

## II-346 - TRATAMENTO DE EFLUENTES DE TERMINAL INTERMODAL RODOFERROVIÁRIO VIA FLOCULAÇÃO-FLOTAÇÃO EM COLUNA VISANDO O REÚSO DE ÁGUA NA LAVAGEM DE LOCOMOTIVAS

**Ramiro Gonçalves Etchepare<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental. Mestrando no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

**Rafael Newton Zaneti**

Engenheiro Civil. Doutorando no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

**Renato Gustavo Mota Monteiro de Oliveira**

Graduando em Engenharia Química na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

**Jorge Rubio**

DIC, MPhil e Ph.D em Mineral Resources Engineering - Imperial College, University of London. Pós-doutorados na University of Clarkson-New York e University of California. Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-Engenharia de Minas e no PPGE3M. Coordenador do LTM-Prêmio Finep de Inovação: [www.ufrgs.br/ltm](http://www.ufrgs.br/ltm).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Bento Gonçalves, 9500– Bairro Agronomia–Porto Alegre - RS - CEP: 91501-970 - Brasil - Tel: +55 (51) 33089479 - Fax: +55 (51) 33089977 - e-mail: [jrubio@ufrgs.br](mailto:jrubio@ufrgs.br)

### RESUMO

O processo de floculação-flotação em coluna, seguido por filtração em leito fixo de areia (FFC-A) foi aplicado para o tratamento de efluentes de lavagem de um terminal intermodal rodoferroviário – posto de manutenção de locomotivas, visando o reúso de água. O estudo de caracterização do efluente, com amostras coletadas após uma caixa separação água-óleo (SAO), mostrou o elevado potencial poluidor do mesmo, e o não enquadramento dos parâmetros pH, DQO, DBO, sólidos suspensos, óleos e graxas, surfactantes, sulfeto e fósforo nos limites de emissão local. O processo FFC-A foi eficiente na remoção/redução dos parâmetros turbidez (97%), sólidos suspensos (91%), DQO (76%), DBO (70%), fósforo (80%), sulfeto (76%) e óleos e graxas (51 %). Os resultados mostraram que os reagentes: cloreto de polialumínio – PAC e tanino – Tanfloc SL, aumentam a concentração de sólidos dissolvidos e cloretos em função de ciclos de água. O incremento dessas substâncias confere um limitante à prática de reciclagem de água associado a uma possível aceleração no processo de corrosão dos veículos. Foi realizado um polimento em bancada com carvão ativado (3kg.m<sup>-3</sup>, pH natural, tempo de reação de 30 min) do efluente tratado em campo via FFC-A, possibilitando o enquadramento aos limites de emissão para DQO, DBO e surfactantes. A presença de coliformes totais e fecais no efluente bruto e tratado via FFC-A, indicam a necessidade de processo de desinfecção para fins de reúso/reciclo de água.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transporte intermodal, reúso de água, lavagem de locomotivas, flotação em coluna, balanço de massa.

### INTRODUÇÃO

As maiores preocupações ambientais no setor de transportes hoje são o consumo energético, a queima de combustíveis e a emissão de gases de efeito estufa. Menor atenção vem sendo dispensada aos impactos gerados pela atividade de lavagem de veículos. Terminais intermodais e plataformas logísticas, por frequentemente possuírem postos de lavagem de veículos pesados (caminhões, ônibus, aviões, locomotivas e outros), são exemplos de empreendimentos que, além de consumirem altas quantidades de água, geram efluentes de alto potencial poluidor.

Os sistemas separadores água/óleo (SAO) são os dispositivos mais utilizados no tratamento para descarte das águas residuárias da lavagem de veículos. No Rio Grande do Sul, a única exigência feita aos postos de lavagem de veículos (empresas de transporte ou comerciais) é a instalação de caixas separadoras de óleo e areia antes do descarte da água residuária. Entretanto, Paxéus (1996) reporta uma baixa eficiência da SAO na redução das concentrações de óleos e graxas. Segundo o autor, a alta concentração de surfactantes no efluente promove a emulsificação do óleo, dificultando a separação das fases por gravidade.

Huang et. al (1984) reportaram resultados de análises de efluentes gerados em diversos postos de lavagem de veículos pesados do exército americano. Os autores destacam a grande variabilidade nos seguintes parâmetros analisados: sólidos totais ( $570\text{--}12.900\text{ mg.L}^{-1}$ ), DQO ( $64\text{--}3.400\text{ mg.L}^{-1}$ ), carbono orgânico total – COT ( $24\text{--}1700\text{ mg.L}^{-1}$ ), óleos e graxas ( $20\text{--}8.700\text{ mg.L}^{-1}$ ), detergentes ( $0\text{--}2\text{ mg.L}^{-1}$ ) e pH (2-12). Uma vez descartado sem tratamento prévio, estes efluentes podem ser extremamente tóxicos a vida aquática. O reúso/reciclo de água na lavagem de veículos surge como uma prática atrativa, uma vez que além de diminuir o consumo de água, reduz a emissão de poluentes aos corpos hídricos, prevenindo a poluição.

Os processos de tratamento mais reportados em literatura para tratamento e reúso/reciclo de efluentes de lavagem de veículos são: nanofiltração (Boussu et al., 2007), ultrafiltração (Jönsson e Jönsson, 1996), ultrafiltração e filtração em carvão ativado (Hamada e Miyazaki, 2004), oxidação eletroquímica (Panizza e Cerisola, 2010), tratamento biológico, floculação-sedimentação e floculação-flotação em coluna (FFC - Rubio e Zaneti, 2009). Zaneti et al. (2011) aplicaram o processo FFC seguido de filtração em areia e cloração (FFC-AC) em um sistema de reciclagem de água na lavagem de carros. O estudo mostrou um alto potencial do processo neste tipo de aplicação, com um percentual de reciclagem de água (clarificada e livre de odor) próximo a 70%.

O objetivo deste trabalho foi aplicar o processo de floculação-flotação em coluna seguida de filtração em areia (FFC-A) para o tratamento dos efluentes de um típico terminal intermodal rodoferroviário. Foram realizados estudos de caracterização do efluente gerado em um posto de manutenção de locomotivas (PML), estudaram-se diferentes reagentes e condições físico-químicas de tratamento, avaliou-se a eficiência do processo FFC-A em campo e estudos de polimento em bancada do efluente tratado foram conduzidos. Foi discutida a viabilidade de aplicação de reúso/reciclo de água na lavagem de locomotivas em função das características estéticas, químicas e microbiológicas da água de reúso a ser empregada.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização do efluente

Os efluentes em estudo foram gerados em um terminal intermodal rodoferroviário (posto de manutenção de locomotivas – PML) de uma empresa de logística, no município de Canoas/RS. As principais operações realizadas no PML são a lavagem de locomotivas e peças, e a lavagem do piso da área de manutenção. Estes efluentes são coletados por canaletas no piso, e direcionados por gravidade para um dispositivo de separação água-óleo (SAO). Foram realizadas amostragens em um período de 5 meses para a caracterização do efluente gerado no PML. O ponto de amostragem foi a saída da SAO (ponto de amostragem 1 – Figura 1).

Foram analisados os seguintes parâmetros: DQO, DBO, óleos e graxas, surfactantes, sulfetos, fósforo total, nitrogênio total, metais (cádmio, cromo, zinco, chumbo, mercúrio, manganês, arsênio, ferro, alumínio, cobre, níquel), COT, pH, turbidez, cloreto, condutividade e sólidos (suspensos e dissolvidos). Os métodos de análise utilizados seguiram os procedimentos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005). As concentrações de cloreto foram determinadas por cromatografia iônica.

### Reagentes

Os reagentes empregados no tratamento de efluentes foram de qualidade comercial. Foram utilizados: HCl, NaOH,  $\text{Ca(OH)}_2$ , cloreto de polialumínio (PAC), tanino catiônico (Tanfloc SL, fornecido pela Tanac S.A.), poliacrilamida catiônica (Flonex 9045), poliacrilamida aniônica (Flonex 905), NaClO (hipoclorito de sódio) e carvão ativado pulverizado (CAP, com área superficial de  $702\text{ m}^2.\text{g}^{-1}$  pelo método BET). Na lavagem das locomotivas e peças foram utilizados desengraxantes, xampus e óleo diesel.

### Estudos de coagulação-floculação em bancada

Foram realizados ensaios de coagulação-floculação em um aparelho “Jar-Test” para determinação das condições ideais de processo e para estimativa da concentração de parâmetros de interesse em função de ciclos de água. Investigou-se o pH ideal de processo, a concentração ótima dos coagulantes elegidos (PAC e Tanfloc SL), e o tipo e dosagem de polímero floculante (catiônico e aniônico).

Testes de jarros foram realizados com alíquotas de 1 L de efluente. Foi empregada agitação rápida por 1 min (rotação de 120 rpm), seguida de agitação lenta por 5 min em 40 rpm. Após a agitação, foi mantido repouso

por 10 min para sedimentação dos flocos. Alíquotas foram coletadas do líquido clarificado sobrenadante com pipetas volumétricas para análise dos parâmetros de interesse.

### Balanco de massas

Foi aplicado balanço de massas para estimar a concentração de parâmetros de interesse na água de reúso, em função dos ciclos de água no sistema (Morelli, 2005). As variáveis de interesse para o cálculo são os sólidos dissolvidos totais (SDT) e o cloreto. Estes parâmetros são considerados críticos em sistemas de reciclagem de água em lavagem de veículos, pois o incremento em seus valores (aumento de concentração) pode provocar manchas nos veículos na ocasião da secagem e contribuir para processo de corrosão.

Um ciclo de água é contabilizado toda vez que o volume de água utilizado nos processos de lavagem ultrapassa a capacidade máxima de armazenamento do sistema (Zaneti et al., 2011). Para o cálculo do balanço de massa, foi estimada uma capacidade de armazenamento de 10 m³ e fixado um percentual de reciclagem de água de 70%. Foram assumidas as seguintes hipóteses: a carga de sais ao sistema é constante em função dos ciclos (Equação 2) e não ocorrem perdas de água (Equação 3). As Equações (1) e (2) relacionam a concentração dos parâmetros de interesse com os ciclos de água no sistema:

$$C_{Ri+1} = \frac{CS + (F \cdot V_{Li} \cdot C_{Ri} + (1 - F) \cdot V_{Li} \cdot C_N)}{V_{Li}} \quad \text{Equação (1)}$$

$$CS = V_{Li} \cdot (C_1 - C_N) \quad \text{Equação (2)}$$

$$V_{Ei} = V_{Li} = F \cdot V_{Ri} + (1 - F) \cdot V_{Ni} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$C_{Ri}$  e  $C_{Ri+1}$  (mg.L<sup>-1</sup>) = Concentrações do parâmetro de interesse na água de reúso no ciclo  $R_i$  e  $R_{i+1}$  –  $i = 1, \dots, n$ ;  
 $CS$  (mg) = Carga de entrada do parâmetro de interesse devido a adição de reagentes de lavagem (xampu-detergente, desengraxante, etc.) e de tratamento de água (coagulante/floculante e soda);

$F$  = fator de reciclagem de água (entre 0 e 1);

$V_{Li}$  (L) = Volume de água utilizado na lavagem;

$V_{Ei}$  (L) = Volume de efluente gerado na lavagem;

$V_{Ni}$  (L) = Volume de água nova;

$C_N$  (mg.L<sup>-1</sup>) = Concentração do parâmetro de interesse na água nova.

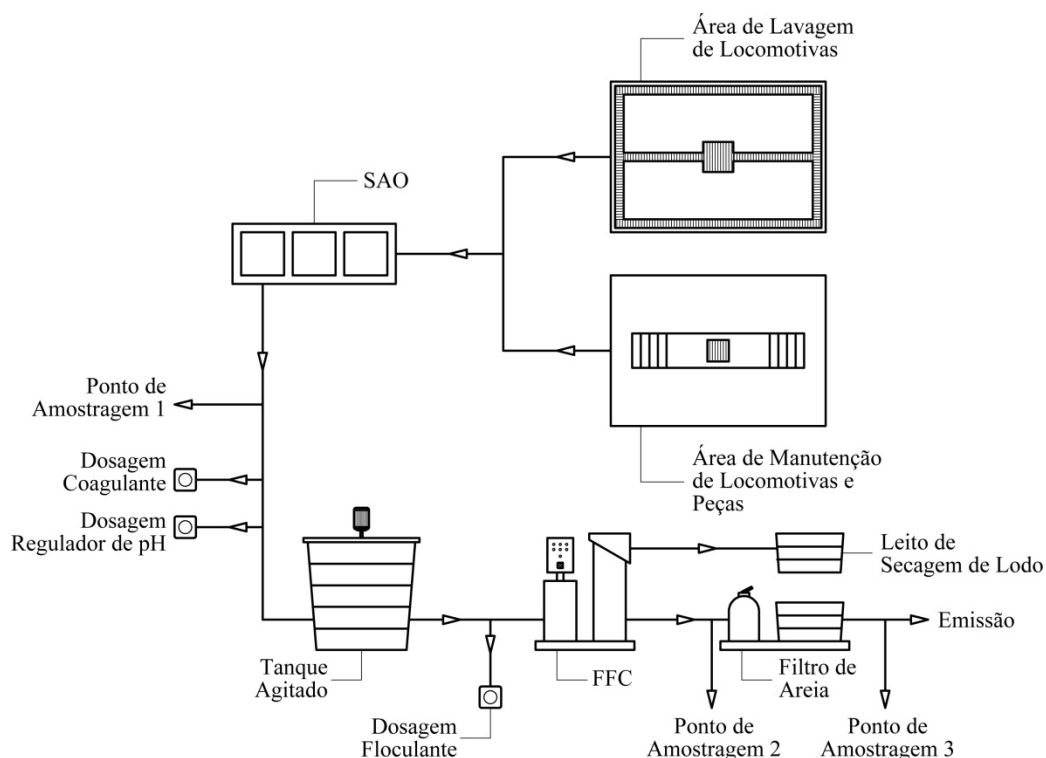
### Validação em campo do tratamento de efluente do PML via FFC-F

Após o dispositivo de separação água-óleo, foi instalado um sistema de tratamento piloto composto por um tanque agitado e um equipamento de floculação flotação em coluna, seguido de filtro de areia - FFC-A (Figura 2). As características hidráulicas e construtivas do sistema são mostradas na Tabela 1.

O efluente da SAO era direcionado por bombeamento para o tanque agitado, onde foi homogeneizado (agitação por 10 min) e cloreto de polialumínio (PAC) adicionado. Soda comercial foi utilizada como regulador de pH. O efluente seguia por gravidade para o equipamento FFC-A (fluxograma da Figura 1). As principais unidades e características do processo FFC-F são o sistema de floculação hidráulica empregado, a geração de bolhas (bomba centrífuga multifase), o tamanho das bolhas e flocos e a coluna de flotação para separação sólido-líquido. A etapa de floculação emprega um dispositivo de fluxo pistão em linha – o reator gerador de flocos (RGF; Carissimi e Rubio, 2005), que proporciona uma eficiente floculação com um alto gradiente de velocidade ( $G$ ) em um curto tempo de residência (Grohmann et al., 1981; Gregory, 1987), reduzindo assim o Número de Camp ( $G \times t_r$ ) e consequentemente o consumo energético. Ainda, este floculador de fluxo pistão promove um rápido e eficiente contato floco/bolha (Finch, 1995; Rosa e Rubio, 2005; Carissimi e Rubio, 2005), gerando os chamados flocos aerados (Oliveira et al., 2010).

**Tabela 1. Características hidráulicas e construtivas do processo FFC-F.**

Unidade de agitação e coagulação	
Diâmetro inferior (reservatório), m	1,2
Diâmetro superior (reservatório), m	1,54
Altura (reservatório), m	1,1
Gradiente de velocidade (agitação), $s^{-1}$	1000
Unidade de geração de bolhas (bomba centrífuga multifase)	
Saturação completa do fluxo	Sim
Vazão de reciclo, %	0
Pressão de saturação, atm	20-30
Válvula agulha, in	0,5
Unidade de floculação(RGF)	
Diâmetro tubo, m	0,0254
Comprimento, m	12
Tempo de retenção (tr), s	22
Perda de carga, atm	0,85
Gradiente de velocidade (G), $s^{-1}$	660
Número de Camp	14520
Unidade de flotação (coluna)	
Diâmetro, m	0,4
Área, $m^2$	0,12
Altura, m	1,8
Volume útil, $m^3$	0,216
Unidade de filtração (filtro de areia)	
Diâmetro de grãos, mm	3-4
Vazão de tratamento, $m^3.h^{-1}$	3
Tempo de retenção (tr), s	60
Taxa de aplicação, $m.h^{-1}$	60



**Figura 1: Fluxograma do sistema de tratamento piloto proposto no PML**

Para avaliação da estabilidade do processo em tempos longos, foram realizados ensaios em bateladas de 1,3m<sup>3</sup>. Foram coletadas três (3) amostras após a coluna de flotação (ponto de amostragem 2 – Figura 1), em intervalos de 26 min, empregando uma vazão de tratamento de 1m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Foi escolhido este tempo entre amostras, uma vez que este é equivalente ao tratamento de 0,43m<sup>3</sup> de efluente - duas vezes o volume útil da coluna de flotação (Tabela 1). As amostras foram analisadas para turbidez e sólidos suspensos. No instante final dos ensaios, foram recolhidas amostras após o filtro de areia, visando determinar a eficiência geral do processo FFC-A. Os ensaios foram realizados em duplicata.

Ao longo de três meses, a eficiência de tratamento do sistema empregado foi avaliada na redução/remoção de substâncias diversas (amostragens simples e compostas do efluente bruto e tratado/final). Amostras simples foram utilizadas para análise de pH, óleos e graxas, sulfeto, coliformes fecais e totais; e as compostas para DQO; DBO<sub>5</sub>; sólidos suspensos e dissolvidos; cloreto; turbidez; condutividade; fósforo e surfactantes.



**Figura 2: lavagem de locomotiva (à esquerda) e equipamento FFC-A (à direita)**

### **Polimento em bancada do efluente tratado em campo via FFC-F**

Foram realizados ensaios (duplicatas) de adsorção com carvão ativado em amostras do efluente tratado em campo pelo processo FFC-A. Foram estudados os efeitos dos seguintes fatores: cinética (tempo), pH e concentração de adsorvente (carvão ativado). A eficiência de polimento foi avaliada pela redução/remoção de COT (Carbono Orgânico Total), DQO, DBO, cloreto, condutividade e surfactantes.

Para a condução dos ensaios foi utilizado um agitador orbital, com agitação fixada em 50 rpm. Foram adicionadas massas de carvão ativado pré-determinadas em amostras de 100 mL do efluente. Após a agitação, as amostras foram imediatamente filtradas em membranas de fibra de vidro, com porosidade de 1,2 µm, e o líquido filtrado foi utilizado nas análises dos parâmetros de interesse.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As características do efluente podem ser visualizadas na Tabela 2 em confronto com o padrão de emissão local imposto pela Resolução Consema n.º128/2006. Observa-se uma grande variação temporal na carga do efluente. O efluente apresenta um pH alcalino e baixa biodegradabilidade - alta relação DQO/DBO. A elevada carga orgânica, a concentração óleos e graxas, sólidos em suspensão e surfactantes estão dentro do intervalo reportado por Huang et al. (1984) e algumas destas características favorecem o tratamento físico-químico por floculação-flotação em coluna (Rubio e Zaneti, 2009).

Dentro dos padrões exigidos para emissão em corpos d'água no Rio Grande do Sul, o efluente bruto não se enquadra nos limites de pH, DQO, DBO, sólidos suspensos, óleos e graxas, surfactantes, sulfeto e fósforo, conferindo potencial poluidor aos corpos receptores. Metais pesados não foram detectados, e a presença de organismos do grupo coliforme indica a necessidade de desinfecção do efluente para fins de reúso de água.



Os poluentes presentes no efluente são oriundos das sujidades e dos insumos (detergentes, óleos e xampus) empregados nos processos de lavagem e manutenção das locomotivas e peças, e dos contaminantes liberados durante estes processos.

**Tabela 2: Parâmetros analisados para caracterização do efluente bruto**

Parâmetro	Média $\pm \frac{1}{2}$ desvio padrão	Número de observações	Padrão de emissão local
DQO, $\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$	1608 $\pm$ 774	7	400
DBO <sub>5</sub> , $\text{mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$	525 $\pm$ 173	7	180
COT, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	329 $\pm$ 114	5	-
pH	9,1 $\pm$ 0,8	7	Entre 6 e 9
Surfactantes totais, $\text{mgMBAS} \cdot \text{L}^{-1}$	17 $\pm$ 11	7	2
Óleos e graxas totais, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	63 $\pm$ 57	7	10
Sulfeto, $\text{mgS}^{-2} \cdot \text{L}^{-1}$	1,4 $\pm$ 0,7	7	0,2
Fósforo total, $\text{mgP} \cdot \text{L}^{-1}$	4,6 $\pm$ 2,1	7	4
Nitrogênio total kjedahl, $\text{mgNTK} \cdot \text{L}^{-1}$	8,2 $\pm$ 3,1	7	20
Sólidos suspensos totais (SST), $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	249 $\pm$ 118	7	180
Sólidos dissolvidos totais (SDT), $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1004 $\pm$ 240	7	-
Condutividade, $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	986 $\pm$ 140	7	-
Cloretos, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	72 $\pm$ 5,7	5	-
Turbidez, NTU	449 $\pm$ 259	7	-
Coliformes totais, NMP.100mL <sup>-1</sup>	366690 $\pm$ 533324	7	-
Coliformes fecais, NMP.100mL <sup>-1</sup>	244722 $\pm$ 38722	7	100.000
Alumínio total, mg Al/L	0,355	1	10
Arsênio total, mg As/L	<0,01	1	0,1
Chumbototal, mg Pb/L	0,053	1	0,2
Cobre total, mg Cu/L	0,064	1	0,5
Cromo total, mg Cr/L	0,019	1	0,5
Cádmio total, mgCd/L	<0,001	1	0,1
Ferro total, mg Fe/L	1,89	1	10
Manganês total, mg Mn/L	0,051	1	1
Mercurio total, mg Hg/L	<0,0005	1	0,01
Níquel total, mg Ni/L	<0,01	1	1
Zinco total, mg Zn/L	0,176	1	2

Na Tabela 3, resultados obtidos em ensaios de tratamento do efluente com diferentes reagentes de coagulação-Tanfloc SL e PAC – são confrontados. As condições foram otimizadas para garantir uma turbidez residual menor que 15 NTU. Esta condição estética é recomendada por Jefferson et al. (2004) para aceitabilidade pública de reúso de água na lavagem de veículos.

**Tabela 3: Resultados médios (duplicata) dos ensaios de coagulação-floculação em bancada.**

Amostra	pH inicial	Turbidez inicial (NTU)	Coagulante		Floculante - Poliacrilamida catiônica ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Turbidez final (NTU)	pH final
			Tanfloc ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	PAC ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )			
1	9,8	134	200	-	-	8,5	7,1
	9,8	134	-	200	5	3	7
2	11,2	1150	-	1300	5	1	6,7
3	8,4	1070	-	750	5	1	7
4	8,5	530	2500	-	-	2	7,5
	8,5	530	-	400	5	7,5	7,4

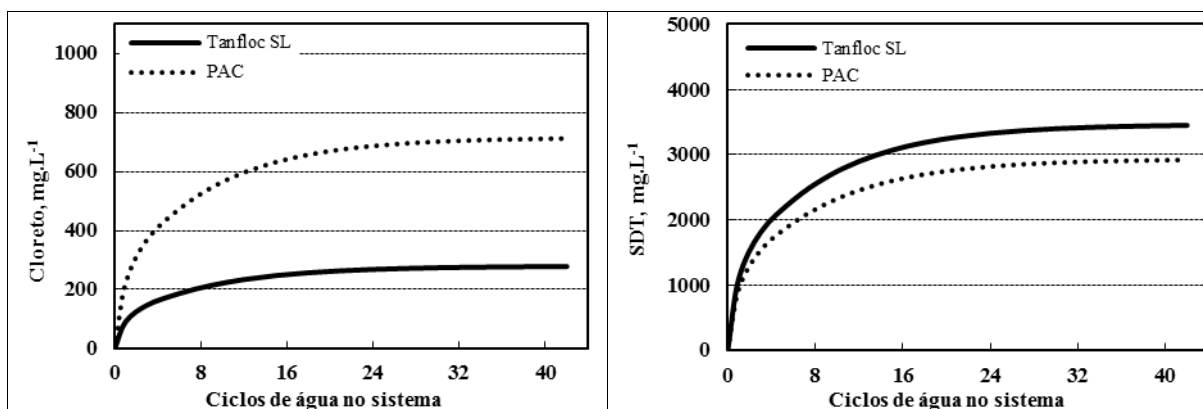
A faixa de pH de coagulação ideal observada para o Tanfloc SL foi 6,8 - 7,2. Este reagente possui alumínio em sua composição, e não é necessária a utilização de polímero como auxiliar de floculação. Zaneti et al. (2011) utilizaram este reagente na clarificação de efluentes de lavagem de carros, apresentando uma alta eficiência na redução de turbidez (sempre abaixo de 15 NTU no efluente tratado). Entretanto, no presente

estudo, o Tanfloc SL apresentou boa clarificação somente para duas das quatro amostras de efluentes utilizadas, e coagulação deficiente, mesmo em dosagens acima  $5.000 \text{ mg.L}^{-1}$  (turbidez residual média acima de 100 NTU), para as demais amostras. Esta perda de eficiência pode estar associada a grande variabilidade temporal do efluente e, de acordo com Fang (2007), a uma elevada carga orgânica.

O cloreto de polialumínio (PAC), apresentou uma faixa de pH de coagulação ideal variando de 8 a 8,5, e em concentrações otimizadas, obteve boa eficiência de redução de turbidez (residual de 10 NTU) para as 4 amostras utilizadas. O floculante com melhor desempenho foi a poliacrilamida catiônica (Flonex 9045) em uma concentração fixa de  $5 \text{ mg.L}^{-1}$ . Estes reagentes foram escolhidos para a aplicação em campo nos ensaios de validação do processo FFC-F.

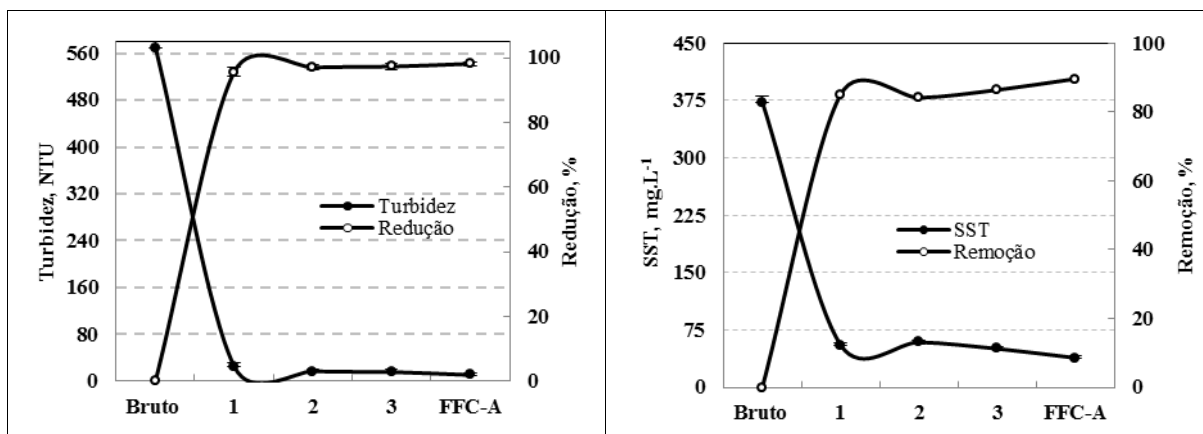
A Figura 3 mostra os resultados da aplicação do balanço de massa. As concentrações utilizadas nos ensaios *Jar-Test* de Tanfloc SL e PAC foram otimizadas para garantir uma clarificação abaixo de 15 NTU de turbidez. Observa-se que quando do emprego de Tanfloc SL, as concentrações de cloreto e sólidos dissolvidos estabilizam em  $300 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $3.500 \text{ mg.L}^{-1}$ , respectivamente. Na utilização de PAC, observa-se uma maior concentração de cloreto, que estabilizam um pouco acima de  $700 \text{ mg.L}^{-1}$ , e concentração similar de sólidos dissolvidos, com estabilização em  $3.000 \text{ mg.L}^{-1}$ .

Moreli (2005) e Nace (1975) recomendam concentrações de cloretos e sólidos dissolvidos abaixo de 400 e  $1.000 \text{ mg.L}^{-1}$ , respectivamente, para sistemas de reciclagem de água na lavagem de carros (veículos leves). O presente estudo visa o reúso de água na lavagem de veículos pesados (locomotivas) e, portanto, critérios menos restritivos podem ser efetivos.



**Figura 3: Balanço de massas para os parâmetros cloreto e sólidos dissolvidos totais (SDT) em função dos ciclos de água. Características do efluente: turbidez = 530 NTU; cloreto =  $65 \text{ mg.L}^{-1}$ ; SDT =  $953 \text{ mg.L}^{-1}$ . Tanfloc SL =  $2500 \text{ mg.L}^{-1}$ ; PAC =  $400 \text{ mg.L}^{-1}$  (poliacrilamida catiônica =  $5 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Fator de reciclagem de água = 0,7.**

A estabilidade e eficiência do sistema de tratamento proposto em campo são confirmadas pelos dados da Figura 4, que apresenta os resultados das análises de sólidos suspensos totais (SST) e turbidez do efluente bruto, das alíquotas do efluente tratado via FFC (tempos longos) e do efluente final (tratado via FFC-A). São observadas eficiências de redução/remoção de turbidez e sólidos suspensos sempre acima de 95 e 80 %, respectivamente, tendo sido necessária uma dosagem de PAC de  $800 \text{ mg.L}^{-1}$ .



**Figura 4:** Valores de turbidez, sólidos suspensos totais (SST) e eficiência de tratamento do efluente (bruto) via FFC (alíquotas 1, 2 e 3) e do efluente tratado via FFC-A. Erro experimental  $\pm \frac{1}{2}$  desvio padrão. Volume de efluente tratado por ensaio = 1,3m<sup>3</sup>; taxa de aplicação = 8 m.h<sup>-1</sup> (vazão de alimentação 1m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>); dosagem PAC = 800 mg.L<sup>-1</sup>; faixa de pH de coagulação = 8 - 8,5.

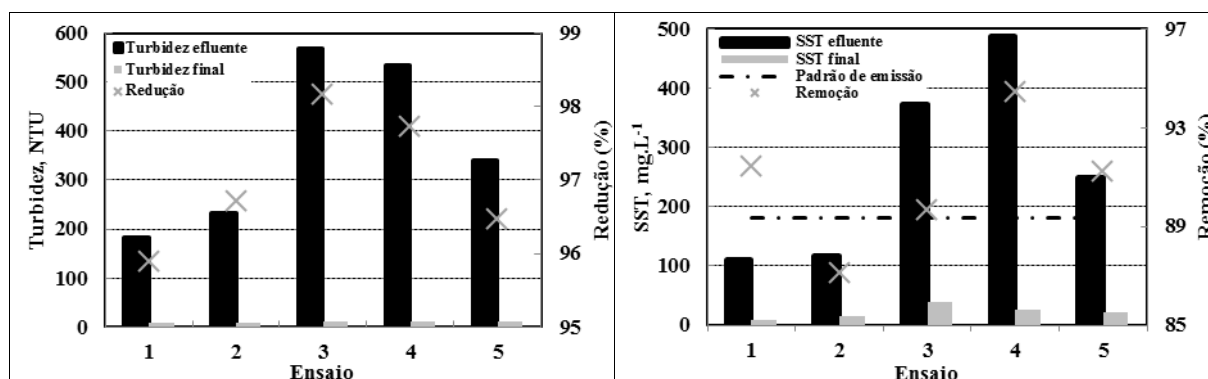
A Tabela 4 e os gráficos das Figuras 5 a 8 mostram os resultados obtidos em campo para diferentes parâmetros de qualidade da água, nos ensaios realizados empregando o processo FFC-A no tratamento do efluente gerado no PML. O tratamento realizado permitiu remover e/ou reduzir: turbidez (97%), sólidos suspensos (91%), carga orgânica (DQO = 76% e DBO = 70%), fósforo (80%), sulfeto (76%) e óleos e graxas (51 %).

**Tabela 4:** Eficiências dos processos FFC e FFC-Ana redução/remoção de poluentes do efluente bruto.

Parâmetro	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5		Padrão local
	B <sup>1</sup>	T <sup>2</sup>	B	T	B	T	B	T	B	T	
pH	8	7,5	8,6	7,7	8,8	7,1	8,7	7,9	8	7,3	6-9
Turbidez, NTU	182	7,5	232	7	570	10	535	12	340	12	-
Condutividade, $\mu\text{S.cm}^{-1}$	851	1252	870	1394	1005	1301	1185	1493	1189	1316	-
Cloreto, mg.L <sup>-1</sup>	77	264	69	255	65	230	90	252	68	207	-
SST, mg.L <sup>-1</sup>	111	9,5	116	15	373	38	487	27	250	22	180
COT, mg.L <sup>-1</sup>	-	-	133	87	262	162	437	223	307	115	-
DQO, mg.L <sup>-1</sup>	860	217	1167	282	3611	551	1882	607	1500	358	400
DBO <sub>5</sub> , mg.L <sup>-1</sup>	511	146	653	172	929	318	660	247	424	187	180
Fósforo, mg.L <sup>-1</sup>	2,6	0,04	3,3	1,7	3,7	0,32	8,8	1,5	3,3	1,6	4
Óleos e graxas, mg.L <sup>-1</sup>	6	5,9	6,4	5	52	8	71	<5	14	<5	10
Sulfeto, mg.L <sup>-1</sup>	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6	0,1	1,1	0,1	0,7	0,1	0,2
Surfactantes, mg.L <sup>-1</sup>	17,3	14	8,6	8	9,5	8,1	5,8	4,8	4,8	4,7	2

<sup>1</sup>Efluente bruto (amostras coletadas após o dispositivo de separação água-óleo)

<sup>2</sup>Efluente tratado (amostras coletadas após o filtro de areia)



**Figura 5:** Redução de turbidez e remoção de sólidos suspensos totais (SST).



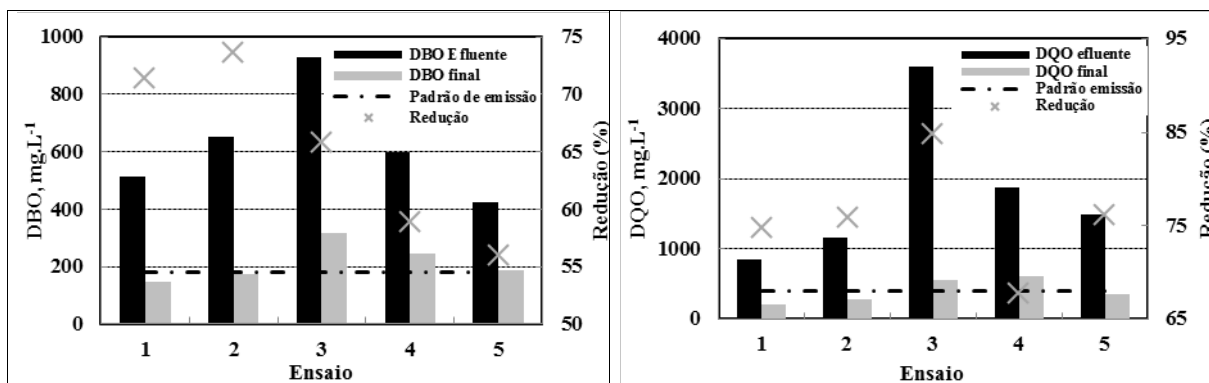


Figura 6: Redução da DBO e DQO.

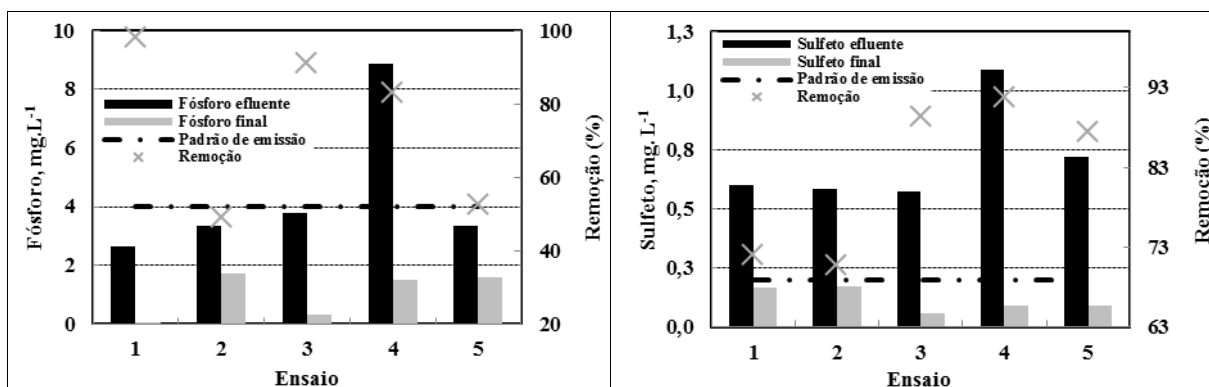


Figura 7: Remoção de fósforo e sulfeto.

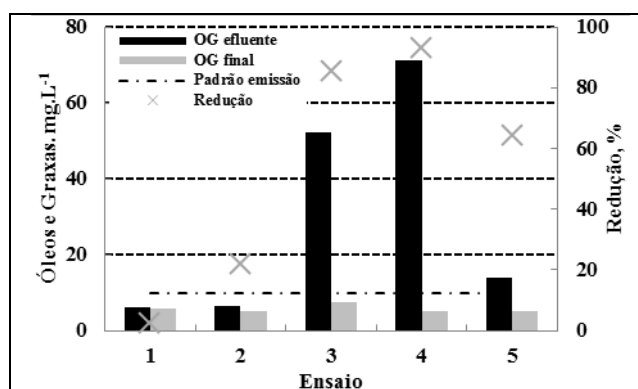


Figura 8: Redução de óleos e graxas (OG).

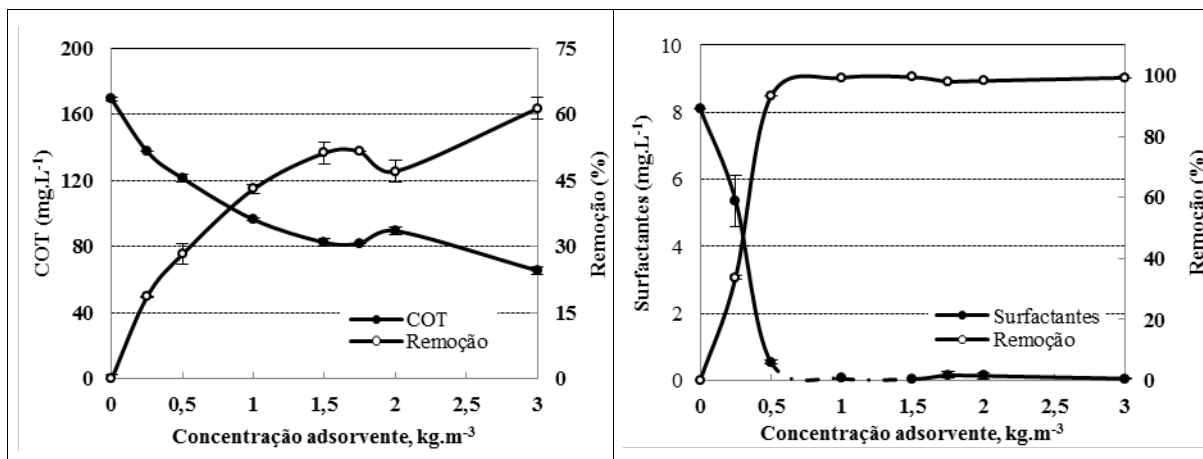
Em alguns ensaios, as concentrações de DQO e DBO ultrapassaram o padrão de emissão local. O parâmetro surfactantes MBAS ficou fora dos limites de emissão por não apresentar eficiência de remoção suficiente (média de 15%), com uma concentração final média de 9 mg.L<sup>-1</sup>.

Foi observada uma alta contagem de coliformes totais e fecais no efluente tratado (Totais - sempre acima de 9200 NMP.100mL<sup>-1</sup>; Fecais - média de 671 NMP.100mL<sup>-1</sup>), confirmando a necessidade de processo de desinfecção para fins de reúso de água. Os limites de emissão não foram ultrapassados (coliformes fecais – 100.000 NMP.100mL<sup>-1</sup>)

A condutividade e concentração de cloreto aumentaram no efluente tratado/final (média de 41 e 244 % de incremento, respectivamente), devido aos reagentes utilizados no tratamento físico químico. Estes reagentes sabidamente entregam sólidos dissolvidos (saís) ao efluente tratado (Metcalf e Eddy, 2006).

A Figura 9 mostra os resultados (médios - duplicata) obtidos nos ensaios em bancada de adsorção com carvão ativado para os parâmetros COT e surfactantes e as respectivas eficiências de remoção. As amostras de efluente tratado pelo processo FFC-A utilizadas são referentes ao Ensaio 3 da Tabela 4.

Inicialmente a concentração do adsorvente foi fixada e a cinética e pH de adsorção variados. Os resultados mostraram não haver influência destes fatores nos parâmetros analisados. Assim, para a avaliação do efeito das diferentes concentrações de adsorvente, foram realizados ensaios fixando o tempo de reação (cinética) em 30 minutos e mantendo o pH natural - 7,2.



**Figura 9: Adsorção com carvão ativado: COT e surfactantes (resultados médios  $\pm 1/2$  desvio padrão) e eficiência de remoção das amostras do efluente tratado via FFC-A. Volume da amostra de efluente tratado por ensaio = 100 mL; pH de tratamento = 7,2; tempo de reação = 30 minutos.**

Foi observada uma eficiência próxima a 100% na remoção de surfactantes a partir de uma concentração de adsorvente de 0,5kg.m<sup>3</sup>. A eficiência de remoção de COT apresentou uma tendência de aumento em função da concentração de adsorvente, atingindo eficiência superior a 60% para concentrações da ordem de 3 kg.m<sup>3</sup>.

Os resultados dos ensaios realizados em bancada com as condições ideais de adsorção com carvão ativado (concentração de 3 kg.m<sup>3</sup>, pH natural, tempo de reação de 30 min) são mostrados na Tabela 5, indicando que o polimento do efluente possibilitou o enquadramento aos limites de emissão estadual para DQO, DBO e surfactantes.

**Tabela 5: Enquadramento do efluente quanto aos padrões de emissão de DQO, DBO e surfactantes.**

Parâmetro	Efluente bruto	Tratado via FFC-A	Polimento com carvão ativado (média $\pm 1/2$ desvio padrão)	Padrão de emissão
DQO, mg.L <sup>-1</sup>	907	255	110 $\pm 5,95$	400
DBO, mg.L <sup>-1</sup>	680	198	33 $\pm 2$	180
Surfactantes, mg MBAS.L <sup>-1</sup>	9,12	4,79	0,165 $\pm 0,025$	2

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

1. As principais características do efluente gerado no terminal intermodal em estudo mostraram uma grande variabilidade temporal, pH alcalino, baixa biodegradabilidade, elevada carga orgânica e concentração de surfactantes, e presença de organismos do grupo coliforme. O efluente não atende aos critérios de emissão nos parâmetros pH, DQO, DBO, sólidos suspensos, óleos e graxas, surfactantes, sulfetos e fósforo. Os poluentes presentes no efluente devem-se às sujidades e aos insumos (detergentes, óleos e xampus) empregados nos processos de lavagem e manutenção das locomotivas e peças, e aos contaminantes liberados durante estes processos.
2. O balanço de massas mostra que os reagentes testados aumentam a concentração de sólidos dissolvidos e cloreto em função de ciclos de água, conferindo um limitante à prática de reciclagem de água, devido a uma possível aceleração no processo de corrosão de superfícies metálicas. Estudos específicos, com testes de corrosão, precisam ser realizados para definição de valores de referência na prática de reciclagem de água na lavagem de veículos pesados.
3. O sistema piloto proposto para o tratamento do efluente gerado no PML (floculação-flotação em coluna, seguida de filtração em areia – FFC-A) foi altamente eficiente na remoção/redução dos parâmetros: turbidez (97%), sólidos suspensos (91%), carga orgânica (DQO = 76% e DBO = 70%), fósforo (80%), sulfeto (76%) e óleos e graxas (51%) disponibilizando um efluente tratado/final

clarificado (turbidez média de 9 NTU). Todos os parâmetros foram enquadrados nos limites de emissão local, com exceção a DQO, DBO e surfactantes.

4. O polimento em bancada com carvão ativado ( $3 \text{ kg.m}^{-3}$ , pH natural, tempo de reação de 30 min) do efluente tratado em campo via FFC-A, possibilitou o enquadramento aos limites de emissão estadual para DQO, DBO e surfactantes.
5. A presença de organismos do grupo coliforme no efluente bruto e tratado via FFC-A, indicam a necessidade de processo de desinfecção para fins de reúso/reciclo de água. Não é recomendado processo de cloração, devendo ser realizados estudos específicos de desinfecção.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Edital MCT nº 18/2009) pelo apoio financeiro, aos alunos, professores e técnicos do Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental – LTM da UFRGS. Especiais agradecimentos a empresas Hidrocicle Ind. e Com. Ltda. e a América Latina Logística que forneceram auxílio técnico e estrutura necessária ao trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21<sup>st</sup> ed. Washington, 2005.
2. BOUSSU, K, KINDTS, K, VANDECASTEELE, C, VAN DER BRUGGEN, B. Applicability of nanofiltration in the carwash industry. Separation and Purification Technology, v.54, p.139-146, 2007.
3. CARISSIMI, E, RUBIO, J. The flocs generator reactor – FGR: a new basis for flocculation and solid-liquid separation. International Journal Mineral Processing, v.75(3-4), p.237-247, 2005.
4. 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.
5. FANG, G. Evaluation and performance of a tannin-based polymer as a coagulant in water treatment. Tese de Doutorado, Imperial College University of London; 2007.
6. FINCH, JA. Column flotation: A selected review - part IV: Novel flotation devices Minerals Engineering, v.8, p.587-602, 1995.
7. GREGORY, J. Laminar dispersion and the monitoring of flocculation processes. Journal of Colloid and Interface Science, v.118, p.397-409, 1987.
8. GROHMANN, A, REITER, M, WIESMANN, U. New flocculation units with high efficiency. Water Science and Technology, v.13, p.567-573, 1981.
9. HAMADA T, MIYAZAKI Y. Reuse of carwash water with a cellulose acetate ultrafiltration membrane aided by flocculation and activated carbon treatments. Desalination, v.169 p.257-267, 2004.
10. HUANG, P.C.Y., WU, Y.C., OU, K.C., BORNHOLM, J.K. Physicochemical treatment of washrack wastewater. Industrial waste conference, p.1-6, 1984.
11. JEFFERSON, B, PALMER, A, JEFFREY, P, STUETZ, R, JUDD, S. Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. Water Science and Technology, v.50, p.157-164, 2004.
12. JÖNSSON C, JÖNSSON A. The influence of degreasing agents used at car washes on the performance of ultrafiltration membranes. Desalination, v.100, p.115-123, 1995.
13. METCALF, EDDY. IN: ASANO, T, BURTON, FL, LEVERENZ, HL, TSUCHIHASHI, R, TCHOBANOGLOUS, G. Water Reuse: Issues Technologies, and Applications. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2006.
14. MORELLI, E. B. Reúso de água na lavagem de veículos. Dissertação de Mestrado-, p. 92. Escola Politécnica-Universidade de São Paulo, 2005.
15. NACE. The corrosivity of recirculation car wash water. NACE publication, v.3N275, p.9-10, 1975.
16. OLIVEIRA, C, RODRIGUES, RT, RUBIO, J. A new technique for characterizing aerated flocs in a flocculation-microbubble flotation system. International Journal of Mineral Processing, v.96, p.36-44, 2010.
17. PANIZZA, GM, CERISOLA, G. Applicability of electrochemical methods to carwash wastewaters for reuse. Part 2: Electrocoagulation and anodic oxidation integrated process. Journal of Electroanalytical Chemistry, v.638, p.236-240, 2010.

18. PÁXEUS, N. Vehicles washing as a source of organic pollutants in municipal wastewater. *Water Science and Technology*, v.33, n.6, p.1-8, 1996.
19. Rosa, JJ, Rubio, J. The FF (Flocculation-Flotation) process. *Minerals Engineering*, v.18, p.701-707, 2005.
20. RUBIO, J, ZANETI, RN. Treatment of washrack wastewater with water recycling by advanced flocculation-column flotation. *Desalination*, v.8, p.146-153, 2009.
21. ZANETI, R.; ETCHEPARE, R; RUBIO, J. Car wash wastewater reclamation: Full-scale application and upcoming features. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011. In Press, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.05.002.