento.

**Considerados os maiores projetos de FAD do mundo

A primeira aplicação do processo FAD aparece na indústria do tratamento de água para abastecimento público, na década de 20, com células de flotação pouco profundas e de comprimento muito superior a sua largura. Estas unidades atingem taxas de aplicação de 2-3 m.h⁻¹ e a principal limitação destes equipamentos é a baixa profundidade da câmara de flotação (pequeno leito de microbolhas abaixo do material flotado).

A segunda geração de FAD aparece nos anos 60 e ainda hoje é bastante utilizada. Como principal avanço, o aumento na taxa de aplicação (5-7 m.h⁻¹), alcançado com o uso de maior profundidade nas células. Ainda, nesta geração foram introduzidos filtros de areia na saída do clarificado, visando direcionar o fluxo e minimizar turbulências (Taxas de aplicação de 10-15m.h⁻¹ podem ser atingidas), embora a perda de carga gerada pelos filtros seja bastante elevada.

A terceira geração de FAD foi desenvolvida com o mesmo princípio de diminuição de turbulência utilizado na segunda geração. Para diminuir a perda de carga gerada pelos

filtros de areia, estes foram substituídos por placas de orifício e, assim, taxas de aplicação de 25 – 40 m.h⁻¹ podem ser alcançadas. Esta geração de FAD apresenta grande profundidade e, conseqüentemente, grande leito de bolhas entre o material flotado e a saída da célula (Kiuru, 2001).

2.3.1.1 Microbolhas

No processo FAD parte da água tratada é recirculada ao sistema de tratamento. Esta corrente de reciclo é saturada com ar a pressões superiores à atmosférica e a sua despressurização acarreta no surgimento de bolhas entre 15-115µm (Rodrigues, 2004) - microbolhas. A quantidade de ar, que é dissolvida na água, é determinada pela lei de Henry. Quanto maior a pressão de saturação, maior a quantidade de ar dissolvido na água.

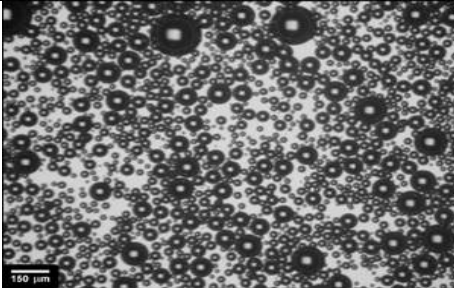
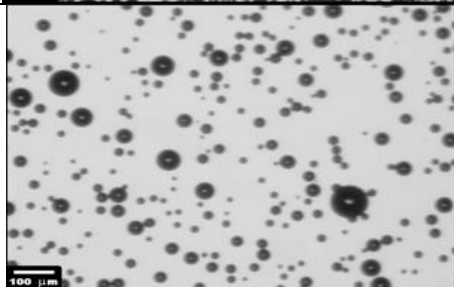
A saturação ocorre normalmente em vasos saturadores ou tubulações pressurizadas, a pressões de 3-6atm (Féris e Rubio, 1999; Rubio et al., 2002). Ainda, um tempo mínimo de residência no vaso saturador ou tubulação pressurizada deve ser disponibilizado, visando atingir a saturação teórica da água prevista por Henry.

A água saturada passa por uma constrição de fluxo (válvula agulha, placa de orifício). Neste ponto ocorre a despressurização do ar e cavidades são geradas na massa líquida pela precipitação do excesso de ar dissolvido na água (cavitação).

Rodrigues e Rubio (2003) e Rodrigues (2004) desenvolveram um medidor de Distribuição do Tamanho de Bolhas – DTB (LTM-BSizer) devido à importância do tamanho de bolhas para o processo de beneficiamento de minérios e para o tratamento de efluentes por flotação. Foram medidas bolhas geradas por distintas formas de geração de bolhas: Ar Induzido-FAI (em venturi); ar dissolvido (vaso saturador e despressurização em válvulas agulhas); ar dissolvido via bomba centrífuga multifase Edur[®] e passagem nas placas porosas. O trabalho demonstrou que, na FAD, a redução na pressão de saturação (588-294 KPa) não altera significativamente o tamanho das microbolhas, nem o DTB, mas diminui a quantidade de bolhas gerada. Com respeito à presença de surfactantes, a variação na tensão superficial da água de 72 para 37mN.m⁻¹ mostrou aumentar em 8 vezes o número de bolhas formadas. A Tabela 11 apresenta imagens de microbolhas geradas com auxílio de

vaso saturador e de bomba centrífuga multiestágios. As bolhas geradas com auxílio da bomba são ligeiramente maiores.

Tabela 11. Microfotografias de microbolhas geradas com a técnica LTM-BSizer. Adaptado de Rubio e Rodrigues (2003).

Técnica de geração de Microbolhas	Imagem gerada com a técnica LTM-BSizer	Diâmetro Sauter
BCMF(Edur [®])		$D_{32} = 65 \mu\text{m}$
FAD (vaso saturador)		$D_{32} = 35\mu\text{m}$

*Escala - barra branca (100 μm) no canto esquerdo das figuras.

2.3.1.2 Mecanismos de contato microbolhas/partículas na FAD

Os principais fatores envolvidos na colisão e eventual efetiva adesão entre microbolhas e partículas são físicos (diâmetro de partículas, diâmetro de bolhas e razão ar/sólido) e físico-químicos (hidrofobicidade, tensão superficial do líquido e deslocamento, rompimento e estabilização do filme líquido existente entre a bolha e o floco).

Existem muitos trabalhos visando elucidar os mecanismos de interação entre microbolhas e partículas no tratamento de efluentes por FAD e uma questão que ainda não foi completamente elucidada diz respeito à necessidade ou não de característica hidrofóbica dos flocos.

Os principais mecanismos de interação entre microbolhas e partículas (flocos), na FAD, são detalhados a seguir (Rubio et al., 2002; Rubio e Carissimi, 2005 e Rubio e Rodrigues, 2007):

- **Fenômeno de nucleação na superfície do sólido** (Figura 8). A fração do ar dissolvido na água, que não se converteu em microbolhas no momento da despressurização, permaneceu dissolvida e pode gerar microbolhas, via nucleação, na superfície sólido/água. Este mecanismo parece ser independente da hidrofobicidade da superfície das partículas e pode ser responsável pela flotação de partículas hidrofílicas (Solari e Gochin, 1993 apud Rodrigues e Rubio, 2007). Uma das explicações para este fenômeno é a provável menor energia necessária para formação de cavidades junto as superfícies das partículas.

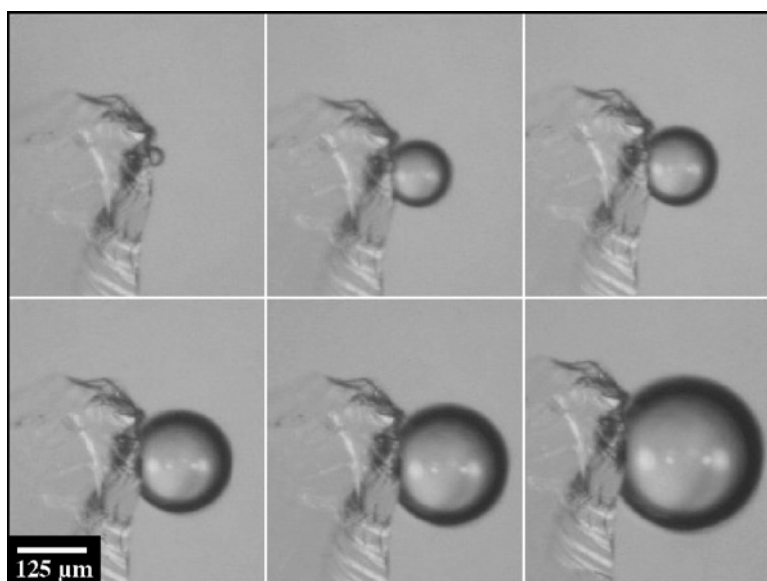


Figura 8. Nucleação e crescimento de uma microbolha na superfície de uma partícula de quartzo tratada com dodecilamina (Rodrigues e Rubio, 2007).

- **Aprisionamento de bolhas na superfície dos flocos (*air entrapment*) ou no seu interior.** Este fenômeno ocorre principalmente pelo crescimento dos flocos na presença de ar, na forma de bolhas (microbolhas), formando os chamados flocos aerados. Os reatores hidráulicos em linha desenvolvidos no LTM (Carissimi e Rubio, 2005 e Rosa e Rubio, 2005) mostram boa eficiência na

geração destes flocos, que possuem velocidade de flotação bem superior a das bolhas de FAD individualmente. Algumas microbolhas aprisionadas em flocos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ podem ser visualizadas na Figura 9;

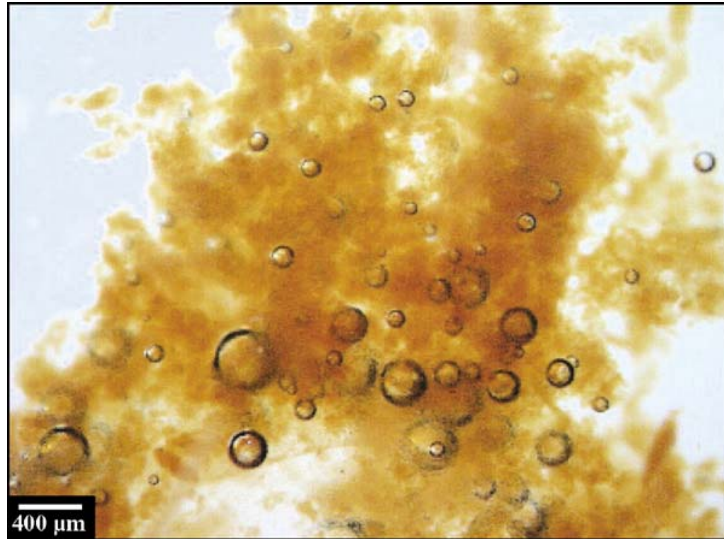


Figura 9. Microbolhas aprisionadas no interior de flocos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. (Rodrigues e Rubio, 2007).

- **Arraste dos flocos pelas microbolhas em ascensão (*entrainment*).** As microbolhas atingem os flocos, auxiliando na ascensão destes. As bolhas podem, ou não, estar efetivamente aderidas aos flocos (hidrofobicidade). Este mecanismo é função principalmente das características hidrodinâmicas do fluxo. A Figura 10 mostra um floculo de precipitado coloidal ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) sendo arrastado por microbolhas de ar.

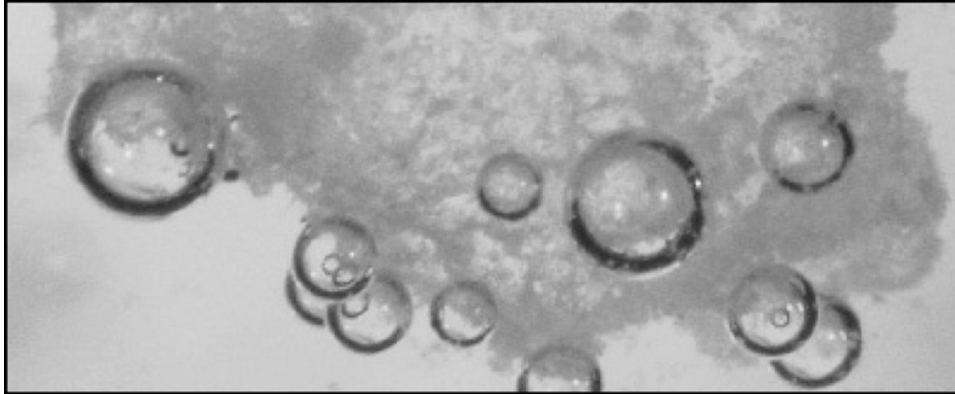


Figura 10. Floco de precipitados coloidais ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) sendo arrastado por microbolhas. (Rubio e Rodrigues, 2007).

2.3.2 Aspectos físico-químicos da formação de flocos

Para Bratby (1980) as águas residuárias industriais podem ser compostas por suspensões e/ou matéria orgânica dissolvida e/ou matéria inorgânica e, ainda, várias formas biológicas como vírus, bactérias e algas. A Tabela 12 classifica as partículas por tamanho e apresenta exemplos de ocorrência.

Tabela 12. Classificação das partículas e seus sistemas dispersos em água. Adaptado de Bratby (1980).

Tamanho de partícula (μm)	Classificação	Exemplo de ocorrência	Área superficial total (m^2/cm^3)	Tempo para sedimentar (densidade = $2,65 \text{ ton}\cdot\text{m}^{-3}$)
10.000 - 100	Dispersão grosseira. Visível a olho nu.	Areia grossa, Areia fina, partículas precipitadas	$6\cdot 10^{-4}$ - $6\cdot 10^{-2}$	0,1-13 s
10-1	Dispersão de partículas finas	Substâncias minerais, partículas precipitadas, silte, bactérias	0,6-6	1 min.-20h
0,1-0,001	Dispersão coloidal	Substâncias minerais, hidróxidos precipitados, macromoléculas, biopolímeros, vírus	60-6000	80dias- 20anos
$< 10^{-6}$	Solução	Íons inorgânicos simples e complexos, espécies poliméricas, polieletrólitos, moléculas orgânicas	-	-

Dispersões coloidais e soluções tendem a se manter estabilizadas por motivo de suas características físicas (Bratby, 1980). Estas características físicas resultam em forças atrativas e repulsivas (atrativas - London, van-der-Waals e Hidrofóbicas; repulsivas - forças elétricas e hidratação) e o balanço entre estas forças determina o grau de estabilidade da partícula (teoria X-DLVO).

O limite superior da faixa de tamanho no qual uma partícula deixa de ser coloidal é aquele em que as forças superficiais passam a ser desprezíveis quando comparadas às inerciais e as de atração gravitacional; este limite depende ainda das condições físico-químicas do meio em que se encontra a partícula (pH, temperatura). A Tabela 12, que foi

modelada para partículas esféricas, deve ser ajustada no caso de partículas com maior relação área superficial/massa (Lins, 2000). Assim, mesmo dispersões de partículas finas podem apresentar a necessidade de desestabilização para que ocorra a sua remoção do meio aquoso.

O potencial zeta das partículas em suspensão, que é a medida da carga da superfície gerada no plano de cisalhamento entre as duas camadas elétricas - camada de Stern e camada difusa, é o parâmetro normalmente medido para estimar a carga superficial das partículas (Bratby, 1980; Lins, 2000; Carissimi, 2003).

A desestabilização dos sistemas coloidais pode ser realizada com a adição de eletrólitos inorgânicos, polímeros floculantes, tensoativos e óleos, ocorrendo a agregação ou aglomeração (no caso de óleos) das partículas ultrafinas ou coloidais formando unidades maiores (Carissimi, 2003).

2.3.2.1 Condições hidrodinâmicas na agregação (coagulação – floculação) de suspensões

Segundo Bratby (1980); Amirtharajah e O'melia (2000); Metcalf & Eddy (2003) e Carissimi (2003) a energia necessária para agregação é transmitida às partículas pelos processos de microfloculação e/ou macrofloculação. A microfloculação ocorre devido ao *movimento Browniano*⁷ (movimento termal aleatório das partículas) e a macrofloculação é causada pelo gradiente de velocidade da massa líquida.

Segundo Parker (1972), as condições hidrodinâmicas nas aplicações de tratamento de água para consumo e nas aplicações de tratamento de águas residuárias são turbulentas.

Thomas et al. (1999) apresentam a taxa de floculação na macrofloculação como sendo:

⁷ Se as partículas envolvidas possuírem diâmetro maior que 1 μm e se o gradiente de velocidades (G) no local da colisão for maior que 5 s^{-1} , este movimento pode ser negligenciado (Bratby, 1980).

$$\text{Taxa de floculação} = \alpha \beta(i,j) n_i n_j, \quad (1)$$

onde α é a eficiência de colisão entre as partículas, $\beta(i,j)$ a frequência de colisão entre as partículas de tamanho i e j e n_i e n_j as concentrações das partículas. O primeiro modelo de floculação foi montado por Smoluchowski (1917) apud Thomaz et al. (1999), que, estabeleceu algumas considerações (hipóteses) como a de que o fluido está sempre em regime laminar⁸ e que o coeficiente α é igual à unidade. Smoluchowski montou a seguinte expressão (2) para a frequência de colisões na floculação ortocinética,

$$\beta = \frac{1}{6} G (d_i + d_j)^3, \quad (2)$$

onde G é o gradiente de velocidade imposto ao fluido e d (i e j) o tamanho das partículas envolvidas na colisão.

O gradiente de velocidades representa a energia que está sendo entregue as partículas e pode ser vinculado a perda de carga (hp) em reatores hidráulicos com o uso da expressão (3).

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot hp \cdot Q}{\nu \cdot V}}, \quad (3)$$

onde γ é o peso específico da massa líquida (Kgf.m^{-3}), hp é a perda de carga no reator (m.c.a), Q a vazão de alimentação ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), ν ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) a viscosidade cinemática da água e V o volume do reator (m^3).

Sendo a probabilidade de colisão entre as partículas na floculação ortocinética uma função do gradiente de velocidades e este, função da perda de carga, é de interesse, para um controle preciso da floculação, a exata determinação da perda de carga nos floculadores. Maestri (2004) deduz a equação universal de perda de carga, também conhecida como fórmula de Darcy-Weisbach (equação (4)). Esta equação considera o conceito da camada limite e é a mais indicada para problemas especiais de hidráulica.

⁸ Amirtharajah e O'melia (2000) mostram que a teoria de Smoluchowski pode ser utilizada também em escoamentos turbulentos.

$$h_p = f \frac{LU_0^2}{2gD}, \quad (4)$$

onde f é o fator de perda de carga (adimensional), L é o comprimento do conduto (m), U_0 é a velocidade média do fluxo ($m.s^{-1}$), D é o diâmetro do conduto (m) e g a aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$). O fator de perda de carga f pode ser calculado pela equação (5) de Colebrook-White, onde (e) é a rugosidade do conduto.

$$f_{i+1} = \frac{1}{4} \left[\log \left(\frac{e}{3,706.D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \right] \quad (5)$$

O número de Reynolds (Re), que aparece na equação (5) e que pode ser calculado através da equação (6), corresponde ao número adimensional que separa os escoamentos em turbulento ($Re > 4700$) e laminar (< 2100), no caso de escoamento em tubulações retilíneas. Idelchik (1986) comenta que condições de fluxo especiais (geometria do escoamento, por exemplo) podem levar a variações nos limites que separam os regimes de escoamento. Assim, pode haver turbulência em escoamento com número de Reynolds menor que 1000, ou simplesmente não haver turbulência em $Re > 2100$.

$$Re = \frac{U_0 D}{\nu}. \quad (6)$$

Para o cálculo de perdas de cargas singulares em condutos forçados, deve-se utilizar a equação (7).

$$h_{p_s} = K \frac{U_0^2}{2g}, \quad (7)$$

onde K é o coeficiente de perda de carga singular, que para problemas comuns de engenharia é de fácil determinação.

Idelchik (1996) apresenta um estudo detalhado sobre singularidades. Este autor comenta que os problemas específicos de engenharia, com geometrias complexas e sobreposição de singularidades, precisam de uma análise aprimorada para a adequada determinação do coeficiente de perda de carga singular (K).

2.3.2.2 Caracterização de flocos: resistência ao cisalhamento e dimensão fractal

Jarvis et al. (2005) reportam uma revisão sobre a resistência e o mecanismo de ruptura dos flocos onde a resistência está diretamente relacionada à quantidade e à força das ligações (pontes poliméricas) que constituem o floco. Segundo Ducoste e Clark (1998), à medida que os flocos crescem, aumenta a probabilidade de sua ruptura e o sistema em função do tempo chegará a um tamanho estável de flocos representado pela equação (8).

$$R_{floc} = \alpha R_{col} - R_{rup}, \quad (8)$$

onde R_{floc} é a razão de floculação, R_{col} é a razão de colisão entre as partículas, α é a eficiência destas colisões e R_{rup} é a razão de ruptura dos flocos. Parker et al. (1972) e Jarvis et al. (2005) comentam que o mecanismo de ruptura mais aceito para os flocos (com exceção dos flocos biológicos, flocos de sistemas de tratamento por lodos ativados) é a erosão superficial.

De acordo com Parker et al. (1972); Jarvis et al. (2005) e Li et al. (2007) a erosão superficial dos flocos é a remoção das camadas mais externas e disformes dos agregados por forças cisalhantes. Estas forças são decorrentes da dissipação viscosa de energia⁹ que ocorre na massa líquida. A equação (9) relaciona a energia dissipada ε ($m^2.s^{-3}$) e o gradiente de velocidades G (s^{-1})¹⁰.

$$\varepsilon = \nu.G^2, \quad (9)$$

Jarvis et al. (2005) e Li et al. (2007) descreveram a resistência teórica dos flocos σ ($N.m^{-2}$) como uma função da energia dissipada, das características do líquido e do tamanho

⁹ Kolmogoroff *universal equilibrium range theory*, que segundo (Parker et al., 1972) se apresenta útil na análise da ruptura dos flocos.

¹⁰ A energia dissipada e o gradiente de velocidades considerado são os médios, medidos através da perda de carga ao longo da agregação, ou seja, no reator.

estável dos flocos. Este parâmetro é definido como a força necessária para erodir um determinado volume de floco a partir do cisalhamento gerado em um plano na superfície do floco (equação (10)).

$$\sigma = 2,31 \frac{\rho \cdot \varepsilon^{3/4} d}{\nu^{1/4}} \quad (10)$$

Uma consideração importante a ser feita é a possibilidade ou não de reagregação dos flocos primários ou partículas primárias erodidas. Parker et al. (1972), citando outros autores, comentam que em alguns casos a eficiência de colisão α (equação (8)) é baixa, podendo chegar a $\alpha=0$ para ruptura irreversível.

Owen et al. (2007) mostram que os flocos gerados com polímeros flocculantes e que sofrem erosão na etapa de mistura rápida, não apresentam capacidade de reagregação quando são submetidos a agitações mais suaves (mistura lenta). Vinculam este fato à degradação do polímero pelo cisalhamento imposto e/ou a conformação inadequada do polímero na superfície do floco (formação de trens, por exemplo). Por outro lado, reportam que os coagulantes possibilitam a re-floculação, ou seja, α cresce na etapa de mistura lenta, após a ruptura na mistura rápida.

Nos últimos anos, a forma irregular dos agregados gerados nos processos de agregação vem sendo descritas em termos da dimensão fractal (Logan et al., 1996; Rajat et al., 2000; Carissimi, 2003; Jarvis et al., 2005; Li et al. 2007). Para Li et al. (2007) afirmam que a característica fractal dos flocos gerados interfere nas suas propriedades, a saber: densidade, velocidade de sedimentação, tamanho e resistência a ruptura.

Li et al. (2007) comentam que os métodos de determinação da dimensão fractal de agregados ainda não se consolidaram e que, até o momento, são realizadas medidas indiretas. Rajat et al. (2000) explicam que a dimensão fractal de duas dimensões D_2 é definida como uma lei de potências entre uma área projetada (A_s) e uma característica de comprimento do agregado (l) (equação (11)).

$$A_s \cong \sim l^{D_2} \quad (11)$$

Ainda, $D_2=2$ corresponde a agregados densos, enquanto $D_2 \ll 2$ representa agregados ramificados e com pouca resistência à erosão.

A dimensão de Minkowski ou método de Bouligand-Minkowski é um dos métodos mais consistentes para determinação da dimensão fractal D_2 (Backes e Bruno, 2005). O método baseia-se no estudo da área de influência criada pela dilatação da forma em questão por um disco de raio r , que varre os limites da forma. Uma vez encontrada a área expandida pelo disco de raio r , é lançado um gráfico log-log da área expandida $A(r)$, pelo raio do disco r . A dimensão fractal D_2 será então encontrada através da equação (12).

$$D = 2 - \alpha \quad (12)$$

onde D é a dimensão fractal e α o coeficiente angular da reta log-log de $A(r)$ por r . Cetera (1999) comenta que a determinação da dimensão fractal, pelo método de Minkowski, de uma face do fractal é uma boa aproximação à dimensão fractal das outras faces.

2.4 Reatores de coagulação - floculação hidráulicos em linha

Bratby (1980) e Ducoste e Clark (1998) publicaram que os reatores do tipo tanque agitado apresentam problemas de mistura devido ao seu padrão de fluxo (do tipo mistura completa), que acarreta em zonas mortas e zonas de descarga de alta energia (zona próximas aos rotores). A ampla aplicação destes reatores ocorre devido a facilidade de ajuste do gradiente de velocidades G (s^{-1}), conseguida com variação da velocidade de rotação do rotor (Figura 11).

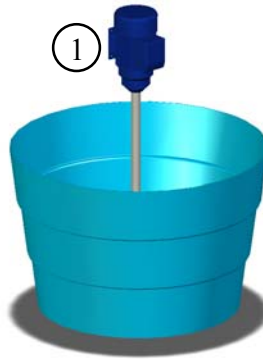


Figura 11. Reatores de agregação de tanque agitado. 1 – Motor responsável pela agitação (RPM ajustável).

Grohmann et al. (1981) comentam que para reduzir o custo de construção e operação de flocladores deve-se optar por reatores com melhor padrão de fluxo, particularmente no que diz respeito a tempo de residência e a gradiente de velocidades. Em estudos sobre novas unidades de floclação, estes autores concluíram que reatores helicoidais em linha são eficientes na agregação com tempo de residência de 14s e $G > 500 \text{ s}^{-1}$ e que diminuem em módulo a relação entre tempo de residência e gradiente de velocidades (número de Camp) quando comparados aos reatores de tanque agitado, otimizando o uso de energia na agregação.

O reator gerador de flocos – RGF[®] (Figura 12) é um reator de fluxo helicoidal que promove o crescimento de flocos e apresenta como vantagem uma possível formação de flocos aerados. Carissimi e Rubio (2005) e Rubio et al (2007) mostram alguns aspectos desse reator, que foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental – LTM, tais como: existência de correntes secundárias de fluxo (devido à torção e à curvatura do tubo – geometria helicoidal, caracterizadas pelo número de Dean (De) e número de germano (Ge)), fluxo do tipo pistão, inexistência de zonas mortas, requer pouca área em planta (compacto), não utiliza partes móveis (eixos e pás), projeto simples e reduzida necessidade de energia elétrica e mecânica.



Figura 12. Fotografia do RGF em escala de bancada, mostrando o crescimento dos flocos ao longo do seu eixo longitudinal.

Sartori (2006) modelou numericamente o RGF[®] e fez algumas considerações a respeito dos gradientes locais de velocidade no reator. Concluiu que a boa eficiência de floculação do reator pode ser vinculada a sua adequada distribuição de gradientes locais de velocidade, uma vez que os gradientes de velocidade mais elevados ($G > 10G_{\text{médio}}$) estão em uma faixa de pequena espessura próxima à parede, onde, por motivo das forças centrípetas existentes nos fluxos helicoidais, há a ocorrência de flocos menores, menos suscetíveis a ruptura.

Carissimi et al. (2007) comparou a eficiência de floculação, no que se refere à velocidade de sedimentação dos flocos, entre um reator de tanques agitado e um reator hidráulico em linha (RGF[®]). Este segundo reator mostrou velocidades de sedimentação 4 vezes maiores associado a um menor uso de energia - número de Camp 7 vezes menor .

O fluxo em elementos de geometria chicanada (serpentinada), por apresentar mudanças bruscas de sentido, imprime um grande cisalhamento à massa líquida (Idelchik, 1996). Rubio e Rosa (2004) apresentam um reator hidráulico em linha de geometria chicanada / serpentinada (Figura 13) que possui boa eficiência no tratamento de águas oleosas, o FF[®]. A eficiência do processo de agregação com este reator mostra ser função da perda de carga e da concentração de floculante utilizada, entre outras características.



Figura 13. Fotografia do reator FF[®] em operação na empresa Viamão Ltda. (DN 50mm - capacidade de tratamento de 7m³.h⁻¹). 1 – FF.

Carissimi (2007) avaliou a formação de flocos em função do tipo (precipitados de hidróxido férrico e carvão) e concentração de partículas, tipo e concentração de polímero e configuração de floculação hidráulica (uso do RGF[®] ou RGF-S – RGF[®] precedido do FF). O autor concluiu que a eficiência de floculação nestes sistemas de floculação hidráulica em linha é largamente dependente das características das partículas da suspensão (porosidade/quantidade de água presente, tamanho, etc.) e da configuração de floculação hidráulica empregada. Assim, flocos de precipitado de hidróxido férrico mostraram baixa densidade e foram formados mais eficientemente com a utilização do RGF[®] sozinho. Os flocos de carvão, por sua vez, mostraram-se mais densos, porém menores, e foram mais eficientemente gerados quando do uso do floculador RGF-S.

2.5 Colunas de flotação no tratamento de efluentes

As colunas de flotação foram desenvolvidas nos anos 60 para beneficiamento de minérios e a altura dessas células atualmente é de 15m. Finch (1994) reporta que nunca foi vinculada a eficiência de flotação com a altura da coluna e a altura de 15m foi adotada

empiricamente com a função de eliminar a preocupação com este parâmetro na fase de projeto.

Aplicações de coluna de flotação no tratamento de águas industriais para remoção de íons metálicos e matéria orgânica foram reportadas por Phillipov (2000). Este tipo de efluente possibilita a flotação com microbolhas (15-115 μm), o que aumenta a probabilidade de colisão bolha/partícula e conseqüentemente a eficiência (incluída a cinética) de separação.

A utilização de bolhas de tamanho médio (100-600 μm) aumenta a capacidade de carga de sólidos na separação sólido/líquido e disponibiliza maiores taxas de aplicação na coluna. Como desvantagem, o uso de bolhas de tamanho intermediário possibilita ruptura dos flocos devido à microturbulência gerada pela ascensão das bolhas e a não recuperação de partículas muito pequenas.

As colunas que utilizam microbolhas (FAD) têm a alimentação das bolhas em co-corrente e na metade superior da coluna devido a velocidade de ascensão das microbolhas, que varia entre 2 e 50 m.h^{-1} (velocidade calculada por Stokes). As colunas que utilizam bolhas de tamanho intermediário são operadas em contracorrente. A Figura 14 apresenta exemplos ilustrativos destes dois diferentes equipamentos de separação sólido/líquido.

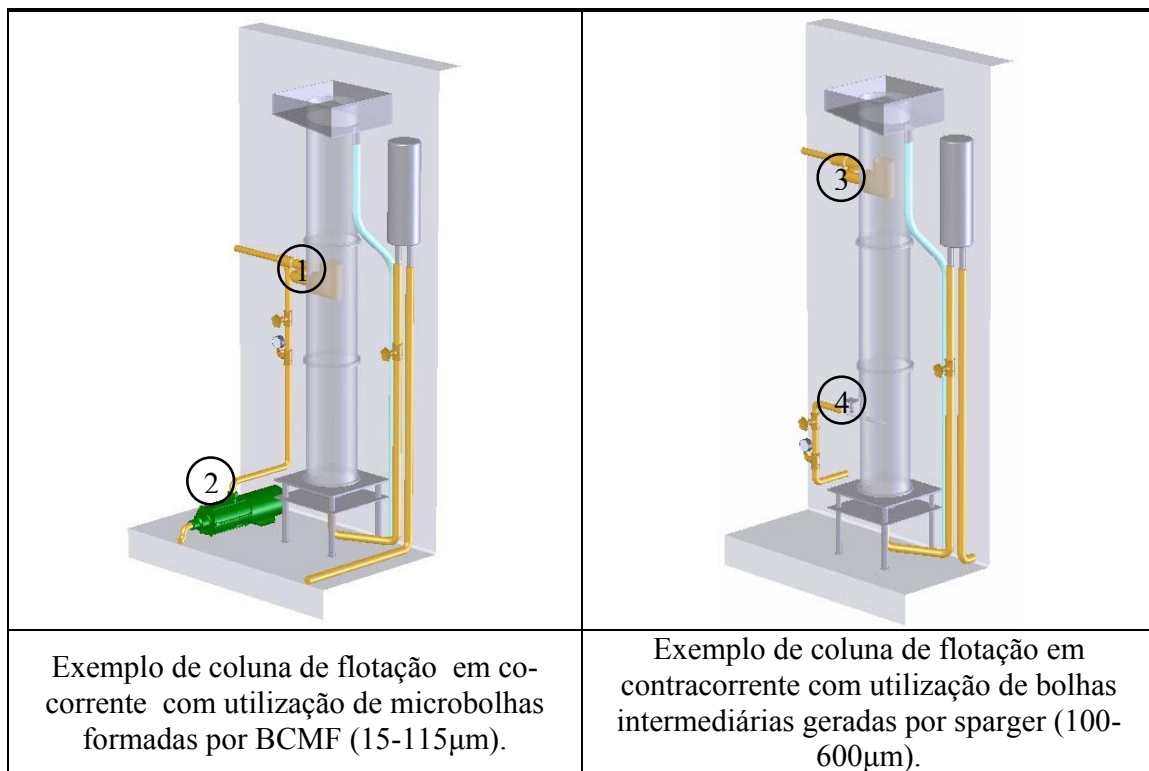


Figura 14. Colunas em co-corrente (FAD) e em contracorrente (bolhas de tamanho intermediário). 1 – Alimentação + microbolhas; 2 – BCMF; 3 – Alimentação e 4 – Entrada de bolhas de tamanho intermediário geradas por sparger.

A flotação em coluna é objeto de muitas pesquisas e interesse pela indústria, principalmente a mineral, e o número de aplicações continua crescendo (Rubio et al.; 2002). Feris et al. (2001) desenvolveram uma técnica de flotação em coluna que utiliza microbolhas e bolhas de tamanho médio em conjunto. O aumento na amplitude da DTB aparece como uma boa alternativa para o desenvolvimento das colunas de flotação, considerando o fato de que em muitos sistemas são removidas partículas de vários tamanhos.

Finch et al. (2003) reportou como vantagem das colunas de flotação um fluxo próximo ao pistonado. Este tipo de fluxo é caracterizado por um gradiente de concentração de sólidos ao longo do eixo longitudinal dos equipamentos de separação e um número de mistura no reator (N_d) próximo a zero ($N_d \rightarrow 0$). Nos reatores de mistura completa, cujo número de mistura é grande ($N_d \rightarrow \infty$), ocorre uma concentração de sólidos constante ao

longo do eixo do reator. A expressão (13) pode ser utilizada para o cálculo do N_d em colunas e relaciona o número de mistura com variáveis operacionais e de projeto.

$$N_d = 1.3 \left(\frac{D_c}{H_c} \frac{J_g}{J_l} (1 - \varepsilon_g) \right)^{0.67} \quad (13)$$

Onde D_c é o diâmetro da coluna, H_c é a altura da coluna, J_g a velocidade superficial do gás, J_l a velocidade superficial do líquido e ε_g o *hold-up* de gás. Estes parâmetros de dispersão de gás têm papel importante no escalonamento dos equipamentos, na comparação entre diferentes equipamentos e na cinética de flotação.

Os parâmetros de dispersão de gás na coluna de flotação, que aparecem no cálculo de N_d e que são utilizados nos projetos de flotação em coluna, são definidos abaixo:

- **Hold-up (%)** – corresponde a fração volumétrica ocupada por uma das três fases em um dado ponto da coluna. Assim, o *hold-up* de gás é normalmente determinado na seção de coleta e representa uma medida de quantidade de ar, expressa em percentagem do volume total ocupada pelo gás;
- **Velocidade superficial ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)**, ou relação entre a vazão volumétrica de determinada fase e a área da seção transversal da coluna, isto é, ($\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$) ou $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Esta unidade permite a comparação das variáveis operacionais entre colunas de dimensões diferentes;
- **Velocidade relativa** corresponde à velocidade resultante entre duas fases distintas. Esta velocidade é obtida pela diferença ou soma das velocidades absolutas de cada fase considerando, respectivamente, movimentos no mesmo sentido ou no sentido oposto;
- **Capacidade de carga ($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^3$)** – é a maior vazão mássica de sólidos flautada por unidade volumétrica de ar;
- **Convenção de fluxos** – são definidos como positivos os fluxos descendentes de sólido e líquido e o fluxo ascendente de ar.

Capponi et al (2006), em um estudo de flotação de precipitados coloidais (coluna de flotação de seção retangular e bolhas de tamanho médio), mostraram que a flotação de soluções diluídas ($5\text{-}20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) apresentou baixa eficiência de remoção de sólidos,

enquanto concentrações de sólidos maiores (40-340 mg.L⁻¹) foram mais eficientemente removidas. Vincularam este resultado ao pequeno tamanho dos colóides formados nas baixas concentrações de sólido e sua baixa probabilidade de coleção por bolhas de tamanho médio (100-600µm). A taxa de aplicação máxima atingida foi de 43 m.h⁻¹.

Com o uso de FAD em coluna, aplicações são reportadas na lavagem de ônibus (Carissimi, 2007) e na clarificação e polimento de efluentes de Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente – RAFA (Tessele et al., 2005).

Carissimi (2007) atingiu eficiência de remoção de turbidez superior a 90% e de cor superior a 85%. Os parâmetros de operação deste estudo piloto foram: 80 % de taxa de reciclo, 420 mg.L⁻¹ de PAC e 20 mg.L⁻¹ de polímero catiônico de alto peso molecular. A floculação foi realizada utilizando o RGF[®].

Tessele et al. (2005) removeram eficientemente sólidos suspensos (90 %), algas e fósforo (95%). Os reagentes utilizados foram um polímero de alto peso molecular [15 mg.L⁻¹], na etapa de remoção de sólidos suspensos, e o cloreto férrico [25 mg.L⁻¹] e óleo de sódio, na etapa de polimento.

Park et al (2001), utilizando uma coluna coaxial (ver Figura 14 – co-corrente) e microbolhas (FAD), avaliaram a eficiência de tratamento de um efluente sintético contendo concentração variável de sólidos totais (1000-2000 mg.L⁻¹). Reportaram que cargas de sólidos superiores a 350 Kg.m².dia⁻¹ causam distúrbios na camada de produto flotado. Em estudo piloto, com taxa de aplicação de 12 m.h⁻¹, obtiveram uma eficiência de remoção de sólidos suspensos de 90 %. Apresentaram, ainda, um estudo de simulação numérica da coluna, concluindo que em determinadas condições de operação pode ocorrer problemas de estagnação de fluxo na zona de separação e conseqüente ineficiência de separação sólido/líquido.

3 EXPERIMENTAL

3.1 Materiais

3.1.1 Água residuária de lavagem de veículos

A água bruta estudada consistiu da mistura das águas residuárias do ponto de lavagem manual e do ponto de lavagem mecanizada do processo de lavagem dos ônibus da Empresa de Transportes Coletivos Viamão Ltda. Os volumes destas águas no sistema foram descritos na Tabela 7 (balanço hídrico do sistema). Entretanto, a proporção com que estas afluíam ao tanque de equalização variava com os horários do dia, uma vez que durante a manhã muitos ônibus passam no sistema mecanizado e ao longo do dia, horário comercial, o fluxo de lavagem é maior na lavagem manual.

3.1.2 Reagentes

Os reagentes empregados nos estudos iniciais de floculação em teste de jarros foram os seguintes:

1. Mafloc 460 C, polímero orgânico-catiônico de médio peso molecular;
2. Mafloc 2880 A, polímero-orgânico aniônico de alto peso molecular;
3. FL 7011 polímero orgânico-catiônico de alto peso molecular, fornecido pela empresa SNF/Floerger[®] do Brasil LTDA;
4. Aquafloc AL, polímero orgânico-catiônico biodegradável de baixo peso molecular que atua como coagulante/floculante fornecido pela empresa Aquafloc LTDA;
5. PANFLOC[®]TE 1018 coagulante/floculante inorgânico fornecido pela Pan-America S/A – indústria química;
6. Soda comercial para ajuste de pH.

3.1.3 Equipamentos

O estudo foi desenvolvido junto ao processo de lavagem e tratamento para reciclo de água residuária em operação na empresa, o qual já contemplava a drenagem/captação da água residuária dos dois pontos de lavagem e encaminhamento ao tanque de equalização e à estação de tratamento. Paralelamente à estação de tratamento existente, foi instalado o sistema Floculação-Flotação em Coluna – FFC – em escala piloto (aproximadamente $1\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ – Figura 15). Este sistema contínuo foi constituído de várias unidades, como apresentado a seguir.

o

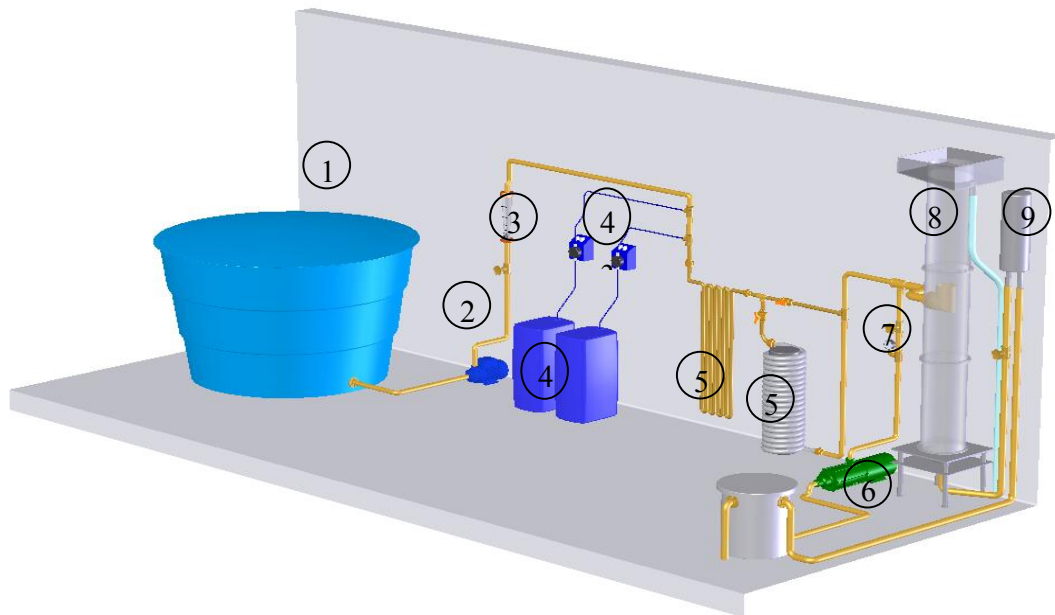


Figura 15. Esquema ilustrativo do sistema FFC. 1 – Reservatório de água residuária, 2 – bomba centrífuga, 3 – rotâmetro de água, 4 – bombas dosadoras e tanques de reagentes, 5 – SR 1 – Serpentina rápida 1 e RGF – Reator gerador de flocos, 6 – bomba centrífuga multifase, 7 – válvula agulha e manômetro de pressão, 8 – coluna de flotação e 9 – controle de nível da coluna.

Bomba de alimentação

- Bomba centrífuga marca KSB, modelo Hydrobloc C.

Unidade de preparo e dosagem dos reagentes

- Duas bombas dosadoras marca Accu-PulseTM, modelo AP44/AS;
- Dois tanques de 10L de polipropileno;
- Mangueira 6409-13, marca Tygon[®], de 6mm.

Unidade de floculação hidráulica em linha

O desenho técnico dos floculadores é apresentado no apêndice A.

- Reator Gerador de Flocos (RGF[®]) de geometria helicoidal construído com um tubo de poliuretano marca Goodyear, modelo Spiraflex[®] de 1” e 12m de comprimento. A razão entre o diâmetro do tubo e o diâmetro do helicóide foi mantida em 1/8, conexões em PVC Tigre[®];
- Um misturador estático em linha de geometria chicanada utilizado como agitador rápido - SR 1 - construído em tubo de PVC Tigre[®] DN 25mm. Este reator foi constituído de 8 elementos verticais dispostos paralelamente. O comprimento de cada elemento foi de 0,87m. Ainda, para fabricação do SR 1 foram utilizados 16 joelhos de 90° DN 25mm em PVC Tigre[®];
- Um misturador estático em linha de geometria chicanada utilizado como agitador rápido - SR 2 - construído em tubo de PVC Tigre[®] DN 32mm. Este reator foi constituído de 10 elementos verticais dispostos paralelamente. O comprimento de cada elemento foi de 0,82m. Ainda, para fabricação do SR 2 foram utilizados 20 joelhos de 90° DN 25mm em PVC Tigre[®];
- Um misturador estático em linha de geometria chicanada utilizado como agitador lento - SL 1 - construído em tubo de PVC Tigre[®] DN 50mm. Este reator foi constituído de 12 elementos verticais dispostos paralelamente. O comprimento de cada elemento foi de 2,07m. Ainda, para fabricação do SL 1 foram utilizados 24 joelhos de 90° em PVC Tigre[®] DN 50mm.

Unidade de saturação de ar em água e geração de microbolhas

- Um compressor de ar Primax, modelo 52530.V.680;

- Uma Bomba Centrífuga Multifase (BCMF) marca Edur[®], modelo EB3u;
- Um sistema de filtro de ar e regulador de pressão (0 a 7Kgf.cm⁻²);
- Uma válvula agulha de 1”.

Unidade de separação sólido/líquido

O desenho técnico dos módulos constituintes da coluna de flotação é apresentado no Apêndice B.

- Quatro módulos cilíndricos em acrílico (espessura de 3mm) de 0,60 m de comprimento e 0,24m de diâmetro;
- Um módulo cilíndrico em acrílico (espessura de 3mm) de 0,60m de comprimento e 0,24m de diâmetro com adaptação para alimentação;
- Um módulo cilíndrico em acrílico (espessura de 3 mm) de 0,60m de comprimento e 0,24m de diâmetro com adaptação para coleta do produto flotado (calha);
- Uma redução (240 x 75mm) em acrílico cônica;
- Dois direcionadores de fluxo de placas paralelas constituídos de 11 placas de 0,25m de altura, 1mm de espessura e largura variável radialmente de acordo com o diâmetro da coluna (ver Figura 16);
- Dois tubos de ascensão externos à coluna (ver Figura 17). Um em PVC DN 110mm e 2m de comprimento e um em poliuretano marca Goodyear, modelo spiraflex 1^{1/2}”, e 2,5m de comprimento.



Figura 16. Direcionador de fluxo de placas paralelas instalado na saída da corrente de água tratada da coluna de flotação.

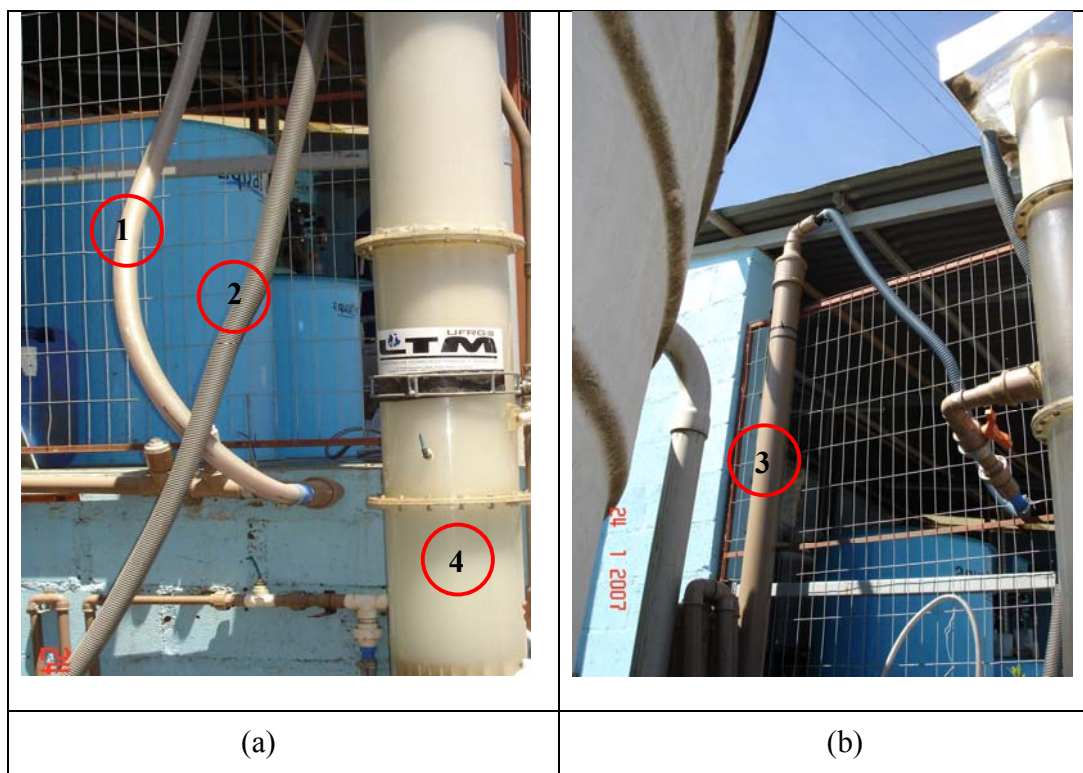


Figura 17. Tubos de ascensão externos à coluna de flotação. (a) Coluna com zona de contato bolha/partícula rápida (1 – Tubo de ascensão de 1^{1/2}”; 2 – Tubo de descarga de água tratada); (b) Coluna com zona de contato bolha/partícula lenta (3 – Tubo de ascensão DN 110mm; 4 – Alimentação da coluna).

Instrumentação e controle

- Um medidor de pressão manométrica instalado imediatamente antes da válvula agulha;
- Dois rotômetros em acrílico marca Applitech, modelo AP-7000 SSG, para medição de vazão de água bruta e de corrente de reciclo. Um instalado após a bomba de alimentação e um instalado após a bomba Edur[®];
- Rotômetro de ar marca Omel instalado na linha de ar comprimido da empresa Viamão Ltda., que supria o sistema com ar comprimido (a injeção ocorria no ramal de sucção da bomba Edur[®]).

3.2 Métodos

3.2.1 Estudos de floculação-flotação em coluna

Foram realizados estudos de desenvolvimento do sistema FFC através da variação das características das unidades de floculação hidráulica em linha e de separação sólido/líquido em coluna de flotação. Manteve-se constante as características da unidade de geração de microbolhas (Tabela 13) e a concentração de floculante (Aquaflot AL, entre 150-700mg.L⁻¹) não foi estudada, variando em função das características da água bruta.

Tabela 13. Parâmetros operacionais na geração das microbolhas.

Parâmetro	Valores
Vazão de reciclo, % da alimentação	30
Pressão de saturação, Kgf.cm ⁻²	4,5
Volume de ar injetado, mL.L ⁻¹	480
Ar dissolvido (Henry), mL.L ⁻¹	80
Excesso de ar, mL.L ⁻¹	400

O tempo de duração dos ensaios foi de duas horas com amostragens em intervalos de 15 minutos. Todos os ensaios foram repetidos em dias diferentes, visando analisar a reprodutividade dos mesmos. Os equipamentos utilizados nestes estudos são apresentados na Figura 18.

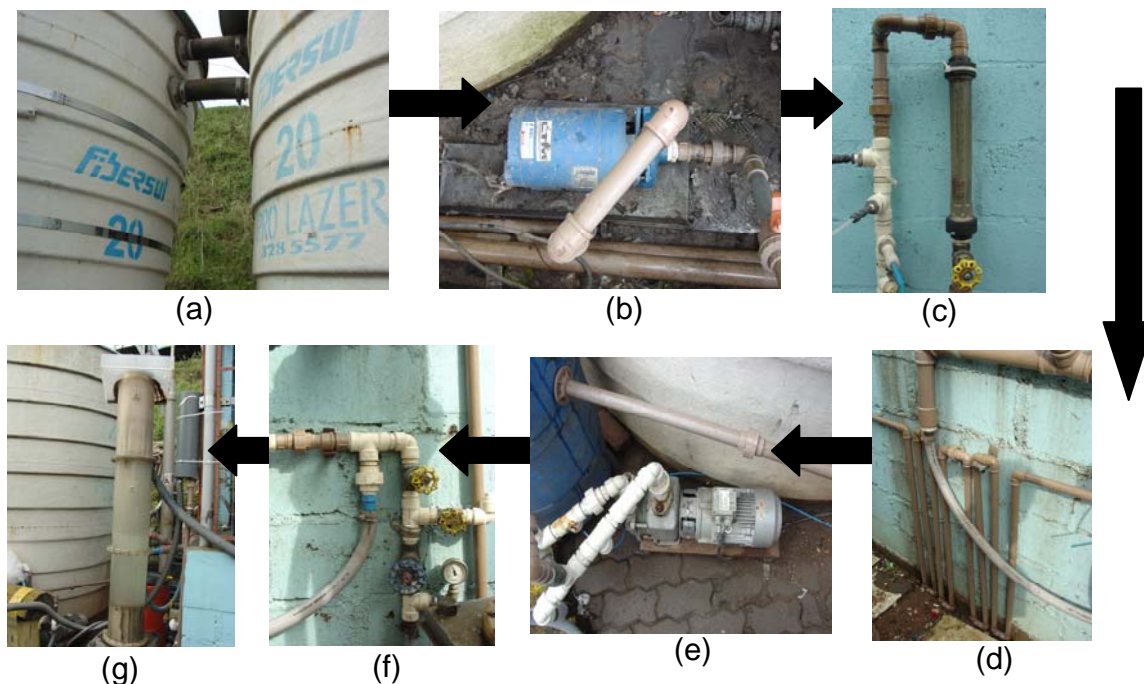


Figura 18. Materiais e equipamentos utilizados nos estudos de Floculação-Flotação em Coluna - FFC: (a) caixas de armazenamento da água residuária; (b) bomba de alimentação do sistema FFC; (c) injeção dos reagentes na linha e rotômetro para medição da vazão de alimentação; (d) SR 1 (uma das condições de floculação utilizada); (e) bomba centrífuga multifase Edur[®]; (f) instrumentação para controle da pressurização (válvula agulha e manômetro) da corrente de água de reciclo e (g) coluna de flotação.

Uma vez que a coluna era preenchida com água nova no início de cada ensaio, esperava-se o tempo necessário à estabilização do sistema (aproximadamente 15-20 minutos) para se realizar a coleta da amostra correspondente ao minuto zero. A partir desta amostra, realizava-se a coleta das demais amostras e foi selecionado o tempo de 45 minutos como o tempo de estabilização do ensaio.

A água tratada foi caracterizada em função de sua turbidez, cor, tensão superficial, pH e condutividade. As análises foram sempre realizadas nas 48 horas posteriores à amostragem e tanto a condutividade como o pH foram analisados imediatamente após a amostragem.

Na análise estatística dos dados foram considerados somente os resultados da análise das amostras correspondentes ao minuto 45 e conseguintes, devido à falta de estabilização do ensaio. A metodologia utilizada foi a de comparação de variâncias (ANOVA).

3.2.2 Estudos de floculação hidráulica em linha

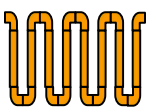
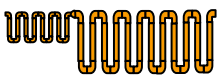

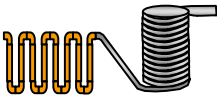
A vazão de alimentação dos flocladores foi constante em $1,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ($18 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), o que acarretou em uma taxa de aplicação de $25 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ na coluna de flotação (neste estudo com 3,6m de altura). Foram testadas, conforme ilustrado na Tabela 14, quatro diferentes condições de floculação: RGF-S, RGF, SR 1 e SR 1 + SL 1. Buscou-se avaliar o efeito do uso de mistura rápida e mistura lenta. Por exemplo, no caso do RGF-S a serpentina SR 1 funcionou como misturador rápido e o RGF como misturador lento e na configuração SR 1 + SL 1 o reator utilizado como misturador lento foi o SL 1 (floclador do tipo FF com gradiente de velocidades bastante reduzido ($\sim 50 \text{ s}^{-1}$)).

A Tabela 14 apresenta as características hidráulicas das diferentes condições de floculação estudadas. A perda de carga nos reatores chicanados foi estimada utilizando as equações (4), (5), (6) e (7) e considerando a rugosidade da tubulação, em PVC, como sendo zero ($e = 0$).

A Tabela 14 apresenta as características hidráulicas das diferentes condições de floculação estudadas. A perda de carga nos reatores chicanados foi estimada utilizando as equações (4), (5), (6) e (7) e considerando a rugosidade da tubulação, em PVC, como sendo zero ($e = 0$).

Na determinação da perda de carga do RGF, utilizou-se dados experimentais de Carissimi e Rubio (2003). De posse da perda de carga nos reatores, utilizou-se a expressão (3) na determinação do gradiente de velocidades ($G, \text{ s}^{-1}$).

Tabela 14. Características hidráulicas dos reatores empregados.

CONFIGURAÇÃO TESTADA	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS
SR 1* 	Número de elementos : 8 Diâmetro nominal do tubo (mm) : 25 Comprimento elementos (m) : 0,87 Comprimento total (m) : 7	Volume (m³) : $3,2 \times 10^{-3}$ Velocidade (m.s⁻¹) : 0,85 Tempo de retenção (s) : 10 Perda de carga (m) : 1,23 Gradiente de velocidade (s⁻¹): 1025 Número de Camp (GxTr) : 10250
SR 1 + SL 1 	Número de elementos: 20 Diâmetro nominal do tubo SR 1 (mm): 25 Diâmetro nominal do tubo SL 1 (mm): 50 Comprimento dos elementos (m): 2,94 Comprimento total (m): 31,8	Volume (m³) : $8,0 \times 10^{-3}$ Velocidade (m.s⁻¹) SR 1: 0,85 Velocidade (m.s⁻¹) SL 1: 0,21 Tempo de retenção (s) : 10(SR 1) + 150(SL 1) Perda de carga (m): 1,63 Gradiente de velocidade (s⁻¹) SR 1: 1025 Gradiente de velocidade (s⁻¹) SL 1: 50 Número de Camp (GxTr) SR 1: 10250 Número de Camp (GxTr) SL 1: 7500 Número de Camp total: 17750
RGF 	Número de elementos : 19 Diâmetro nominal do tubo (mm) : 25,4 Comprimento dos elementos (m) : 0,64 Comprimento total (m) : 12	Volume (m³) : $6,1 \times 10^{-3}$ Velocidade (m.s⁻¹) : 0,82 Tempo de retenção (s) : 15 Perda de carga (m) : 2,5 Gradiente de velocidade (s⁻¹): 1350 Número de Camp (GxTr) : 20250
RGF-S 	Número de elementos : 27 Diâmetro nominal do tubo S1 (mm) : 25 Diâmetro nominal do tubo RGF (mm): 25,4 Comprimento dos elementos (m) : 1,51 Comprimento total (m) : 19	Volume (m³): $9,3 \times 10^{-3}$ Velocidade (m.s⁻¹) SR 1: 0,85 Velocidade (m.s⁻¹) RGF: 0,82 Tempo de retenção (s): 25 Perda de carga (m): 3,73 Gradiente de velocidade (s⁻¹) SR 1: 1025 Gradiente de velocidade (s⁻¹) RGF: 1350 Número de Camp (GxTr) SR 1: 10250 Número de Camp (GxTr) RGF: 20250 Número de Camp total: 30500

*SR 1 – mesmo reator utilizado como misturador rápido do sistema ETAR.

3.2.3 Estudos de variação da zona de contato bolha/partícula

Foram estudadas duas diferentes condições hidrodinâmicas na zona de contato microbolhas/partículas: uma rápida (tubo de 50 mm) e uma lenta (tubo de 110 mm) - ver características hidráulicas e hidrodinâmicas na Tabela 15. A vazão de alimentação dos tubos foi constante em $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, sendo $1,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a alimentação do sistema e $0,37 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ o reciclo. Ainda, as duas diferentes condições hidrodinâmicas na zona de contato microbolhas/partículas foram estudadas em função das quatro diferentes condições de floculação hidráulica em linha (SR 1; SR 1 + SL 1; RGF e RGF-S).

Tabela 15. Características hidráulicas e hidrodinâmicas dos tubos de ascensão (zona de contato bolha/partícula).

Ø interno do tubo de ascensão	Vazão de alimentação, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Velocidade superficial, $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	Re, adimensional	Tempo de residência, min
50 mm	1,5	864	11881	0,14
100 mm	1,5	176	4839	0,7

3.2.4 Estudos de variação de taxa de aplicação na coluna de flotação

Neste estudo, a altura da coluna de flotação foi mantida em 3,6m, o tubo de ascensão utilizado foi o de 50mm e a vazão de água bruta afluyente ao sistema foi de $1,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ nas taxas de aplicação de 9, 18 e $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na taxa de aplicação de $33 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Os floculadores utilizados foram o SR 1 para as taxas de 9, 18 e $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e o SR 2 para a taxa de $33 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Ainda, nas taxas de 9 e $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ foi necessário instalar um *by-pass* anteriormente a coluna, visto que a unidade de floculação recebeu sempre uma vazão de $1,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, vazão esta que somada aos 30% de reciclo representa uma taxa de aplicação na coluna de flotação de $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. As características hidráulicas da coluna são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16. Características construtivas e hidráulicas da coluna de flotação.

Alimentação $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$	Taxa de aplicação, $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$	Velocidade superficial, $\text{m}.\text{h}^{-1}$	Tempo de residência, min	Volume, m^3
0,5	9	11	17	0,144
1	18	24	8	0,144
1,5	25	33	6	0,144
2,0	33	43	4	0,144

3.2.5 Estudos de variação da altura da coluna de flotação

O floculador utilizado foi o SR 1, o tubo de ascensão utilizado foi o de 50mm (ascensão rápida) e a taxa de aplicação empregada na coluna de flotação foi a de $25\text{m}.\text{h}^{-1}$.

A altura da coluna foi modificada com a alteração do número de módulos constituintes, sendo que o módulo com a adaptação para entrada da alimentação e o módulo que possui a canaleta para coleta do lodo sempre foram utilizados. A maior altura estudada foi a de 3,6m e a menor a de 1,8m. As características hidráulicas e construtivas da coluna são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17. Características construtivas e hidráulicas da coluna de flotação.

Número de módulos	Área seção transversal, m^2	Velocidade superficial, $\text{m}.\text{h}^{-1}$	Altura da coluna, m	Volume, m^3	Tempo de residência, min
3	0,04	37,5	1,8	0,68	2,9
4	0,04	37,5	2,4	0,908	3,8
5	0,04	37,5	3,0	1,138	4,8
6	0,04	37,5	3,6	1,366	5,8

A Tabela 18 apresenta os valores de velocidade superficial do líquido (J_l), de velocidade superficial do gás (J_g), do hold-up do gás (ϵ_g) e do número de mistura na coluna de flotação (N_d) em função da altura da coluna de flotação (Equação 13). Estes valores foram estimados definindo a vazão de ar (e conseqüente volume) como sendo a que ingressa na coluna junto com a corrente de reciclo (ver Tabela 13 item 3.2.1).

Segundo Filippov (2000), a velocidade superficial do gás varia gradualmente com a vazão de reciclo e dispositivo usado na geração de bolhas. Neste estudo, não se alterou a vazão de reciclo e o dispositivo de geração de bolhas, assim, foi estimado um mesmo J_g

nas diferentes alturas de coluna estudadas. Também um mesmo hold-up do gás foi estimado para as diferentes alturas de coluna devido à baixa mudança de concentração de sólidos totais no efluente. Banisi et al (1995a,b) mostram que o hold-up pode sofrer interferência da concentração de sólidos se está variar consideravelmente alterando a viscosidade da solução.

Tabela 18. Parâmetros de dispersão de gás na coluna e do número de mistura.

Altura da coluna (m)	ϵ_g (%)	J_g	J_l	N_d
3,6	10	1,2	25	0,019
3,0	10	1,2	25	0,022
2,4	10	1,2	25	0,026
1,8	10	1,2	25	0,032

3.2.6 Estudos com flocos aerados

O estudo com flocos aerados foi realizado em regime contínuo na unidade piloto instalada na empresa de transportes coletivo e nas seguintes condição de floculação: vazão de efluente fixada em $1,1\text{m}^3.\text{h}^{-1}$; vazão de reciclo fixada em 30% da vazão de alimentação; condições de geração de microbolhas fixadas segundo Tabela 13 (item 3.2.1); floculador SR 1 ($G=1000\text{ s}^{-1}$ e $Tr=10\text{ s}$); floculante Aquafloc SL nas concentrações de 300 e 700 mg.L^{-1} ; temperatura ambiente e pH $7\pm 0,6$.

A água utilizada foi a água bruta afluenta ao sistema de tratamento (mesma água utilizada nos demais estudos). Utilizou-se uma coluna em escala de bancada para separação sólido/líquido e uma célula de ascensão para visualização de forma individualizada dos flocos (Carissimi; 2003). A célula de ascensão é apresentada na Figura 19.

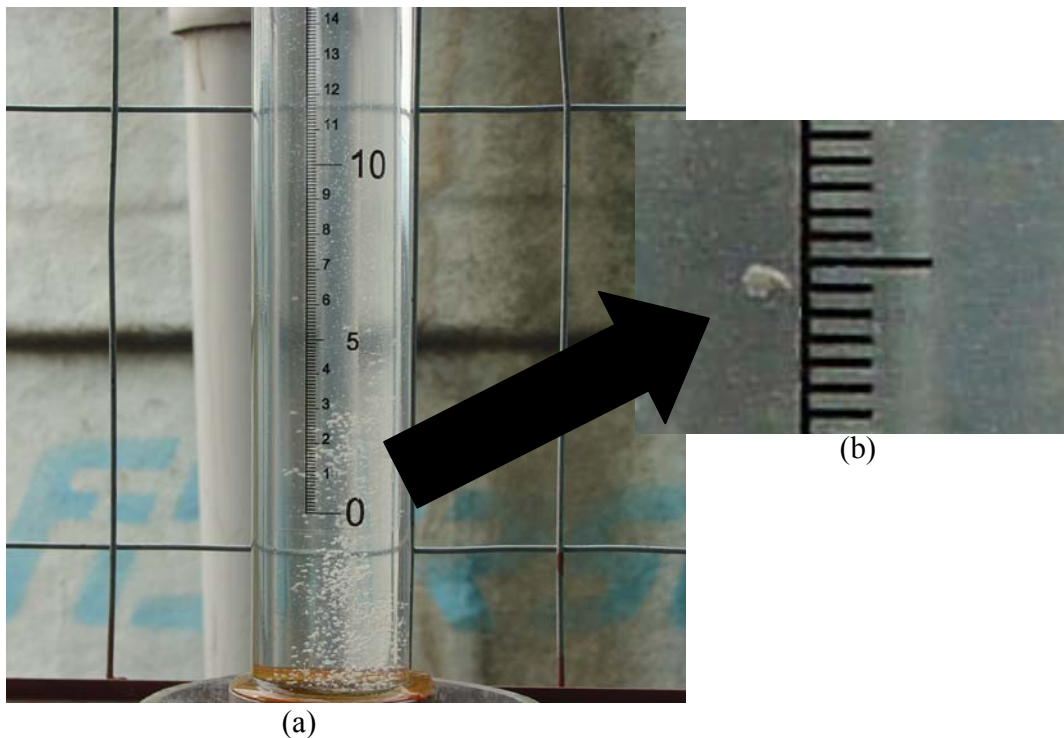


Figura 19. (a) Célula de ascensão e (b) Floco visualizado individualmente.

Foram analisadas o tamanho, a resistência teórica, a dimensão fractal e a velocidade de ascensão dos flocos. Na estimativa da velocidade de ascensão, foi registrado o tempo necessário para que os flocos percorressem a distância de 0,1 m, anotada na escala fixada a célula de ascensão (Figura 12). O tamanho e a dimensão fractal foram determinados através de análise de imagens. As fotografias foram ampliadas até a perfeita visualização dos pixels limites da figura dos flocos. Utilizou-se o software de tratamento de imagens FreeHand MX, numa plataforma Macintosh e o tamanho dos flocos foi calculado como sendo o diâmetro de um círculo de área equivalente à área da figura dos flocos. A calibração do modelo foi realizada com o uso da escala graduada fixada à célula de ascensão (Figura 19 a e b). Ainda, a determinação do tamanho dos flocos viabilizou o cálculo da resistência teórica dos flocos com o uso da equação (10).

A dimensão fractal D_2 dos flocos foi calculada pelo método de Boulingand-Minkowski. Foram analisados individualmente 10 flocos. Para cada floco, utilizaram-se três diferentes raios r , resultando em três diferentes áreas expandidas $A(r)$. A Figura 20 ilustra o procedimento realizado.

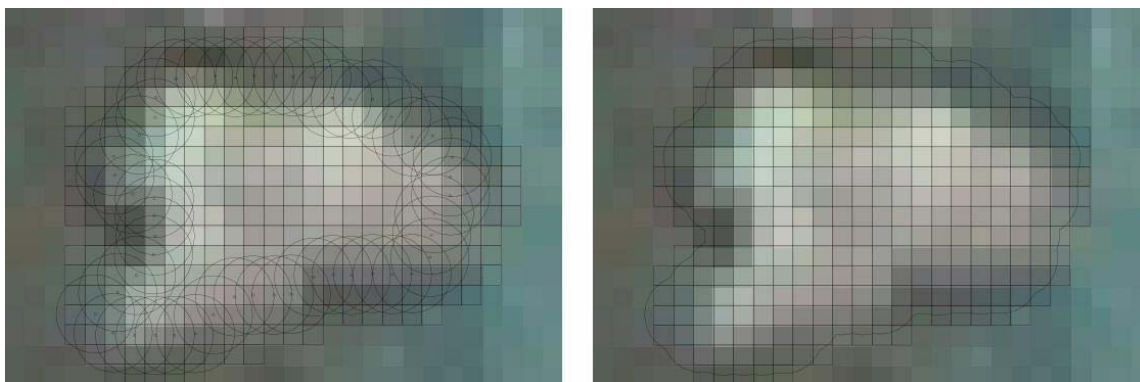


Figura 20. Procedimento de análise de imagens no FreeHand MX para determinação de dimensão fractal D_2 e de tamanho de floco.

3.2.7 Análises

A turbidez das diferentes águas foi analisada com um turbidímetro da marca Hach modelo 2100N (este equipamento utiliza o princípio da nefelometria). Os resultados são expressos em NTU (unidades nefelométricas de turbidez).

A cor aparente foi analisada em um equipamento de absorção molecular Merck modelo SQ 118 e os resultados expressos em unidades Hazen de cor.

As análises de sólidos totais foram realizadas de acordo com o princípio de evaporação da amostra a $103-105^{\circ}\text{C}$ e pesada em béquer até constância da massa.

A análise de sólidos suspensos corresponde à fração remanescente em filtro com porosidade de $1,2\mu\text{m}$ (marca Schleicher e Schuell). A concentração de sólidos dissolvidos foi obtida pela diferença entre a concentração de sólidos totais e sólidos suspensos. Todos os resultados de sólidos foram expressos em mg.L^{-1} .

A determinação da condutividade elétrica foi realizada utilizando analisador de condutividade Digimed modelo DM-31, cujo resultado é expresso em $\mu\text{S.cm}^{-1}$ a $25\pm 4^{\circ}\text{C}$.

A dureza total foi determinada através do método titulométrico com EDTA, e o resultado expresso em mg.L^{-1} de CaCO_3 .

A tensão superficial foi determinada através do tensiômetro dinâmico NIMA, modelo – DST 9005 e os resultados expressos em mN.m^{-1} .

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada utilizando analisador de tamanho de partículas a laser marca Cilas, modelo 1064.

A medida do potencial zeta foi determinada pelo medidor de potencial zeta marca Zetaplus Brookhaven Instruments Corporation, modelo 500.

A análise de DQO foi realizada seguindo o método indicado pelo Standard Methods for Water and Wastewater Examination (APHA, 1996) e os resultado expressos em mg de O_2 consumidos por litro de água.

Para determinação química de íons ferro e manganês nas amostras, utilizou-se um espectrofotômetro de absorção atômica Varian modelo SpectrAA 110. Os resultados são expressos em mg.L^{-1} .

O Carbono Total - CT e o Carbono Orgânico Total – COT foram medidos através da oxidação do carbono a CO_2 com persulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) sob energia de uma fonte de UV. Para medida do COT, o Carbono Inorgânico - CI é eliminado pela acidificação ($\text{pH}\sim 2$) e pelo borbulhamento da amostra com gás de arraste (O_2). O equipamento utilizado foi o *Benchtop Start TOC semi-automatic*, marca *Start instruments, Inc*.

A análise de óleos e graxas foi realizada com o uso do método de gravimetria-partição no laboratório de análises químicas Laborquímica. Os resultados são apresentados em mg.L^{-1} e o limite de detecção foi de 5 mg.L^{-1} .

3.2.8 Ensaio de validação

Com os parâmetros do sistema FFC otimizados através da análise estatística dos resultados obtidos nos estudos de tratamento da água residuária, foram realizados estudos de validação de 4h de duração. A amostragem foi realizada com intervalo de 30 minutos.

Nestes ensaios foram realizadas análises da água tratada complementares àquelas realizadas nos estudos anteriores: Sólidos totais, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, DQO, COT, metais e óleos e graxas. Ainda, realizou-se a medição do split¹¹ e da concentração de sólidos no produto flotado. Os resultados obtidos com o sistema FFC foram comparados com os obtidos com o sistema ETAR no tratamento da mesma água residuária (amostragem para análise da água tratada realizada no mesmo dia).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este é um estudo aplicado realizado em campo e com efluente real e, desta forma, deve-se considerar, na discussão dos resultados, além da eficiência de tratamento do sistema FFC, as variações de característica da água a ser tratada (água bruta).

4.1 Caracterização das águas do sistema de lavagem estudado

A caracterização das diferentes águas do processo de lavagem de ônibus da empresa Viamão Ltda. foi realizada ao longo de 6 meses totalizando 26 amostras e os resultados são mostrados nas Tabelas de 19 a 24. Os resultados são apresentados em termos de valores mínimos, máximos e médios devido a grande variação encontrada nos parâmetros analisados.

¹¹ Polpa do material flotado, material que transborda no topo da coluna. Corresponde à polpa encaminhada ao leito de secagem.

Tabela 19. Caracterização da água bruta (água do tanque de equalização) afluyente ao tratamento.

Parâmetro	Mínimo	Média*	Máximo
pH	6,4	7±0,2	7,8
Turbidez, NTU	30	139±45	331
Cor, Hz	73	217±35	372
Dureza total, mg.L ⁻¹ de CaCO ₃	102	168	207
Tensão Superficial, mN.m	27	31±1	36
Condutividade, uS.cma ⁻¹	297	446	522
Sólidos totais, mg.L ⁻¹	474	543±25	776
Sólidos Dissolvidos, mg.L ⁻¹	303	452±30	769
Sólidos Suspensos, mg.L ⁻¹	7	112±21	231

*Média ± ½ do desvio padrão.

Tabela 20. Caracterização da água residuária da lavagem manual.

Parâmetro	Mínimo	Média*	Máximo
pH	6,6	7±0,2	7,2
Turbidez, NTU	59	199±30	370
Cor, Hz	75	262±25	440
Tensão Superficial, mN.m	28	28±2	29
Condutividade, uS.cma ⁻¹	492	513	530
Sólidos totais, mg.L ⁻¹	455	692±42	1.012
Sólidos dissolvidos, mg.L ⁻¹	408	480±20	534
Sólidos suspensos, mg.L ⁻¹	28	212±40	519

*Média ± ½ do desvio padrão.

Tabela 21. Caracterização da água residuária da lavagem mecânica (*Roll-over*).

Parâmetro	Mínimo	Média*	Máximo
pH	6,7	7±0,2	7,6
Turbidez, NTU	7	39±7	70
Cor, Hz	70	122±17	200
Tensão Superficial, mN.m	32	38±2	43
Condutividade, uS.cma ⁻¹	431	528	590
Sólidos totais, mg.L ⁻¹	412	497±16	551
Sólidos dissolvidos, mg.L ⁻¹	285	432±17	483
Sólidos suspensos, mg.L ⁻¹	20	64±9	127

*Média ± ½ do desvio padrão.

Conforme observado em outros trabalhos (U.S. EPA (1999) apud Magalhães (2003)), a maior concentração de poluentes encontrada no ponto de lavagem manual acontece por motivo do enxágüe das partes mecânicas (motor) e do chassi. Ainda, neste ponto é feita a lavagem interna e das rodas dos ônibus, que é realizada com o uso de xampu, desengraxante e detergente ácido. Esta água alimenta os tanques de equalização onde é misturada com a água da lavagem mecanizada em diferentes proporções ao longo do dia, sendo função da demanda (ônibus a serem lavados) em cada ponto de lavagem.

Tabela 22. Caracterização da água tratada pelo sistema ETAR[®].

Parâmetro	Mínimo	Média*	Máximo
pH	6,8	7±0,2	7,3
Turbidez, NTU	4,3	22±7	254
Cor, Hz	25,5	91±9	310
Tensão Superficial, mN.m	27,7	35±2	41
Condutividade, uS.cma ⁻¹	431	514	570
Sólidos totais, mg.L ⁻¹	331	453±34	576
Sólidos dissolvidos, mg.L ⁻¹	307	432±31	520
Sólidos suspensos, mg.L ⁻¹	ND	16±10	37,5

*Média ± ½ do desvio padrão.

A resolução nº 54 (CNRH, 2005) define diretrizes e critérios para o reúso de água e determina que a água de reúso deve ter somente a qualidade exigida pela atividade a que se destina. Entretanto, não existem parâmetros e legislações específicas para a reciclagem de água na lavagem de veículos e as empresas (como a Viamão Ltda.) de transportes reaproveitam as águas tratadas (sistema ETAR por exemplo) por considerá-la com qualidade satisfatória para atividade de lavagem de ônibus.

Tabela 23. Caracterização da água da cisterna.

Parâmetro	Mínimo	Média*	Máximo
pH	6,8	7±0,2	7,1
Turbidez, NTU	8	17±5	36
Cor, Hz	46	78±12	122
Tensão Superficial, mN.m	33	37±1	42
Condutividade, uS.cma ⁻¹	476	502	522
Sólidos totais, mg.L ⁻¹	398	450±24	560
Sólidos dissolvidos, mg.L ⁻¹	387	441±23	543
Sólidos suspensos, mg.L ⁻¹	ND	9±4	25

*Média ± 1 desvio padrão

Tabela 24. Caracterização da água do poço.

Parâmetro	Mínimo	Média*	Máximo
pH	7	7±0,1	7,2
Turbidez, NTU	0	0	2
Cor, Hz	0	6±1	49
Tensão Superficial, mN.m	64	70±2	72
Condutividade, uS.cma ⁻¹	374	398	416
Sólidos totais, mg.L ⁻¹	149	322±27	798
Sólidos dissolvidos, mg.L ⁻¹	150	315±27	782
Sólidos suspensos, mg.L ⁻¹	ND	3±2	16

*Média ± 1 desvio padrão

A água da cisterna é a água efetivamente utilizada na lavagem e apresenta (Tabela 23) uma menor variação dos parâmetros analisados do que a água coletada na saída do tratamento. Este resultado pode ser vinculado ao uso do filtro de areia pós-tratamento, que funciona como barreira para instabilidades ou descuidos na operação do sistema ETAR.

A caracterização da água do poço (Tabela 24), utilizada para lavagem interna dos ônibus na vazão de $63,5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, demonstrou que esta água possui boa qualidade. No sistema de reúso da empresa Viamão Ltda., esta água é uma das responsáveis pela diluição dos sólidos dissolvidos, uma vez que a sua concentração de sólidos dissolvidos é inferior a da água de reúso e inferior a da água residuária do processo.

Segundo Teixeira (2003), Morelli (2005) e Metcalf & Eddy (2007), os sólidos dissolvidos e a elevada condutividade associada constituem problemas na reciclagem de água de lavagem de veículos. Na Tabela 25, são apresentadas as concentrações destes parâmetros nas diferentes águas do sistema. Os resultados mostram que a maior carga de sólidos dissolvidos (e de condutividade) é provenientes do ponto de lavagem manual.

Tabela 25. Concentração de sólidos dissolvidos e valores de condutividade nas diferentes águas do sistema de reúso de água de lavagem dos ônibus da Empresa Viamão.

	Sólidos dissolvidos, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Condutividade, $\mu\text{Scm} \cdot \text{a}^{-1}$
Lavagem automatizada	432	528
Cisterna	441	502
Água bruta	454	513
ETAR	432	514
Lavagem manual	480	513
Poço	315	398

As Figuras 21 e 22 apresentam, respectivamente, a curva potencial zeta/pH e a distribuição do tamanho de partículas presentes na água bruta do processo de lavagem. Os resultados mostram que as partículas do efluente apresentam carga superficial negativa em toda a faixa de pH e que possuem um diâmetro médio de $6,3 \mu\text{m}$, sendo que 100% é menor que $31 \mu\text{m}$.

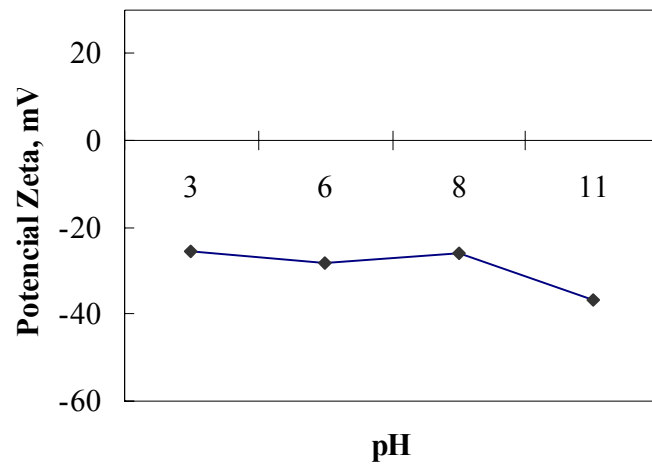


Figura 21. Potencial zeta das partículas em suspensão, na água afluyente ao tratamento, em função do pH do meio.

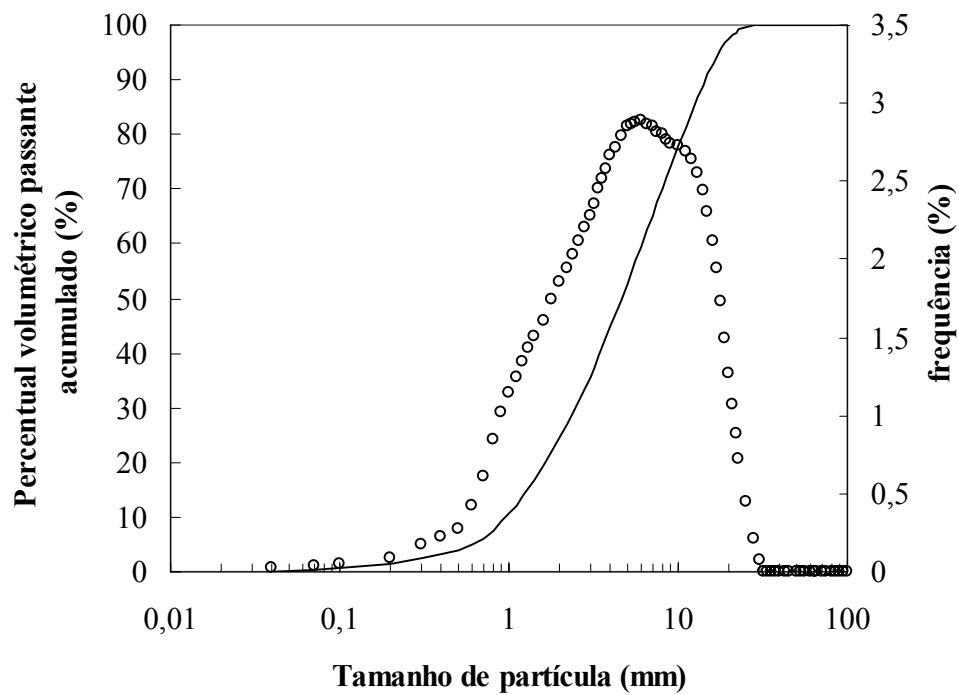


Figura 22. Distribuição do tamanho de partículas suspensas na água afluyente ao tratamento.

4.2 Seleção de reagentes coagulantes/floculantes

Para avaliação da eficiência de agregação de cada reagente ou grupo de reagentes estudado, foi analisada a turbidez do sobrenadante após agregação de sólidos suspensos na água residuária em teste de jarros. Os resultados (Figura 23) mostram que existe a necessidade de um auxiliar de coagulação para uma maior eficiência de agregação, mesmo com o efluente apresentando mais de 80 % das partículas acima de 1µm (partículas não coloidais). O reativo coagulante diminui a espessura da dupla camada elétrica e permite a adsorção –floculação do polímero.

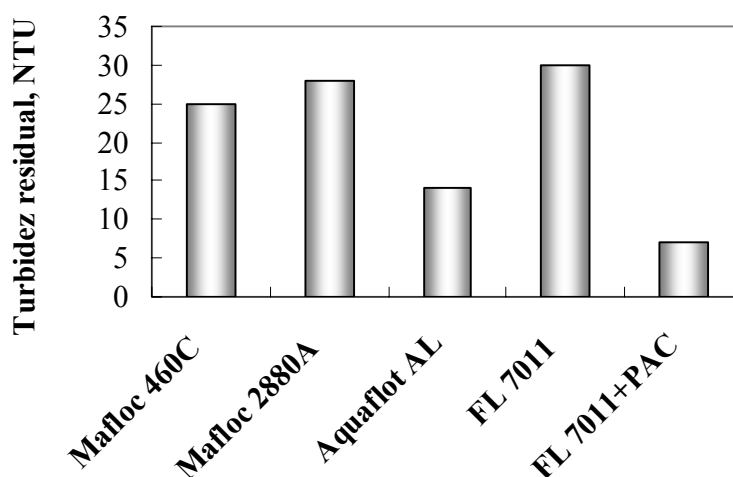


Figura 23. Valores de turbidez residual após floculação de sólidos suspensos na Água Residuária do Processo de Lavagem dos Ônibus (ARPLV) na empresa Viamão Ltda. Condição: [floculante]=20mgL⁻¹, pH 7±0,5.

No sistema FL 7011+PANFLOC, utiliza-se, além dos 20 ppm de FL 7011, uma concentração de PANFLOC TE1018 de 460 mg.L⁻¹ e soda comercial para o ajuste de pH. Estas concentrações foram utilizadas por Carissimi (2007) no tratamento deste mesmo efluente e uma eficiência de diminuição de turbidez superior a 85% foi atingida. Entretanto, a dificuldade operacional, os maiores custos com reagentes e um possível incremento na concentração de cloretos no sistema (Cl⁻) tornam pouco interessante a utilização desta mistura FL 7011+PANFLOC TE1018. No caso do floculante Aquafloc AL, floculante utilizado / indicado pela empresa Aquafloc Industrial Ltda., a concentração de 20 ppm utilizada nos estudos (Figura 23) está muito abaixo da concentração média de 300 ppm

empregada pela empresa Aquaflot Industrial Ltda. no sistema de tratamento da empresa Viamão Ltda.

Pela análise dos resultados, fica definido o Aquaflot AL como sendo o floculante de melhor desempenho para a floculação da água residuária estudada.

4.3 Efeito da configuração da floculação hidráulica em linha no sistema FFC

As quatro configurações de floculação testadas tiveram uma eficiência similar na agregação e clarificação da água residuária.

Segundo Jarvis (2005), as características dos flocos obtidos por um sistema de floculação dependem do grau de agitação e do tempo de residência no floculador. Se o tempo de residência for suficientemente longo, o tamanho e a distribuição de tamanhos dos flocos serão bastante similares, na maioria dos casos. Owen et al. (2007) reporta que quando os flocos passam de uma situação de maior turbulência para uma situação de menor turbulência a eficiência de colisão (α , equação 10) entre partículas é baixa. O autor comenta da possível má conformação do polímero na superfície dos flocos (formação de trens).

A diminuição de turbidez da água tratada em função dos distintos floculadores é apresentada na Figura 24. A análise estatística dos dados mostra que o RGF sozinho é o que apresenta pior eficiência na diminuição de turbidez. Isto pode ser vinculado à falta de cisalhamento e adequada mistura da massa líquida com floculante/partículas, uma vez que as demais condições, que utilizam o reator SR 1, apresentam eficiência bastante similar. A turbidez média final atingida com o uso do SR 1 e do RGF-S foi de 6NTU, com o uso do SR1 + SL1 7NTU e com o uso do RGF 9NTU.

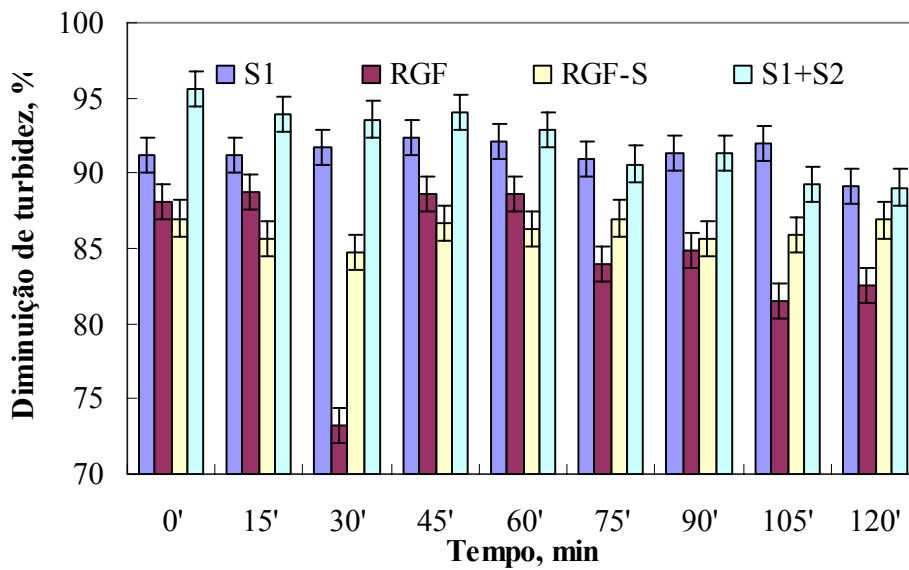


Figura 24. Efeito do tempo e configuração de floculação no sistema FFC na diminuição de turbidez da água do Sistema de Tratamento para Reúso de Água de Lavagem de Veículos (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Zona de contato bolha/partícula = φ 50 mm.

A eficiência na remoção de cor é significativamente maior quando do uso da condição de floculação SR 1 + SL 1 (Figura 25). Embora os mecanismos envolvidos na remoção de cor sejam os mesmos envolvidos na remoção de turbidez (Carissimi, 2007), ou seja, formação de coágulos e subsequente agregação e formação de flocos, a cor é gerada principalmente por ácidos fúlvicos e húmicos dissolvidos (Leal e Libânio, 2002). A cor final média da água tratada com a condição SR 1 + SL1 foi de 40Hz, com o RGF 48Hz, com o RGF-S 60Hz e com o SR 1 41Hz.

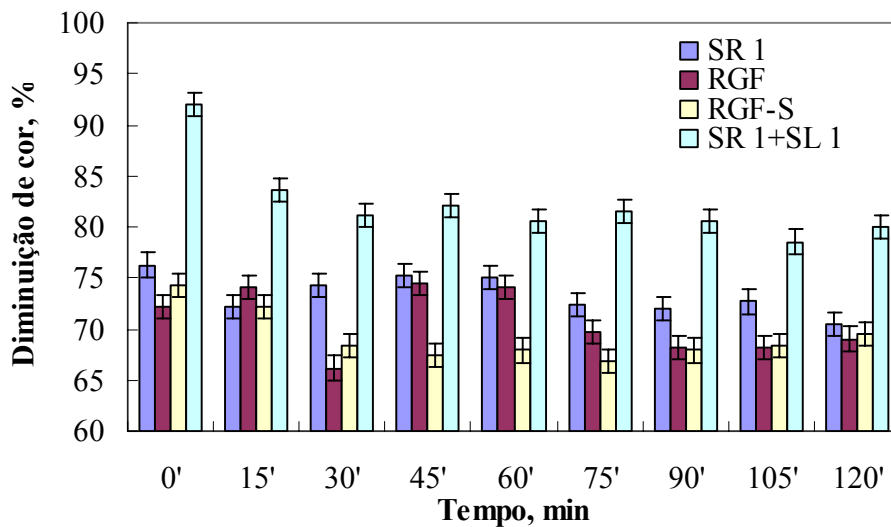


Figura 25. Efeito do tempo e da configuração de floculação no sistema FFC na diminuição de cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Zona de contato bolha/partícula = φ 50 mm.

A análise estatística dos dados mostra um aumento significativamente maior da tensão superficial com o uso do RGF (Figura 26). A tensão superficial da água aumenta em média 30% em relação à água bruta e uma tensão superficial média final de 40 mN.m é atingida. Esse valor de tensão superficial final da água tratada é baixo comparado com a tensão superficial da água pura e é atribuído à baixa eficiência do sistema FFC na remoção de substâncias surfactantes solúveis em água.

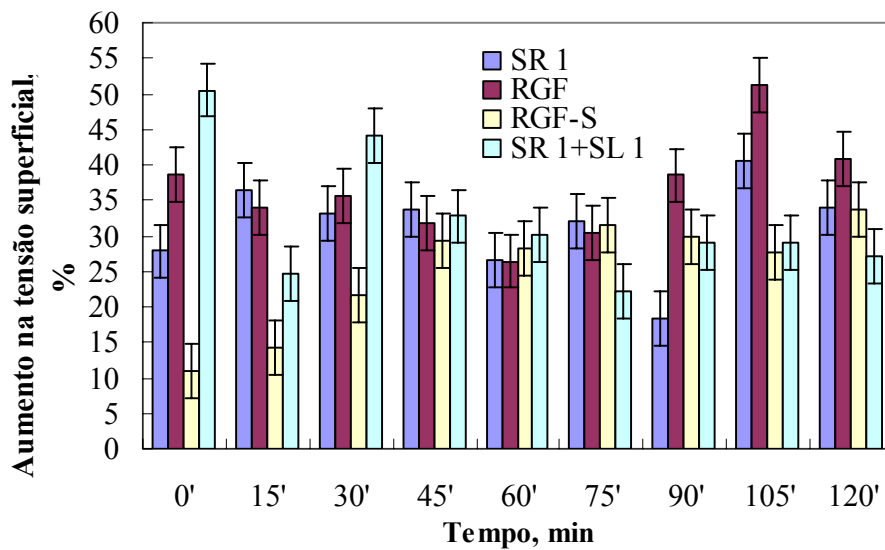


Figura 26. Efeito do tempo de ensaio e da configuração de floculação no sistema FFC no aumento da tensão superficial da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Zona de contato bolha/partícula = φ 50 mm.

Os resultados apresentados acima, para diminuição de turbidez e cor e para aumento da tensão superficial, a respeito do efeito da configuração de floculação hidráulica sobre o sistema FFC mostram que, em qualquer condição, o sistema provoca a melhoria de qualidade da água. Entretanto, um aumento médio de 15% foi observado na condutividade da água tratada em relação à água bruta (Figura 27). Esse aumento parece não estar relacionado com o arraste de partículas suspensas (não flotadas), uma vez que a eficiência de diminuição de turbidez não mostrou a mesma tendência observada no aumento de condutividade quando foram variados os floculadores.

Não se pode fazer uma relação direta entre número de Camp e aumento de condutividade da água. Entretanto, este aumento parece estar relacionado com as condições empregadas na floculação (geometria do reator, gradiente de velocidade e tempo de residência). A condutividade média final da água tratada com o uso do SR 1 foi de 500μS/cm (condutividade da água bruta ~ 300μS/cm) e com o uso dos outros floculadores de 620μS/cm (condutividade da água bruta ~ 300μS/cm). Estes resultados mostram a necessidade de estudos com efluente com características controladas para que se possa

afirmar a tendência de aumento da condutividade com o aumento da mistura nos reatores hidráulicos.

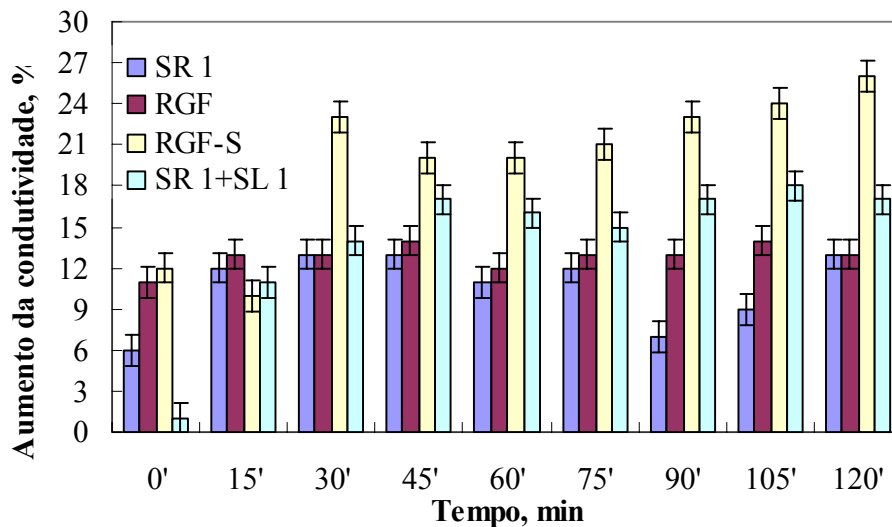


Figura 27. Efeito do tempo e da configuração de floculação sobre o sistema FFC no aumento da condutividade da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4; Zona de contato bolha/partícula = φ 50 mm.

4.4 Efeito das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC

A probabilidade de flotação das partículas no processo FAD é função de microprocessos de interação entre microbolhas e partículas. Estes microprocessos envolvem etapas de colisão e adesão via interação entre as partículas e as microbolhas. Neste processo não ocorre o condicionamento dos flocos com coletores, ou seja, as partículas não são hidrofobizadas artificialmente, o que provavelmente diminui a efetiva adesão (e sua cinética) entre microbolhas e flocos.

As Figuras (28 a 31) apresentam resultados de diminuição de turbidez e de cor com o uso de diferentes condições hidrodinâmicas e hidráulicas na zona de contato microbolhas/partículas do sistema FFC. Os resultados são apresentados em função do tempo e da configuração de floculação.

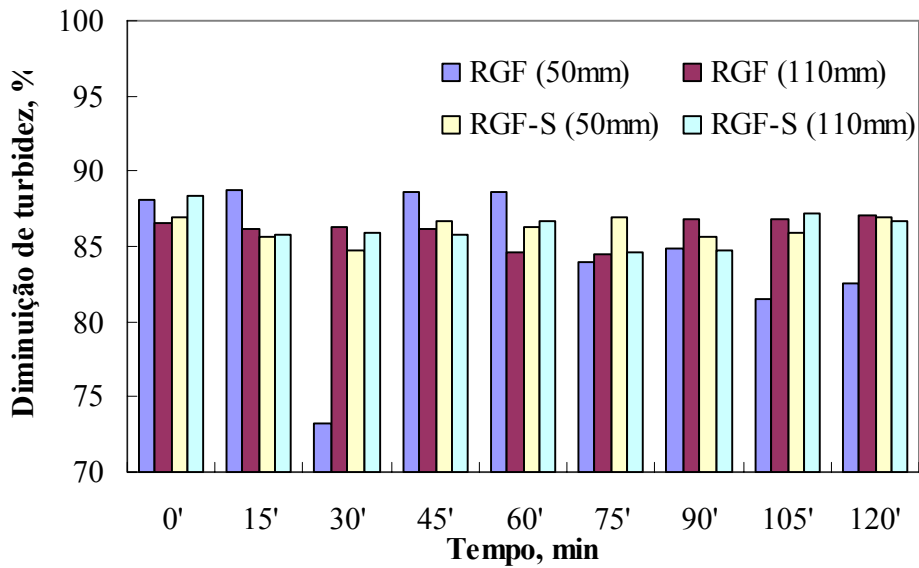


Figura 28. Efeito do tempo, da configuração de floculação (RGF ou RGF-S) e das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC, na diminuição da turbidez da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4.

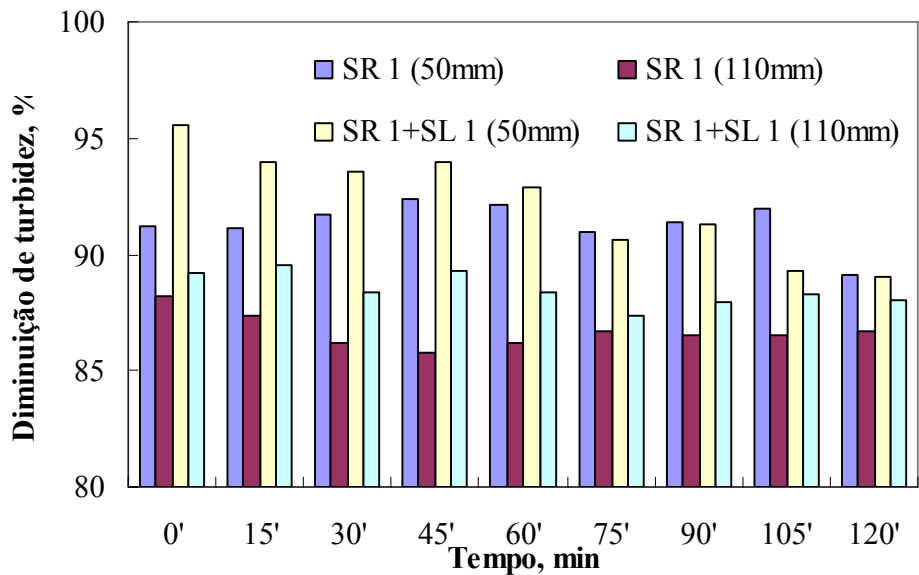


Figura 29. Efeito do tempo, da configuração de floculação (SR 1 ou SR 1 + SL 1) e das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC na diminuição da turbidez da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4.

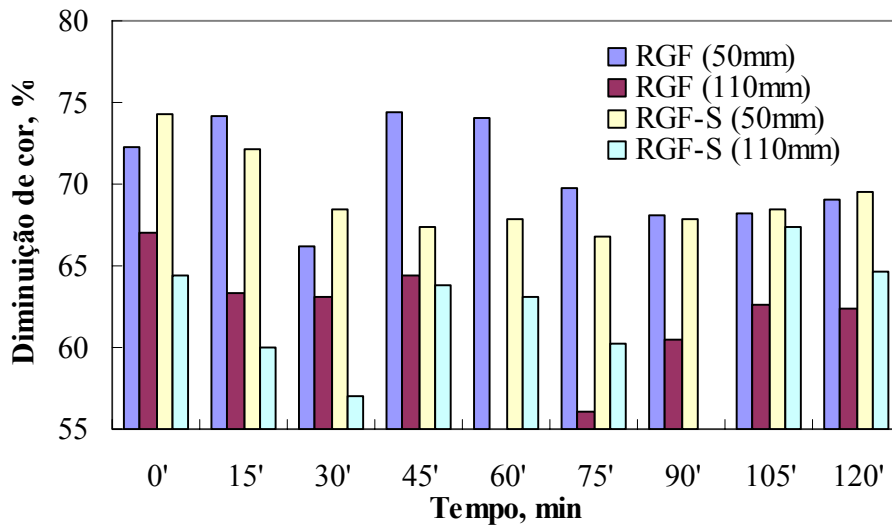


Figura 30. Efeito do tempo, da configuração de floculação (RGF ou RGF-S) e das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC na diminuição da cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot SL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4.

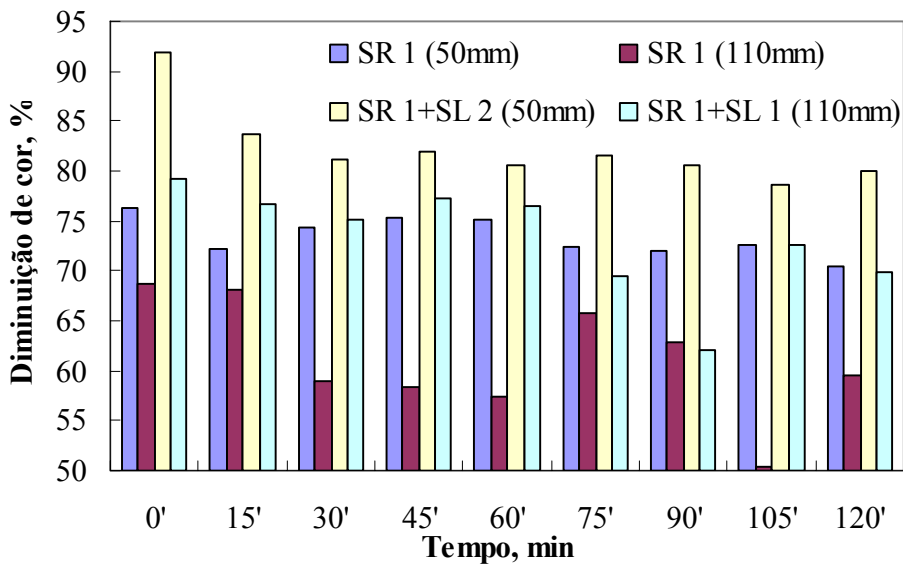


Figura 31. Efeito do tempo, da configuração de floculação (SR 1 ou SR 1 + SL 1) e das características da zona de contato bolha/partícula no sistema FFC na diminuição da cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4.

Os resultados indicam que o aumento no diâmetro do tubo de ascensão e conseqüente aumento do tempo de residência e diminuição da velocidade do fluxo (ver Tabela 15) possui efeito negativo na eficiência do tratamento com o sistema FFC. Isto pode ocorrer provavelmente por serem os agregados bolha/partícula resistentes ao cisalhamento gerado no fluido pela maior velocidade de fluxo (uso do tubo de 50mm) e/ou por apresentar um menor tempo de contato (situação rápida, tubo de 50mm), suficiente para a colisão e eficiente interação entre flocos e microbolhas.

4.5 Efeito da taxa de aplicação do sistema FFC

A Figura 32 mostra a diminuição da turbidez da água tratada em função do tempo nas diferentes taxas de aplicação empregadas na coluna de flotação. Excetuando a taxa de 33m.h^{-1} , que, a partir da amostra de 15 minutos, já mostra uma eficiência inferior a 75%. As demais taxas de aplicação mostraram eficiência (diminuição de turbidez) superior a 85% ao longo da duração do ensaio e a turbidez final média é de 10NTU. Ainda, a análise estatística dos dados mostra que não há diferença significativa entre as taxas de 9, 18 e 25 m.h^{-1} na diminuição de turbidez. Entretanto, a eficiência de tratamento diminui com o aumento da velocidade de tratamento, provavelmente em função da maior velocidade superficial no interior da coluna e conseqüente arraste de particulados.

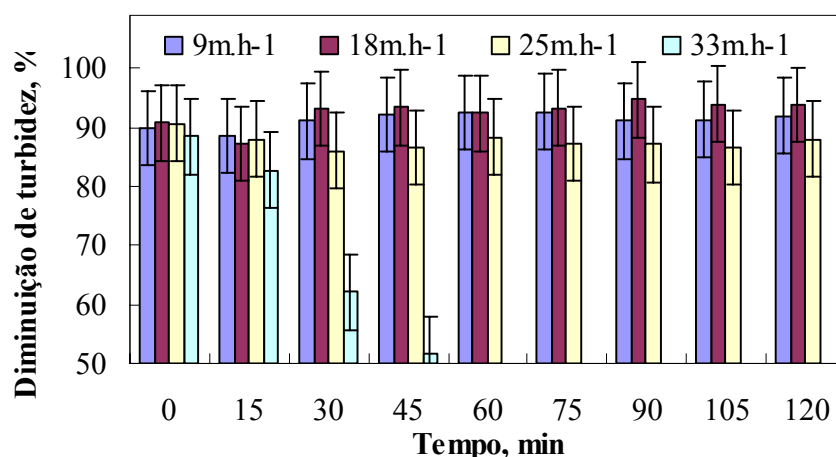


Figura 32. Efeito do tempo e da taxa de aplicação do sistema FFC na diminuição de turbidez da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 200-400ppm; pH $7,2 \pm 0,4$.

Devido à baixa eficiência de remoção de turbidez do sistema na taxa de 33 m.h^{-1} , não se avaliou os resultados de remoção de cor nesta condição.

A Figura 33 mostra a variação de cor da água tratada em função do tempo de ensaio e da taxa de aplicação na coluna. A menor taxa de aplicação (menor velocidade superficial) na coluna, 9 m.h^{-1} , apresentou a melhor eficiência na redução de cor, embora a cor final média da água tratada na taxa de 25 m.h^{-1} (70 Hz) seja inferior a atingida na taxa de 9 m.h^{-1} (75 Hz).

A Sabesp (2004) apud Morelli (2005) propõe como limite para água de reúso em atividades diversas uma cor residual de 10 Hz (salvo no reúso na lavagem de veículos).

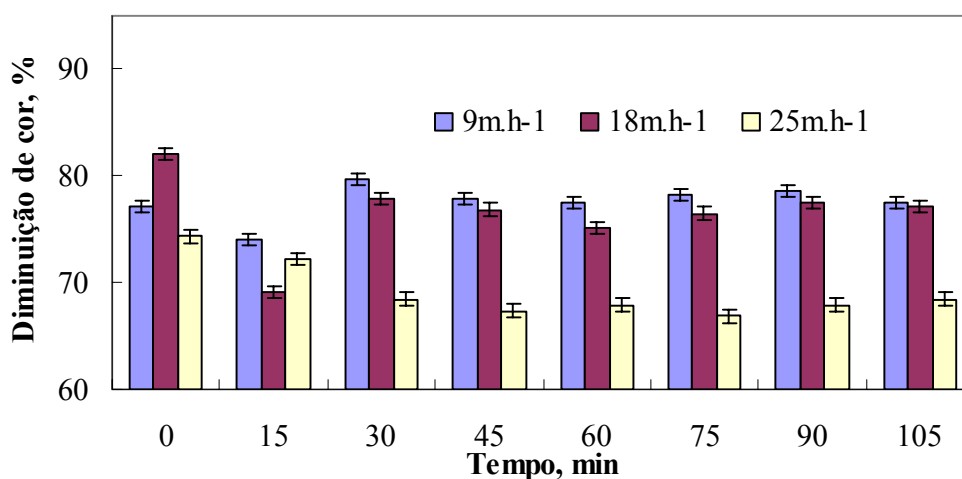


Figura 33. Efeito do tempo e da taxa de aplicação do sistema FFC na diminuição de cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. tratada. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquafloc AL] = 200-400ppm; pH $7,2 \pm 0,4$.

A Tabela 26 apresenta o percentual de diminuição, ou de aumento da condutividade da água tratada em função do tempo de ensaio e da taxa de aplicação. O sistema mostra baixa eficiência na diminuição de condutividade para as taxas de 9 e 18 m.h^{-1} e um aumento na condutividade na taxa de 25 m.h^{-1} . A condutividade final na água tratada na taxa de aplicação de 9 m.h^{-1} é de $407 \mu\text{S/cm}$, na taxa de 18 m.h^{-1} de $387 \mu\text{S/cm}$ e na taxa de $25 \mu\text{S/cm}$ de $530 \mu\text{S/cm}$.

A maior velocidade superficial do líquido no interior da coluna (J_1) pode ser a responsável por este aumento, uma vez que pode estar causando o arraste de residual de floculante e/ou partículas finamente divididas.

Tabela 26. Variação da condutividade em função da taxa de aplicação e do tempo de ensaio. Valores em vermelho significam aumento na condutividade em relação a água bruta.

Tempo de ensaio (min.)	% de diminuição, ou aumento da condutividade da água tratada em função da taxa de aplicação		
	9m.h ⁻¹	18m.h ⁻¹	25m.h ⁻¹
0	24	21	4*
15	26	26	2*
30	16	28	14*
45	20	21	13*
60	19	22	12*
75	17	22	10*
90	16	20	13*
105	15	20	14*
120	13	19	15*

*Aumento %.

A Figura 34 apresenta o aumento da tensão superficial da água tratada em função do tempo de ensaio e da taxa de aplicação. Observa-se que a tensão superficial da água tratada aumenta com o tratamento, o que pode ser vinculado com remoção de tensoativos pelo sistema FFC. Entretanto, a tensão superficial da água de reúso disponibilizada (na média 40mN.m) ficou bem abaixo da tensão superficial da água pura (72mN.m). Cruz et al. (2005) mostraram a necessidade de adição de carvão ativado em pó no tratamento de um efluente de lavanderia industrial com coagulante a base de tanino e tratamento primário (floculação-sedimentação) para se obter uma tensão superficial próxima a da água a água pura ou de abastecimento municipal.

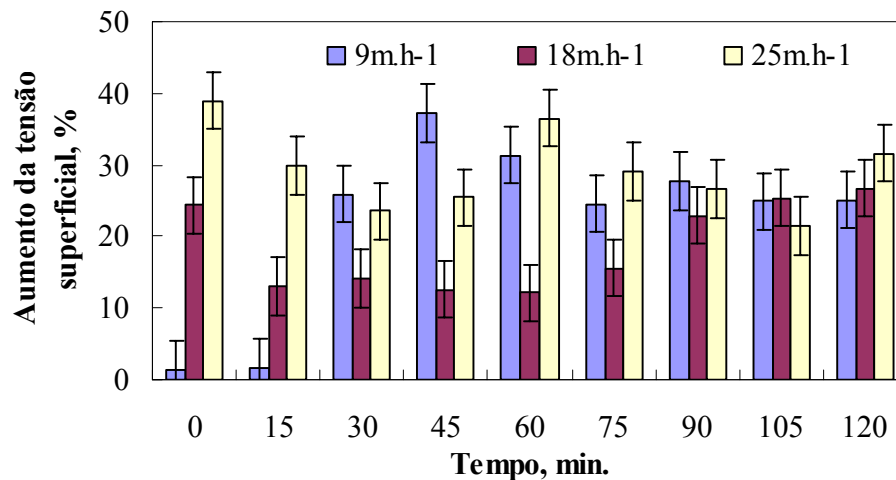


Figura 34. Efeito do tempo de ensaio e da taxa de aplicação no aumento da tensão superficial da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. tratada com o sistema FFC. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aqualflot AL] = 200 – 400 ppm; pH $7,2 \pm 0,4$.

4.6 Efeito da altura da coluna de flotação no sistema FFC

A Tabela 18 (item 3.2.5) apresenta o número de mistura N_d para as diferentes alturas de coluna estudadas e mostra que existe pouca diferença no que se refere ao padrão de fluxo nas colunas (todas apresentam N_d próximo a zero, ou seja, possuem fluxo do tipo pistão (da Luz, 2004)). Esta pode ser a razão pela qual não houve grande diferença na diminuição percentual de turbidez entre as diferentes alturas de coluna de flotação estudadas (Figura 35).

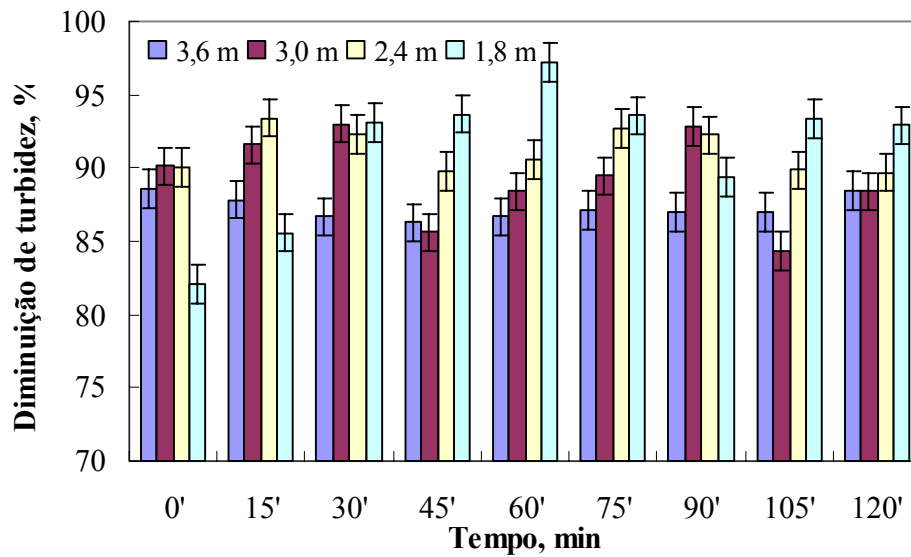


Figura 35. Efeito do tempo e da altura da coluna de flotação no sistema FFC na diminuição de turbidez da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 200-400ppm; pH $7,2 \pm 0,4$; Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm.

A água tratada pelo sistema FFC com uma altura de coluna de 3m (Figura 36) mostrou um aumento no parâmetro cor. Isto se deve a grande variação das características da água bruta e/ou erro nas análises.

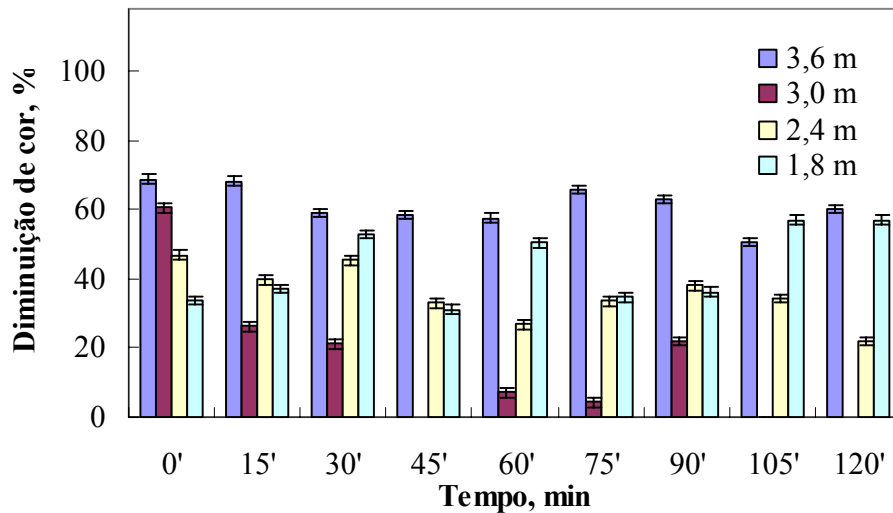


Figura 36. Efeito do tempo e da altura da coluna de flotação sobre o sistema FFC na diminuição de cor da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Taxa de aplicação = 25 m.h⁻¹; Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquafloc AL] = 300ppm; pH 7,2 ± 0,4. Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm.

A Figura 37 apresenta os resultados da variação da tensão superficial em função do tempo de ensaio e da altura da coluna estudada. O aumento da tensão superficial não mostra uma tendência, desta forma, a diferença encontrada parece estar mais ligada a variação na água bruta ao longo do estudo do que propriamente a diferença de altura na coluna.

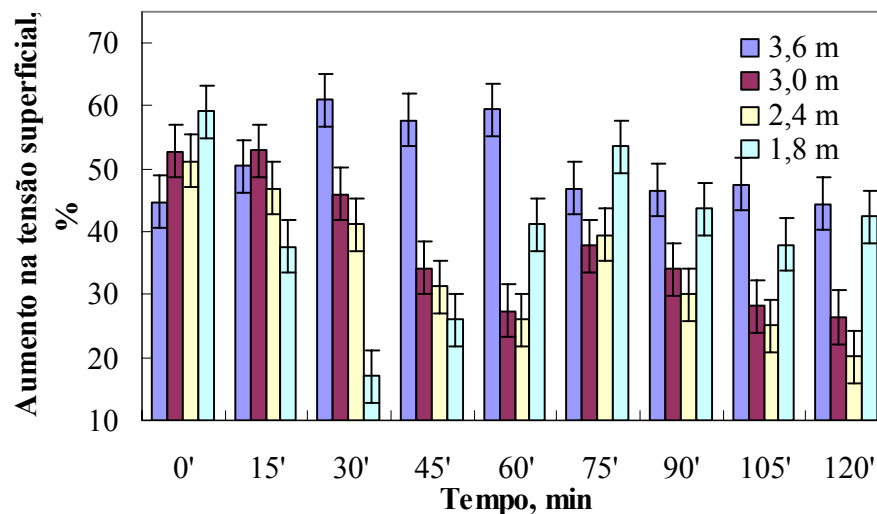


Figura 37. Efeito do tempo de ensaio e da altura da coluna de flotação sobre o sistema FFC no aumento da tensão superficial da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH $7,2 \pm 0,4$; Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm.

A Figura 38 relaciona o aumento da condutividade com a diminuição no tempo de retenção na coluna e a Figura 39 apresenta o aumento da condutividade da água tratada em função do tempo de ensaio. A condutividade da água tratada aumenta significativamente com a diminuição da altura da coluna de flotação. Isto pode ser explicado principalmente por dois fatores:

1. Diminuição do tempo de residência na coluna e conseqüente maior arraste de residual de reagente;
2. Maior concentração de residual de reagentes e sólidos suspensos não flotados na zona de descarga da água tratada (uma vez que é característico de reatores de separação sólido/líquido de fluxo pistão um gradiente de partículas ao longo do eixo longitudinal (Finch et al., 2003; da Luz, 2004).

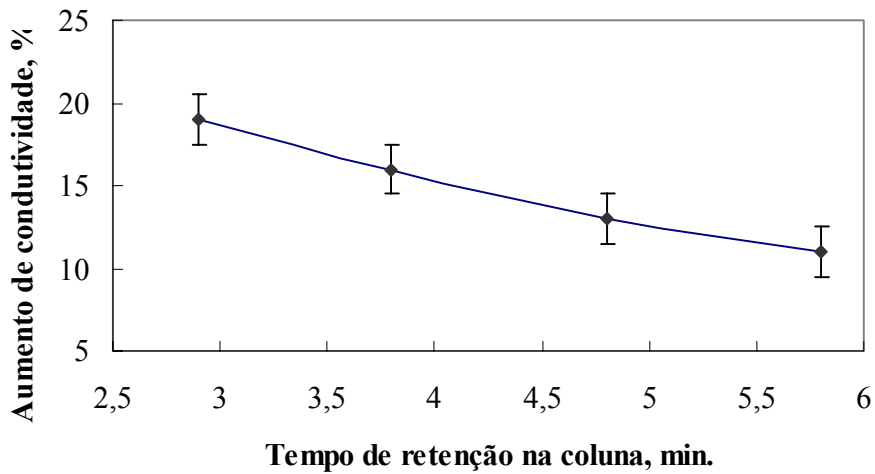


Figura 38. Aumento da condutividade da água tratada em função do tempo de retenção na coluna de flotação para as diferentes alturas de coluna. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH $7,2 \pm 0,4$; Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm e alturas de coluna = 3,6; 3,0; 2,4; 1,8 m.

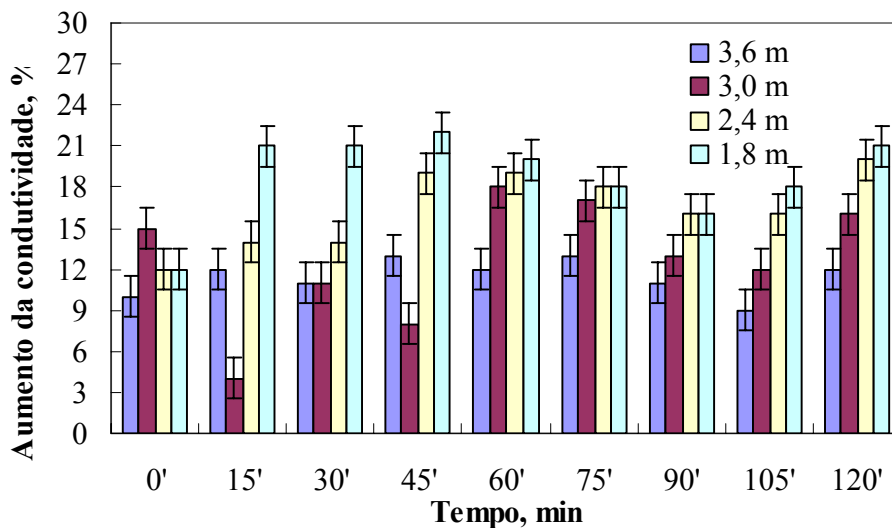


Figura 39. Efeito do tempo e da altura da coluna de flotação no sistema FFC no aumento da condutividade da água do (STRALV) da Empresa Viamão Ltda. Condições do ensaio: Vazão de reciclo = 33%; Pressão de saturação = 4,5 atm; [Aquaflot AL] = 300ppm; pH $7,2 \pm 0,4$; Floculador hidráulico = SR 1; Zona de contato bolha/partícula = ϕ 50 mm.

Filippov (2000) reporta que, na flotação em coluna de precipitados coloidais, pode ocorrer a ruptura dos precipitados por forças cisalhantes. Ainda, este autor mostra que diminuindo o tempo de residência, através do aumento da velocidade superficial do líquido, estes flocos erodidos (rompidos) são arrastados com maior facilidade, diminuindo a eficiência de separação sólido/líquido, mesmo que a turbidez da água tratada não aumente.

Um mecanismo semelhante pode ser o causador do aumento da condutividade com o decréscimo na altura da coluna e conseqüente diminuição do tempo de retenção. A diferença é que, neste estudo, os flocos são erodidos (rompidos) provavelmente na etapa de floculação, onde um alto grau de mistura é empregado. Foi observada diferença significativa de aumento de condutividade em função da condição de floculação hidráulica utilizada.

A Tabela 27 resume as características da água disponibilizada com o sistema FFC na seguinte configuração: Coluna de flotação de 1,8 m, floculação com 10 s de tempo de retenção no SR 1, 30 % de taxa de reciclo, bomba centrífuga multifase EDUR[®] e taxa de reciclo de 25 m.h⁻¹. Os valores apresentados refletem a média dos valores obtidos no estudo.

Tabela 27. Valores médios finais da qualidade da água tratada pelo sistema FFC na seguinte configuração: Floculador SR 1; Tubo de ascensão de 50 mm (tubo rápido); Taxa de aplicação de 25 m.h⁻¹ e coluna de 1,8 m.

Turbidez (NTU)	Cor (Hz)	Tensão superficial (mN.m ⁻¹)	Condutividade (µS.cma ⁻¹)
10	80	38	555

4.7 Caracterização dos flocos

Os resultados de caracterização dos flocos mostram flocos compactos e com dimensões fractais D_2 próxima a 2; tamanho médio de 1151 µm e velocidades de ascensão entre 45 e 160 m.h⁻¹.

O tamanho dos flocos gerados na presença de duas concentrações diferentes de Aquafлот AL é apresentado na Tabela 28. Ainda, é apresentada a resistência teórica dos flocos (σ) – *floc strength* – parâmetro utilizado por (Li et al., 2007) e que foi elucidado por

(Barche et al., 1999). Os resultados estão de acordo com as análises feitas por Jarvis(2005): A resistência teórica dos flocos (σ) é diretamente proporcional a concentração de reagente, ou seja, com $G(s^{-1})$ constante, os flocos formados na presença de maior concentração de reagente são maiores e por possuírem maior número de pontes poliméricas entre as /flocos primários.

Tabela 28. Resistência teórica dos flocos (*floc-strength*) em função do tamanho médio e da concentração de reagentes.

[Aquaflot Al]	Tamanho médio dos flocos (Diâmetro equivalente, μm)	σ (N.m^{-2})
300	857	49
700	1603	92

Os resultados encontrados para σ são maiores do que os valores encontrados por Li et al.(2007) para flocos de caulinita gerados na presença de sulfato de alumínio ($\sigma \sim 0,24 \text{ N.m}^{-2}$). Entretanto, Yeung e Pelton (1997) mostram valores de σ entre 100 e 1000 N.m^{-2} para flocos de carbonato de cálcio formados na presença de polímeros. Os resultados obtidos neste estudo correspondem a flocos formados por um polímero (Aquaflot AL) de baixo peso molecular e gotículas de óleo e particulados minerais (siltitos e argilas). Assim, valores intermediários para σ , em relação aos encontrados nos estudos de Li et al. (2007) e Yeung e Pelton (1996), são aceitáveis.

Os valores médios obtidos para a dimensão fractal D_2 dos flocos foram da ordem de 1,64. De acordo com Li et al (2007), uma das principais características dos agregados fractais é que flocos formados na mesma condição possuem dimensão fractal semelhante. A Tabela 29 apresenta a dimensão fractal D_2 dos flocos analisados em pouca variação, mesmo com significativa diferença no tamanho dos flocos.

Tabela 29. Diâmetro equivalente, coeficiente angular da reta $\log(A(r))-\log(r)$ e dimensão fractal D_2 dos flocos gerados pelo floculador SR 1.

Diâmetro equivalente do floco (μm)	Coeficiente angular (α) da reta $\log A(r)-\log(r)$	Dimensão fractal D_2 $D=2-\alpha$
1551	0,29	1,7
1858	0,30	1,7
1588	0,32	1,7
1257	0,43	1,6
2433	0,42	1,6
1335	0,40	1,6
1681	0,32	1,7
1535	0,37	1,6
1189	0,45	1,6
1551	0,29	1,7

Os resultados de dimensão fractal normalmente são associados ao formato dos flocos e, conseqüente, à velocidade de sedimentação; porem podem ser também vinculados a erosão das camadas irregulares mais externas dos flocos de baixa resistência ao cisalhamento (Li et al, 2006; Jarvis, 2005).

Owen et al. (2007) mostraram que o aumento no cisalhamento imposto à massa líquida em um floculador hidráulico em linha aumenta a dimensão fractal dos flocos, sem aumentar sua densidade, ou seja, os flocos têm suas camadas mais externas e irregulares erodidas, aproximando-se a um formato esférico - dimensão fractal D_2 próxima a 2 (Rajat et al, 2000).

Assim, pode-se vincular o resultado obtido para dimensão fractal dos flocos estudados ($D_2 \sim 1,65$) a flocos com geometria próxima à esférica e, por isso, cisalhados nas suas camadas mais externas (irregulares), provavelmente entregando partículas e flocos primários adsorvidos de reagentes a solução. Ainda, estas partículas erodidas podem ser as responsáveis pelo aumento de condutividade da água tratada observado nos estudos de desenvolvimento do FFC. Como exemplo, pode-se citar o estudo do efeito da configuração de floculação hidráulica em linha, que mostrou uma condutividade quase duas vezes maior na condição RGF-S do que quando estes reatores foram utilizados em separado.

Os resultados de velocidade de ascensão dos flocos aerados são apresentados na Figura 40 e mostram valores bem elevados para os diâmetros equivalentes das bolhas que representam os flocos aerados gerados. Esses resultados são vinculados a vários fatores, entre outros os seguintes:

1. Composição dos flocos, com destaque as gotículas de óleo aglomeradas aos flocos, resultando em flocos de baixa densidade;
2. Concentração de sólidos em suspensão na água bruta (na média 112 mg.L^{-1}), que influencia na velocidade de ascensão dos flocos (Carissimi e Rubio, 2005);
3. Microbolhas utilizadas neste estudo, que são maiores que as disponibilizadas por vasos saturadores (Rodrigues, 2004), o que aumenta, neste caso, a taxa cinética de separação S/L dos flocos aerados.

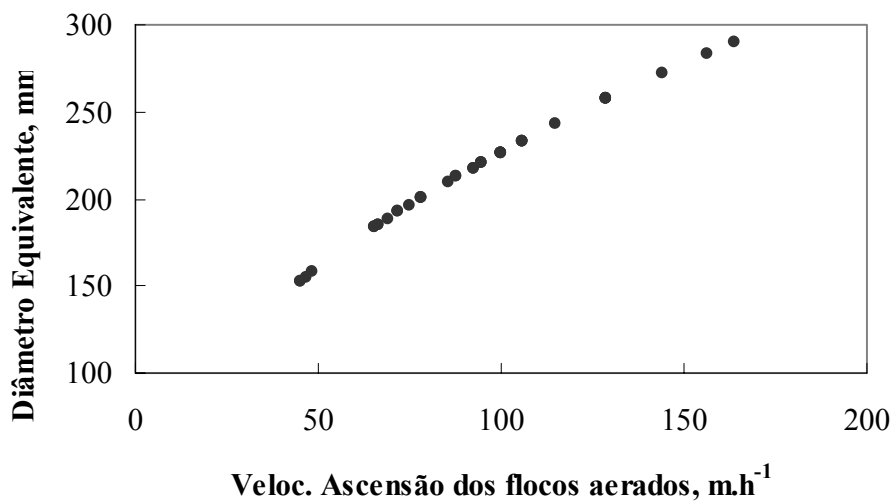


Figura 40. Valores (calculados) do diâmetro equivalente das bolhas em função da velocidade de ascensão dos flocos aerados.

4.8 Ensaio de validação

A Tabela 30 apresenta os resultados das análises da água bruta e da água tratada em função do tempo de ensaio.

Tabela 30. Características físico-químicos da qualidade da água bruta e da água tratada em função do tempo. Condições do ensaio: [Aquaflot Al] = 550 mg.L⁻¹, pH=6,8±0,4.

Tempo (min)	ST (mg.L ⁻¹)	SST (mg.L ⁻¹)	SDT (mg.L ⁻¹)	CT (mg.L ⁻¹)	COT (mg.L ⁻¹)	DQO (mg.L ⁻¹)	Turbidez NTU	Cor Hz	Óleos e graxas, (mg.L ⁻¹)
Bruta	643	187	456	71	34	281	198	308	12
30	457	22	435	73	36	219	10	57	-
60	536	22	514	82	47	323	9	56	N.D.
90	522	17	505	77	34	272	8	54	-
120	530	2	528	76	38	276	9	55	N.D.
150	506	16	490	85	49	244	11	76	-
180	611	10	601	88	50	386	10	72	N.D.
210	514	3	511	75	39	294	10	62	-
240	511	13	498	80	41	289	10	65	N.D.
Média	523	13	510	80	42	288	10	62	N.D.

A concentração média de sólidos suspensos na água tratada foi de aproximadamente 13mg.L⁻¹, o que sugere o uso de filtro de areia na saída da coluna de flotação, visando diminuir a carga de sólidos aos tanques de armazenamento, diminuindo, assim, possíveis problemas no processo de lavagem. Ainda, o filtro de areia funciona como barreira de proteção a oscilações quando da aplicação do processo (FFC) em escala contínua e industrial.

Os resultados mostram também uma concentração (média) de sólidos dissolvidos da ordem de 12% (água tratada) com relação à água bruta. Esse aumento de sólidos dissolvidos é provavelmente causado pela: concentração residual de floculante na água tratada e/ou arraste de partículas primárias e/ou flocos primários erodidos das camadas mais externas dos flocos, ainda na etapa de agregação.

O CT aumentou praticamente na mesma proporção que o COT e este aumento pode ser vinculado ao arraste de residual de reagentes, uma vez que residual de floculantes à base de tanino aumentam a concentração de COT.

A DQO remanescente na água tratada é elevada e responsável pela geração de odor na água de reúso. Assim, é indicada a filtragem da água de reúso em filtros de carvão ativado (Aquaflot Industrial Ltda.) ou a utilização de um processo de aeração controlada com microbolhas.

O resultado da análise da presença de óleos e graxas (Tabela 30) mostra que ocorre a remoção destes poluentes mesmo quando aparecem em concentrações baixas.

Os resultados apresentados abaixo (Tabela 31) mostram que o tratamento proposto não apresentou valores significativos de remoção de dureza e que a água de reúso é na média dura pela presença dos íons Ca^{++} e Mg^{++} .

Tabela 31. Dureza das águas do sistema de lavagem de ônibus estudado.

Água	Dureza (mg.l^{-1} em CaCO_3)
Bruta	187
Poço	168
FFC (tratada)	179

Em relação à eficiência de remoção de ferro e manganês, o tratamento mostrou boa eficiência na remoção de ferro, mas não foi eficiente na remoção de manganês devido ao fato de que não há a formação da espécie hidrolisada insolúvel (precipitado) de manganês ($\text{Mn}(\text{OH})_2$) no pH estudado (a formação desta espécie ocorre a pH 9 (Rubio et al. 2006)). A Tabela 32 mostra os resultados obtidos na análise por absorção atômica das águas do tanque de equalização (água bruta), do poço, do tratamento pelo sistema ETAR[®] e do tratamento pelo sistema FFC.

Tabela 32. Concentração de íons de metais nas águas do sistema de lavagem da empresa Viamão Ltda.

Água	Fe (mg.l^{-1})	Mn (mg.l^{-1})
Poço	0,3	0,1
Bruta	2,4	0,4
ETAR [®]	0,3	0,3
Tratamento proposto (FFC)	0,5	0,3

4.9 Comparação técnica entre o sistema ETAR[®] e o sistema FFC

A Tabela 33 apresenta uma comparação entre o sistema FFC (coluna de 1,8m, taxa de aplicação de 25m.h^{-1} e flocculador SR 1) e o sistema ETAR[®] analisado ao longo dos 180 dias do estudo dentro da empresa Viamão Ltda.

Tabela 33. Comparação da qualidade da água tratada, parâmetros operacionais e construtivos entre o sistema FFC e o sistema ETAR[®].

Parâmetro	FFC	ETAR
Sólidos suspensos, mg.L ⁻¹	8	16
Turbidez (NTU)	10	22
Cor (HZ)	60	91
Condutividade, uS.cma ⁻¹	520	514
Tensão superficial, mN.m	35	35
Dureza, mg.L-1 de CaCO ₃	179	175
Taxa de aplicação, m.h ⁻¹	25	9
Tempo de retenção no sistema, min	4,5	9,8
<i>Split</i> , % da alimentação	0,009	0,01
Teor de sólidos no lodo, % de sólidos totais	1,5	1,5
Área ocupada, m ² /m ³ tratado (sem contemplar disposição do lodo)	0,08	0,19
Motor, un	2 trifásicos e 2 bifásicos	3 trifásicos e 2 bifásicos
Válvula solenóide, un	-	1
Conjunto eixo-hélice, un	-	1

Os resultados obtidos nos estudos com o sistema FFC mostram as seguintes vantagens deste sistema quando comparado com o sistema ETAR[®] em funcionamento na empresa Viamão Ltda.:

- i. eliminação do sistema de floculação em tanque agitado;
- ii. maior taxa de aplicação (menor área requerida em planta);
- iii. geração de microbolhas com bomba centrífuga multifase (facilidade operacional e diminuição de custos operacionais e de aquisição do sistema).

A diminuição de componentes mecânicos e de área necessária para separação sólido/líquido, assim como a redução de equipamentos de controle atingida com o sistema FFC, acarreta em diminuição no custo de investimento nas estações de tratamento para reúso de água na lavagem de veículos. Atualmente, uma ETAR com capacidade de tratamento de 1,5m³.h⁻¹ custa em torno de R\$ 21.000,00. Este valor aumenta com o

aumento de capacidade de tratamento e estações com capacidade de tratamento de $10\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ custam em torno de R\$ 65.000,00.

A concentração de reagentes utilizada nos dois sistemas foi aproximadamente a mesma ao longo dos ensaios, assim, não há vantagem do sistema FFC no que se refere ao custo com reagentes, estimado em R\$ $0,60\cdot\text{m}^{-3}$ (aquafлот Industrial Ltda.). Entretanto, a diminuição de partes mecânicas alcançada com o uso do FFC acarreta em menor consumo de energia (hoje estimado em R\$ 0,26) e conseqüente menor gasto operacional.

5 CONCLUSÕES

Os estudos realizados e os resultados obtidos permitem estabelecer as seguintes conclusões:

1. A água residuária do processo de lavagem dos ônibus da Empresa de Transportes Coletivos Viamão Ltda. mostrou variação nas suas características de pH, turbidez, cor, tensão superficial, condutividade, sólidos totais, sólidos suspensos e sólidos dissolvidos. A água do ponto de lavagem manual, onde são lavados o motor, o chassi, a parte interna dos ônibus e as rodas é a que mostra maior carga de poluentes;
2. O sistema proposto para tratamento e reúso da água de lavagem de ônibus da empresa Viamão, de floculação – flotação em coluna – FFC, apresentou uma elevada eficiência em termos de qualidade da água tratada, de área ocupada, de baixo consumo energético e de velocidade de separação sólido/líquido;
3. A melhor qualidade final da água tratada foi disponibilizada com o emprego de uma taxa de aplicação de 18m.h^{-1} na coluna de flotação, entretanto com uma taxa de aplicação de 25 m.h^{-1} obteve-se uma eficiente clarificação da água (taxa esta muito superior as aplicadas nos equipamentos disponíveis no mercado);
4. As diferentes geometrias e tempos de residência dos flocladores hidráulicos acoplados em linha, junto à coluna de flotação, mostraram diferenças significativas na eficiência de tratamento do sistema FFC. Nas condições do estudo, o reator SR 1 (geometria chicanada (tipo FF[®]) e $t_r = 10\text{s}$), por ser mais compacto, foi o mais indicado na etapa de floculação;
5. O aumento do tempo de residência e a diminuição na velocidade de fluxo na zona de contato bolha/partícula, nas condições estudadas, mostraram efeito negativo sobre a eficiência de tratamento do sistema FFC. O tubo de ascensão de 50 mm (contato rápido) foi suficiente para um eficiente contato entre microbolhas e flocos;

6. A Altura da coluna de flotação mostrou influenciar a eficiência de tratamento do sistema FFC nas condições estudadas. A coluna de flotação com 1,8m de altura é mais eficiente na separação sólido/líquido (maior diminuição de turbidez), entretanto entrega uma água tratada com maior condutividade.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Estudos com efluente sintético para confirmação dos efeitos encontrados neste estudo (variação da condição de floculação hidráulica, da taxa de aplicação na coluna de flotação e da altura da coluna de flotação);
- Aplicar o sistema FFC em águas residuárias de outros processos industriais;
- Realizar estudos sobre possível contaminação da água de reúso por bactérias patológicas, a exemplo da *Legionella pneumophila*, encontrada em alguns postos de lavagem na Europa;
- Contribuir para a definição de parâmetros mínimos de qualidade para água de reúso na lavagem de veículos. Estes parâmetros devem diminuir as incertezas quanto aos possíveis problemas desta prática: manchas nos veículos (*spots*), corrosão das carrocerias e partes componentes dos veículos, contaminação por patogênicos e odor na água.

7 REFERÊNCIAS

AL-ODWANI, A. AHMED, M., BOU-HAMAD, S. Carwash water reclamation in Kuwait. **Desalination**. v. 206 (1-3), p. 17-28, 2006

AMIRTHARAJAH, A., O'MELIA, C. R. Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation. In: Pontius, F. W. **Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies**. Washington, D. C.: MacGraw-Hill - 4th edition, p.269 – 361.

APHA, Awwa, Wef. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20a. Edição. American Public Health Association, Washington, D. C., 1998.

AQUAFLOT. Aquafлот industrial Ltda. Disponível em: <http://www.aquafлот.com.br/>. Acesso em: 05/02/2007.

BACKES, A. R.; BRUNO, O. M. **Técnicas de Estimativa da Dimensão Fractal: Um Estudo Comparativo**. USP-ICMC. 2005.

BANISI, S.; FINCH, J. A.; LAPLANTE, A. R.; WEBER, M. E. Effect of solids particles on gas holdup in flotation columns – I. Measurement. **Chemical Engineering Science**, v. 50 (14), p. 2329-2334, 1995a.

BANISI, S.; FINCH, J. A.; LAPLANTE, A. R.; WEBER, M. E. Effect of solids particles on gas holdup in flotation columns – II. Investigation of mechanisms of gas holdup reduction in presence of solids. **Chemical Engineering Science**, v. 50 (14), p. 2329-2334, 1995b.

BOMTOQUE. Gama indústria e comércio de produtos de limpeza Ltda. Disponível em: <http://www.bomtoque.com.br/>. Acesso em: 21/08/2007.

BRAILE, P. M., CAVALCANTI J. G. W. A. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais**. São Paulo. CETESB. 1979.

BRATBY, J. **Coagulation and flocculation**. Uplands Press Ltd, England, 354 p., 1980.

CAPPONI, F.; SARTORI, M.; SOUZA, M. L.; RUBIO, J. Modified column flotation of adsorbing iron hydroxides colloidal precipitates. **Int. J. Miner. Process.**, 79, p. 167–173, 2006.

CARISSIMI, E.; MILLER, J. D.; RUBIO, J. Characterization of the high kinetic energy dissipation of the flocs generator reactor (FGR). **Int. J. Miner. Process.**, 85 (1-3), p. 41-49, 2007.

CARISSIMI, E. Desenvolvimento do reator gerador de flocos (RGF): aspectos básicos e aplicações no tratamento e reúso de águas e efluentes. Tese de Doutorado PPGEM – UFRGS. Orientador: Jorge Rubio, 2007.

CARISSIMI, E. Reator Gerador de Flocos – RGF: Concepção e Desenvolvimento Básico. Dissertação de Mestrado PPGEM – UFRGS, orientador: Jorge Rubio, 2003.

CARISSIMI, E.; RUBIO, J. The flocs generator reactor – FGR: a new basis for flocculation and solid-liquid separation. **Int. J. Miner. Process.**, 75 (3-4), p. 237-247, 2005.

CARISSIMI, E.; RUBIO, J. Advances in Particulates Aggregation-Flotation separation. **Anais...** Centenary of Flotation Symposium, Brisbane, Australia, 6-9 de junho 2005.

CECCATO. Ceccato Carwash. Disponível em: <http://www.ceccato.com.br/>. Acesso em 20/08/2007.

CETERA, A. The Minkowski dimension and critical effects in fractal evolution of defects. **Chaos, Solitons and Fractals**, 12, p. 475-482. 2001.

CIONCOLINI, A.; SANTINI, L. An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 30, p. 367-380, 2006.

CNRH. Resolução N^o54, de 28 de novembro de 2005, Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente, 3 p., em vigor desde 9 de março de 2006, 2005.

CONSEMA. Resolução N^o 128, de 24 de novembro de 2006, Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus

efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria Estadual do Meio Ambiente – RS, p. 9, em vigor desde 24 de novembro de 2006.

CRUZ, J. G. H.; MENEZES, J. C. S. S.; RUBIO, J.; SCHENEIDER, I. A. H. Aplicação de coagulante vegetal à base de tanino no tratamento por coagulação/floculação e adsorção/coagulação/floculação do efluente de uma lavanderia industrial. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES**, 2005.

DASBRASIL. Dynamic aqua science do Brasil. Disponível em: <http://www.dasbrasil.com.br/>. Acesso em: 05/02/2007.

DUCOSTE, J. J.; CLARK, M. M.; The influence of Tank Size and Impeller Geometry on Turbulent Flocculation: I. Experimental. **Environmental Engineering Science**, 15 (3), p. 215-224, 1998.

FÉRIS, L. A.; GALLINA, C.W.; RODRIGUES, R.T.; RUBIO J. Optimizing dissolved air flotation design and saturation. **Wat. Sci. Tech.**, 43 (8), p. 145-157, 2001.

FÉRIS, L. A.; RUBIO, J. Dissolved air flotation (FAD) performance at low saturation pressures. **Filtration Separation**, 36 (9), p. 61-65, 1999.

FILIPPOV, L. O. Bubbles spargers in column flotation: Adaptation to precipitate flotation. **Minerals Engineering**, v.13 (1), p. 37-51, 2000.

FINCH, J. A.; GÓMEZ, C. O.; HÉRNANDEZ, H. Gás dispersion and de-inking in a flotation column. **Minerals Engineering**, v. 16 (8), p. 739-744, 2003.

FINCH, J. A. Column flotation: A selected review – Part IV: Novel flotation devices. **Minerals Engineering**, v. 8 (6), p. 587-602, 1994.

GODINHO. Relatório interno empresa de transportes coletivos Viamão Ltda. Relatório não publicado, Viamão-RS, 2003.

GROHMANN, A.; REITER, M.; WIESMANN, U. New flocculation units with high efficiency. **Wat. Sci. Tech.**, 13, p. 567-573, 1981.

HAMADA, T., MIYAZAKI, Y. Reuse of carwash water with a celluloseacetate ultrafiltration membrane aided by flocculation and activated carbon treatments. **Desalination**. v. 169 (3), p. 257-267, 2004.

HART, K. Keep Legionella out of your customer's reclaim system. **Water Technology**. 2001. Disponível em <<http://waternet.com/article.asp?IndexID=6631879>>. Acesso em: 15 jul. 2007.

HUANG, P.C.Y., WU, Y.C., OU, K.C., BORNHOLM, J.K. (1984) Physicochemical treatment of washrack wastewater. Industrial waste conference, 39., est. Lafayette. **Proceedings**. Ann Arbor Science. p.1-6.

IDELCHIK, I. E. Resistance to Flow with Changes of the Stream Direction. In: IDELCHIK, I. O. **Handbook of Hydraulic Resistance**. Nova York: Begell House, 1996. p. 331-412.

JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; GREGORY, J.; PARSONS, S. A. A review of floc strength and breakage. **Water Research**, 39, p. 3121-3137, 2005.

JÖNSSON, C., JÖNSSON, A.S..The influence of degreasing agents used at car washes on the performance of ultrafiltration membranes. **Desalination**, 100, P. 115-123. 1996.

KÄRCHER. Kärcher industrial e comércio Ltda. Disponível em: <http://www.karcher.com.br/>. Acesso em: 05/02/2007.

KIURU, H. J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). **Water Science and Technology**, v.43 (8), p. 1-7, 2001.

LEAL, F. C. T., LIBÂNIO, M. Estudo da redução de cor por coagulação química no tratamento convencional de águas de abastecimento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 7 (3), p. 117-128, jul/set 2002.

LI, T.; ZHU, Z.; WANG, D.; YAO, C.; TANG, H. The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs. **Int. J. Miner. Process.** 82, p. 23-29, 2007.

LINS, F. F.; ADAMIAN, R. **Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais**. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 29 p., 2000.

LMQUIMICA. Disponível em: <http://www.lmquimica.com.br/>. Acesso em: 20/08/2007.

LOGAN, B. E.; JOHNSON, C. P.; LI, X. Settling velocities of fractal aggregates. **Environ. Sci. Technol.**, 30, p. 1911-1918, 1996.

MAESTRI, Rogério Dornelles. **Hidráulica**. 1º edição. Porto Alegre: Gráfica UFRGS, 2004.

MAGALHÃES, A. F. R. Proposição, implantação, partida e ajustes de reatores biológicos e físico-químicos para tratamento e reciclagem de efluentes de lavadores de veículos em escala real. Dissertação de Mestrado, 106 p. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP. Orientador: Carlos Gomes da Nave Mendes, 2005.

METCALF e EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. Editores: Tchobanoglous, G.; Burton, F. L.; Stensel, H. D. Metcalf e Eddy, Inc., McGraw Hill, 4th Edition, 1819 p., 2003.

METCALF & EDDY. **Water Reuse: Issues Technologies, and Applications**. Editores: Asano, T.; Burton, F. L.; Leverenz, H. L.; Tsuchihashi, R.; Tchobanoglous, G. Metcalf & Eddy, Inc., MacGraw-Hill, 1st Edition, 1570 p., 2006.

MORELLI, E. B. **Reúso de água na lavagem de veículos**. Dissertação de Mestrado, p. 92. Escola Politécnica da USP. Orientador: Ivanildo Hespanhol, 2005.

NATURALTEC. Naturaltec[®] técnicas compactas em tratamento de água e ar. Disponível em: <http://www.naturaltec.com.br/>. Acesso em: 05/02/2007.

OWEN, A. T., FAWELL, P. D. SWIFT, J. D., LABBETT, D. M., BENN, F. A., FARROW, J. B. Factors affecting the polymer-bridging flocculation of mineral systems in turbulent pipe flow. A paper for submission to: International Journal of Mineral Processing, 2007.

PARK, K.; CHO, J. M.; CHUNG, K. Experimental and modeling evaluation of upward and downward velocities in the coaxial flotation column. **Water Science and Technology**, 43 (8), p.195-201, 2001.

PARKER, D. S.; KAUFMAN, W. J.; JENKINS, D. Flocc breakup in turbulent flocculation processes. **J. San. Eng. Div.: Proc. Am. Soc. Civ. Eng.** SA 1, p. 79-99, 1972.

PAXÉUS, N. Vehicle washing as a source of organic pollutants in municipal wastewater. **Water Science and Technology**, 33 (6), p. 1-8. 1996.

PEAVY, H. S. **Environmental Engineering**. Nova York: Mac GrawHill Book, p. 699, 1986.

PRIOR, S. (2000). **Wastewater Treatment Should Cater to Carwash's Needs**. Disponível em: <<http://www.moderncarcare.com/Articles/0a1feat1.html>>, Acesso em: 20 jun. 2007.

RAJAT, K.; CHAKRABORTI, R.; ATKINSON, J. e BENSCHOTEN, J. Characterization of Alum Flocc by Image Analysis. **Environ. Sci. Technol.**, v. 34 (18), 3969-3976, 2000.

RODRIGUES, R. T. Desenvolvimento da técnica LTM-BSizer para caracterização de bolhas e avaliação de parâmetros no processo de flotação. Tese de Doutorado, p. 115. PPGEM-UFRGS. Orientador: Jorge Rubio, 2004.

ROSA, J. J.; BEAL, R. C.; RUBIO, J. Tratamento e recirculação da água de lavagem de veículos da Cia. Carris, Porto-Alegrense. Relatório final de convênio não publicado, LTM-UFRGS/CARRIS, 2001.

RUBIO, J.; RODRIGUES, R. T. DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. **Int. J. Miner. Process.**, 82, p. 1-13, 2007.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. **Minerals Engineering**, 15, p. 139-155, 2002a.

RUBIO, J. Unconventional flocculation and flotation. In: Flotation and Flocculation: From Fundamentals to Applications. **Proceedings...** Strategic Conference and Workshop, Hawaii, 2002, Edited by J. Ralston, J. Miller and J. Rubio, p.17-32, 2002b.

RUBIO, J., ROSA, J.J., BEAL, R. Tratamento e recirculação de águas de lavagem de veículos, Patente Brasileira, INPI: 0006390, 2003.

RUBIO, J., CARISSIMI, E. Advances in Particulates Aggregation-Flotation separation. **Anais...** Centenary of Flotation Symposium, Brisbane, Australia, 6-9 de junho 2005.

RUBIO, J., CARISSIMI, E. e ROSA, J. J. Flotation in water and wastewater treatment and reuse: recent trends in Brazil. **Int. J. of Environment and Pollution**, Vol 30, No 2, 2007.

SANDET. Sandet química Ltda. Disponível em: <http://www.sandet.com.br/>. Acesso em: 20/08/2007.

SARTORI, M. Caracterização hidrodinâmicas de flocladores tubulares helicoidais por meio de simulação numérica tridimensional. Dissertação de mestrado da Universidade Federal do Espírito Santo. Orientador: Prof. Edmilson Costa Teixeira, 106p., 2006.

TEIXEIRA, P. C. Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de lavagem de veículos visando à reciclagem da água. Dissertação de mestrado FEC-UNICAMP. Orientador: Carlos Gomes da Nave Mendes. 2003.

THOMAS, D. N.; JUDD, S. J.; FAWCETT, N. Flocculation modeling: a review. **Water Research**, v. 33 (7), p. 1579-1592, 1999.

TESSELE, F.; MONTEGGIA, L.O.; Rubio, J. Treatment of municipal wastewater UASB reactor effluent by unconventional flotation and UV disinfection. **Water Science and Technology**, v. 52 (1-2), p.315-322, 2005.

YEUNG, A.; PELTON, R. Effect of shear on strength of polymer-induced flocs. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 196 (1), p. 113-115, 1997.

APÊNDICES

**Apêndice A – Desenho técnico dos reatores de coagulação – floculação
hidráulicos em linha**

Apêndice A.1 – SR 1

Apêndice A.2 – SL 1

Apêndice A.3 - RGF

Apêndice B – Desenho técnico dos módulos constituintes da coluna de flotação

Apêndice B.1 – Módulo constituinte da coluna de flotação

Apêndice B.2 – Módulo constituinte da coluna de flotação com adaptação para coleta de material flotado (calha)