



## FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO PARA REMOÇÃO DE COR EM EFLUENTE DE LAVANDERIA INDUSTRIAL TÊXTIL

---

Leandro Vicente Gonçalves<sup>1</sup>, Ricardo Nagamine Costanzi<sup>2</sup>, Alexei Lorenzetti Novaes Pinheiro<sup>3</sup>, Gustavo de Sotti<sup>4</sup>

1. Pós-Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (leanvgon@yahoo.com.br)
2. Professor Doutor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
3. Professor Doutor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
4. Graduado em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Londrina - Brasil

Recebido em: 12/04/2014 – Aprovado em: 27/05/2014 – Publicado em: 01/07/2014

---

### RESUMO

O presente estudo tem como objetivo a remoção de cor de efluente de lavanderia industrial têxtil pelo processo de flotação por ar dissolvido (FAD). Utilizou-se como metodologia o planejamento experimental do delineamento composto central rotacional (DCCR). Para os ensaios de FAD foi utilizado equipamento em escala de laboratório com alimentação por batelada, denominado flotateste. Os parâmetros avaliados foram: dosagem de coagulante (polímero e policloreto de alumínio) e velocidade de flotação. Os resultados obtidos indicaram que o processo de FAD nas condições estudadas é uma alternativa viável para a remoção de turbidez, cor, sólidos suspensos e DQO com eficiências de remoção de 89,89%, 87,13%, 97,16% e 59,51%, respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Indústria Têxtil; FAD, Processo Físico-Químico;

### DISSOLVED AIR FLOTATION FOR COLOR REMOVAL IN WASTEWATER FROM TEXTILE INDUSTRIAL LAUNDRY

#### ABSTRACT

This study aims to remove the color of textile wastewater of a industrial laundry process by dissolved air flotation (DAF). The methodology uses the central composite rotational design (RCCD) as experimental design. The DAF tests were performed with equipment in laboratory scale with batch feed. This equipment was called Flotatest. The parameters evaluated were: coagulant dosage (polyvinyl polymer and aluminum) and flotation velocity. The results show that the DAF process in the studied conditions is a viable alternative for the removal of turbidity, color, suspended solids and COD. The removal efficiency was 89.89%, 87.13%, 97.13%, and 59,51%, respectively.

**KEYWORDS:** Textile Industry; Physical-Chemical Process; DAF

## INTRODUÇÃO

Uma grande quantidade de substâncias químicas de toxicidade variável tem sido empregada em novos produtos nas mais variadas áreas, tais como saúde, agricultura e indústria. O setor têxtil apresenta relevância nesse contexto, devido, primeiramente a quantidade de fábricas instaladas no mundo e em segundo, pela geração do alto volume de efluentes, os quais, quando não tratados corretamente, podem resultar em sérios problemas de contaminação ambiental.

Nos processos de beneficiamento têxtil, principalmente nas etapas de tingimento e acabamento, além de utilizarem alto volume de água, os efluentes gerados são bem diversificados contendo vários produtos químicos de alta complexidade, tais como corantes, dispersantes, ácidos, bases, sais, detergentes, umectantes e oxidantes (KUNZ et al., 2002).

O problema de cor intensa nos efluentes têxteis ocorre pela presença de corantes que não se fixam na fibra durante o processo de tingimento, principalmente os corantes reativos. Os corantes, em geral, possuem pequena degradabilidade, tornando sua eliminação difícil tanto pelos processos físico-químicos quanto pelo biológico (KARCHER et al., 1999). Outra característica importante dos efluentes têxteis é que uma grande parte dos poluentes permanece em forma coloidal, ou seja, não dissolvida, porém não sedimentável (FURLAN, 2008 citado por FLECK, 2011).

O tratamento convencional para remoção de cor dos efluentes têxteis é realizado através da coagulação e precipitação destes corantes pela a adição de auxiliares químicos. Isto gera uma grande quantidade de lodo, composto por corantes, sulfato de alumínio, sulfato ferroso, cal e polímeros (ANDRADE, 2003).

A flotação por ar dissolvido (FAD) tem sido mais empregada nos últimos anos como forma de aumentar a eficiência de sistemas de tratamento em substituição a processos de sedimentação (PIOLTINE & REALI, 2011). Segundo, EDZWALD, (2010) o processo de flotação por ar dissolvido é indicado para remoção de turbidez e pequenas partículas sendo mais eficiente do que a sedimentação.

O mecanismo de FAD dissolvido é descrito por pequenas bolhas de ar que se aderem às partículas suspensas presentes na água, cuja finalidade é gerar aglomerados com menor densidade que a água, causando a ascensão do floco até a superfície, podendo ser removido no lodo (LUNDH, 2000 citado por ARAÚJO, 2010). O FAD é amplamente empregado nas indústrias de papel, processamento de alimentos, petroquímica, unidades de tratamento de água potável, sistemas de espessamento de lodos industriais e municipais (RODRIGUES & RUBIO, 2007).

Este trabalho possui como objetivo principal remover a variável cor de efluentes de lavanderia industrial têxtil por processo de FAD utilizando coagulante e polímero em concentrações ótimas. Também foram realizadas análises físico-químicas que corroboram os ensaios realizados. A taxa de aplicação superficial foi analisada em sistema com escala de laboratório.

## MATERIAL E METODOS

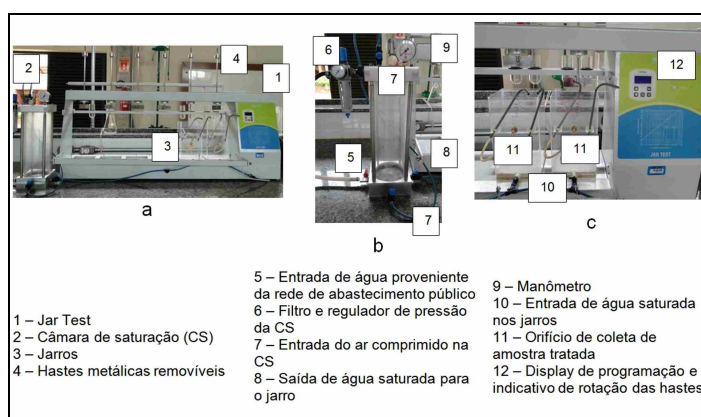
O efluente objeto deste estudo é oriundo de lavanderia industrial têxtil situada na cidade de Apucarana / PR, proveniente do processo de lavagem, tingimento e amaciamento de tecidos, calças e camisas. A coleta dos efluentes foi realizada no tanque de equalização afluente à ETE através do sistema secundário de tubulação que conduz a água bruta até a entrada da ETE.

O Tanque de equalização é o local onde os efluentes da produção são

homogeneizados. Este procedimento é necessário para garantir uma maior eficiência do sistema de tratamento. Ao todo foram coletados 75 litros de efluentes, os quais foram armazenados em recipientes de polietileno com capacidade para 25 L e preservados em refrigeração a 4°C.

Os ensaios de variação de dosagens de coagulantes e floculantes foram realizados em escala de laboratório através do uso flotateste. Este equipamento é constituído por um conjunto de colunas de flotação interligados à câmara de saturação e independentes entre si. Para efetuar o processo de mistura rápida e floculação, cada vaso possui agitador próprio. Para efetuar a operação de flotação, existe uma interligação com uma câmara de saturação associada a um compressor de ar.

Na figura 1, têm-se os detalhes do equipamento utilizado, um teste de jarro modificado com jarros de capacidade de 2 litros cada associados a um sistema de distribuição do ar dissolvido com uma câmara de saturação de ar com capacidade de até 8 Bar. A descrição dos equipamentos utilizados para os ensaios são descritos a seguir: Jar Test – Modelo: 218; Marca: Multitec; Câmara de Saturação; Compressor de ar – Modelo: Moto Press Wind 7,8; Marca: Pressure.



**FIGURA 1:** (a) Jar Test e câmara de saturação; (b) Detalhe da câmara de saturação; (c) Detalhe dos jarros e display de programação.

Fonte: Autoria própria

Na realização dos ensaios foram utilizados os seguintes coagulantes e floculantes: policloreto de alumínio (PAC) e polímero sintético tipo aniônico. O planejamento experimental para três variáveis independentes utilizado foi o delineamento composto central rotacional (DCCR) proposto por RODRIGUES e IEMMA (2009). Os parâmetros independentes usados no DCCR foram: dosagem de PAC; dosagem de polímero e tempo de coleta. De acordo com o método foi realizado um fatorial completo  $2^3$ , incluindo 6 pontos axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 17 ensaios.

A tabela 1 apresenta os valores codificados do DCCR e os valores utilizados na dosagem de PAC, Polímero e o Tempo da coleta. Os ensaios 1 ao 8 representam o fatorial completo; os ensaios 9 a 14 são pontos axiais; e os ensaios 15 a 17 são as repetições no ponto central. As condições de ensaio do ponto central foram determinadas a partir de pré-ensaios associados a pesquisa bibliográfica com valores reportados em bibliografia (ANDRADE, 2003; EDZWALD,2010; PIOLTINE &

REALI, 2011; QUARTAROLI, 2012; VERMA,2012).

**TABELA 1:** Valores codificados do DCCR, valores utilizados na dosagem de PAC, Polímero e Tempo de coleta.

Ensaio	Valores codificados do DCCR			(x <sub>1</sub> ) Dosagem de PAC (mL)	(x <sub>2</sub> ) Dosagem de Polímero (mL)	(x <sub>3</sub> ) Tempo de coleta (minuto)
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>			
1	-1	-1	-1	1,1	7,4	7
2	+1	-1	-1	1,9	7,4	7
3	-1	+1	-1	1,1	11,6	7
4	+1	+1	-1	1,9	11,6	7
5	-1	-1	+1	1,1	7,4	16
6	+1	-1	+1	1,9	7,4	16
7	-1	+1	+1	1,1	11,6	16
8	+1	+1	+1	1,9	11,6	16
9	-1,68	0	0	0,8	9,5	10
10	+1,68	0	0	2,2	9,5	10
11	0	-1,68	0	1,5	6	10
12	0	+1,68	0	1,5	13	10
13	0	0	-1,68	1,5	9,5	5
14	0	0	+1,68	1,5	9,5	20
15	0	0	0	1,5	9,5	10
16	0	0	0	1,5	9,5	10
17	0	0	0	1,5	9,5	10

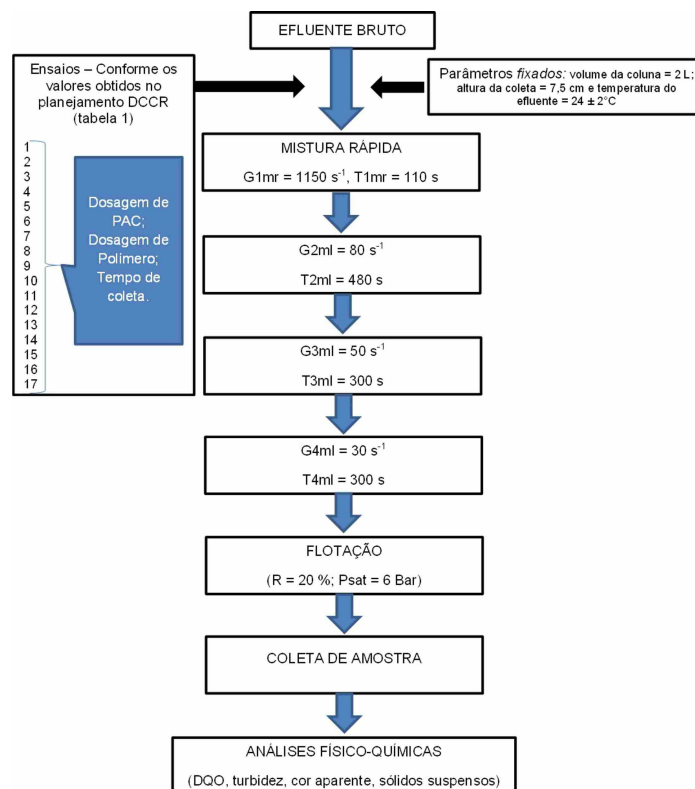
Fonte: Autoria própria

Para o desenvolvimento dos ensaios com flotatestes foram fixados os parâmetros gradiente de velocidade e tempo de agitação.

A pressão de saturação (P<sub>sat</sub>) utilizada foi de 6 bar conforme recomendação do fabricante do equipamento para garantir uma pressão mínima de operação na saída do sistema de 4,5 bar.

A taxa de recirculação (R) utilizada foi de 20 % e a temperatura do efluente no tratamento foi de 24 ± 2°C. O roteiro dos ensaios pode ser melhor discretizado na figura 2.

Após o término dos ensaios e análises laboratoriais (DQO, turbidez, cor aparente e sólidos suspensos "SST") foi realizada análise de variância gerando uma tabela ANOVA para as respostas (cor, turbidez, SST, DQO) e confeccionadas curvas de superfície para avaliação dos parâmetros utilizados e da eficiência de remoção obtida.



**FIGURA 2:** Procedimentos dos ensaios com flotatestes na fase 2.  
Fonte: Autoria própria

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização das amostras de efluente bruto submetidas aos ensaios de flotação possuem os seguintes parâmetros de qualidade: cor aparente 513 UC, turbidez 89 UNT, SST 140,6 mg.mL<sup>-1</sup> e DQO 280 mg.L<sup>-1</sup> e pH 8,31.

Após o tratamento por FAD em conformidade com a Tabela 1 foram obtidas faixas de valores para cada variável: a cor aparente variou entre 66 e 233 UC, a turbidez entre 9 e 64 UNT, os sólidos suspensos entre 4,0 e 127,7 mg.mL<sup>-1</sup>; e a DQO entre 113 e 163 mg.L<sup>-1</sup>. A tabela 2 apresenta a eficiência de remoção das variáveis analisadas.

Os pontos centrais para as três respostas apresentaram uma variação pequena conforme ilustrado na tabela 2, indicando uma boa repetibilidade do processo. O rendimento do processo de remoção de cor aparente, turbidez, sólidos suspensos, e DQO foram afetados por todas as variáveis independentes.

Foi verificada a existência de normalidade nos dados utilizando o teste estatístico Kolmogorov-Smirnov, onde o  $D_n$  apresentado para as respostas SST, cor, turbidez e DQO foram respectivamente: 0,24807; 0,26142; 0,29007 e 0,11853. Considerando um nível de significância de 5% e total de 17 termos, encontra-se o valor crítico tabelado de 0,32. Como os  $D_n$  das variáveis foram menores que o valor crítico tabelado não tem evidências para rejeitar a hipótese de normalidade dos dados. Assim pode-se afirmar com nível de significância de 5% que a amostra provém de uma população normal.

Ao nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ), foi verificado nos cálculos da análise de variância que a regressão foi significativa para todas as respostas (cor, turbidez, DQO, SST), em que, o “p-valor” resultante foi respectivamente 0,052; 0,022; 0,1061,

0,0688 (vide tabelas 3, 4, 5 e 6).

A ANOVA também indicou para as respostas cor, turbidez, DQO, e SST uma porcentagem explicada ( $R^2$ ) de 43,52%, 51,08%, 36,50% e 40,98% respectivamente.

**TABELA 2:** Resultados da eficiência de remoção.

Ensaio	Eficiência de remoção (%)			
	Cor	Turbidez	Sólidos Suspensos	DQO
1	86,55	87,64	77,24	57,75
2	62,96	32,58	37,42	59,64
3	76,61	66,29	74,40	47,17
4	61,01	30,34	9,17	55,99
5	84,99	86,52	82,93	52,46
6	86,94	86,52	91,47	55,55
7	87,13	89,89	97,16	41,88
8	86,74	84,27	88,62	57,31
9	81,09	80,90	74,40	42,76
10	83,04	77,53	80,09	47,17
11	86,94	87,64	94,31	52,46
12	79,53	66,29	71,56	44,08
13	54,58	28,09	61,21	41,78
14	84,41	84,27	85,78	47,17
15	86,74	86,52	88,62	53,34
16	85,77	84,27	91,47	49,37
17	85,58	82,02	82,93	48,49

Fonte: Autoria própria

**TABELA 3:** ANOVA para a resposta cor.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	$F_{cal}$	p-valor
Regressão	19570,67	3	6523,55	3,338900	<0,052876
Resíduos	25399,45	13	1953,80		
Total	44970,12	16			

Fonte: Autoria própria

% variação explicada ( $R^2$ ) = 43,52%

**TABELA 4:** ANOVA para a resposta turbidez.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	$F_{cal}$	p-valor
Regressão	2980,94	3	993,65	4,524417	<0,022091
Resíduos	2855,05	13	219,62		
Total	5836,00	16			

Fonte: Autoria própria

% variação explicada ( $R^2$ ) = 51,08%

**TABELA 5:** ANOVA para a resposta DQO.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcal	p-valor
Regressão	1549,82	3	516,61	2,491078	<0,106113
Resíduos	2695,98	13	207,38		
Total	4245,80	16			

Fonte: Autoria própria

% variação explicada ( $R^2$ ) = 36,50%

**TABELA 6:** ANOVA para a resposta sólidos suspensos.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcal	p-valor
Regressão	6476,50	3	2158,83	3,008506	<0,068831
Resíduos	9328,49	13	717,58		
Total	15804,98	16			

Fonte: Autoria própria

% variação explicada ( $R^2$ ) = 40,97%

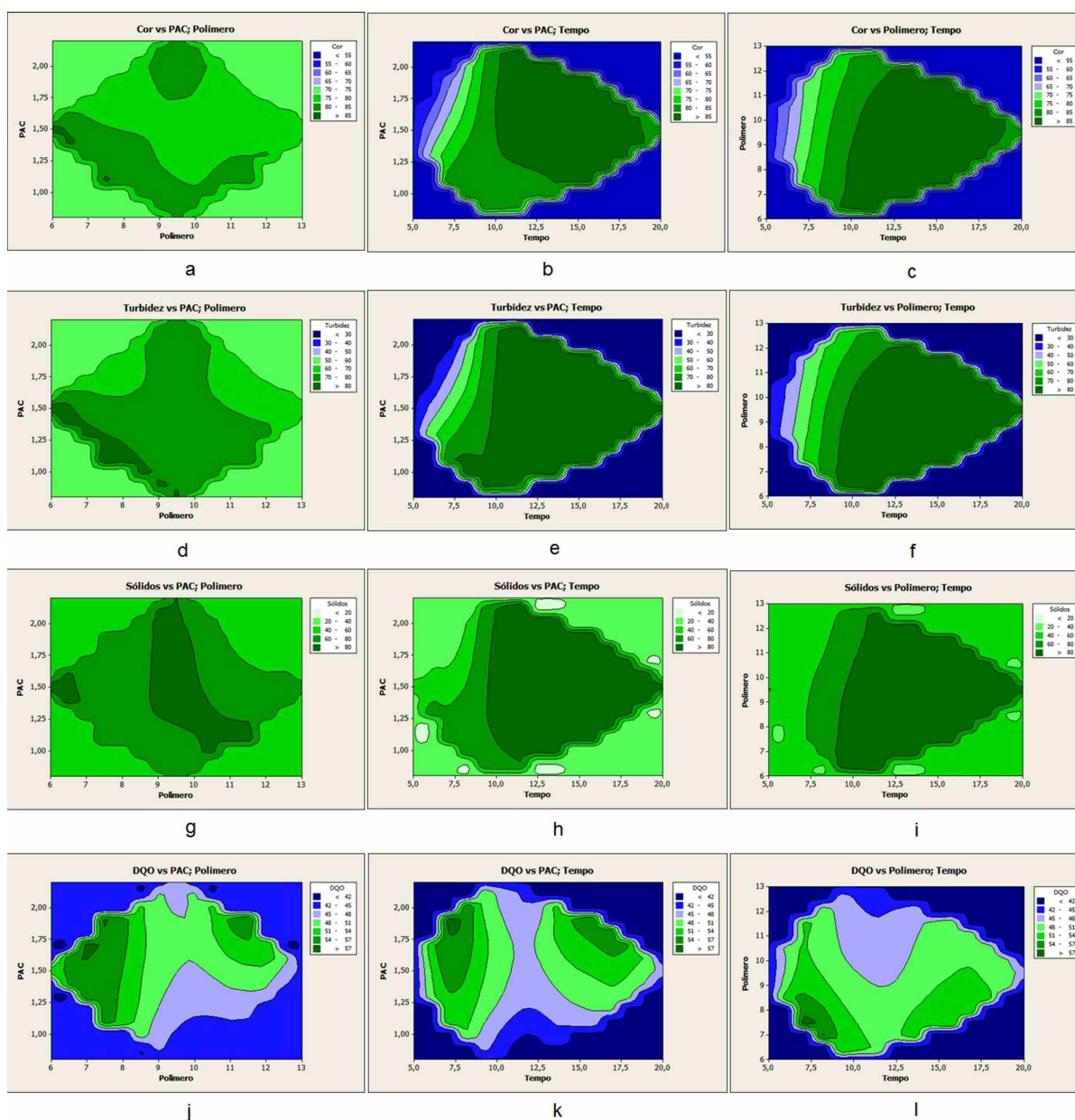
Analisando as curvas de superfície produzidas (vide Figura 3), pode ser observada a influência da variável tempo que na faixa de estudo escolhida (de 5 a 20 minutos) tem uma tendência de resposta mais eficiente para os maiores tempos. Ou seja, quanto maior o tempo maior a eficiência de remoção (vide Figura 3, itens b, c, e, f, h e i).

A eficiência de remoção de cor aparente relacionada com as variáveis PAC e polímero é maior em duas áreas com uma eficiência superior a 85% (vide Figura 3, item a). A partir das concentrações iniciais de PAC e polímero até as concentrações centrais, observa-se uma alternância na relação para uma melhor eficiência. Ou seja, quando aumenta-se a concentração de PAC deve-se diminuir a concentração de polímero e vice-versa. Outra área de maior eficiência foi obtida pela maior concentração de PAC e valores de concentração média de polímero.

A turbidez apresentou as maiores eficiências de remoção com relações de PAC e polímeros similares a cor aparente, porém com uma maior faixa de remoção para eficiências entre 70 e 80% (vide Figura 3, item d). Na eficiência de remoção de sólidos suspensos com as variáveis PAC e polímero foram observadas duas áreas com eficiência maior que 80%. Uma na qual a concentração de PAC possui valores centrais e de polímero concentrações entre 6 e 7 mg.L<sup>-1</sup>. A outra área corresponde a concentrações de polímero com valores centrais (próximo de 9 a 10 mg.L<sup>-1</sup>) e concentrações de PAC variando em toda a faixa de valores estudada (vide Figura 3, item g).

A variável DQO apresentou faixas ótimas de eficiência similares para PAC e polímero e para PAC e tempo na qual são observadas duas áreas com eficiência acima de 57%. Quanto a DQO associada ao polímero e tempo, observa-se que para menores valores de polímero e valores laterais de tempo a eficiência é superior a 57%.

Em estudos de PIOLTINE & REALI (2011), foi utilizada a técnica de flotação por ar dissolvido com utilização de bomba multifásica no tratamento de efluentes de indústria têxtil utilizando uma vazão de reciclo de 20% com pressões de operação de 6,5 a 7,5 atm, com eficiências de remoção dos parâmetros cor, turbidez, SST e DQO de 95%, 95%, 80% e 35%, respectivamente. Estes valores foram superiores ao obtido neste estudo. Porém, as faixas de valores ótimas obtidas são compatíveis com as observadas.



**FIGURA 3:** (a) Cor vs PAC; Polímero, (b) Cor vs PAC; Tempo, (c) Cor vs Polímero; Tempo, (d) Turbidez vs PAC; Polímero, (e) Turbidez vs PAC; Tempo, (f) Turbidez vs Polímero; Tempo, (g) Sólidos vs PAC; Polímero, (h) Sólidos vs PAC; Tempo, (i) Sólidos vs Polímero; Tempo, (j) DQO vs PAC; Polímero, (k) DQO vs PAC; Tempo, (l) DQO vs Polímero; Tempo.

Fonte: Autoria própria

## CONCLUSÕES

Para efluentes de lavanderia têxtil industrial, o tratamento de FAD apresentou influência do tempo de flotação com aumento da eficiência de remoção associada ao aumento deste tempo. A utilização de PAC associado a polímero aniônico apresentou eficiência de remoção para a cor aparente quanto para a turbidez com eficiências ótimas de 87,1% e 89,9%, respectivamente.

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que a FAD com a utilização de



polímero e PAC é passível de ser utilizada para remoção de corantes têxteis com a possibilidade de reúso da água tratada, podendo ser uma solução viável para processos de tratamento de lavanderias industriais do setor têxtil. Para a obtenção de uma relação ótima entre o PAC e o polímero aniônico devem ser realizados mais estudos para remoção de corantes em sistemas de efluentes têxteis.

## **AGRADECIMENTOS**

A CAPES pela concessão da bolsa.

## **REFERÊNCIAS**

ANDRADE, F. **Remoção de cor de efluentes têxteis com tratamento de lodos ativados e um polieletrólito orgânico**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina, para a obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2003.

ARAÚJO, C.; J. **Influência da velocidade cross-flow na câmara de Flotação na eficiência de unidades de flotação por ar dissolvido tratando água para abastecimento**. Dissertação de mestrado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento. São Carlos, 2010.

EDZWALD, J.; K. **Dissolved air flotation and me**. A review. Water research, v. 44, p. 2077–2106, 2010.

FLECK, L. **Aplicação do controle estatístico de processos ao tratamento de um efluente têxtil por eletrofloculação**. Trabalho de conclusão de curso apresentada à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, para obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental. Medianeira, 2011.

KARCHER, S., KORNMULLER, A., JEKEL, M. **Removal of Reactive Dyes by Sorption/Complexation with Curcubituril**. Water Science and Technology, v. 40, n.4-5, p. 425-433, 1999.

KUNZ, A., ZAMORA, P. P. **Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis**. Química Nova, v. 25, p. 78-82, 2002.

PIOLTINE, A.; REALI, M. A. P. **Emprego de bomba multifásica como unidade geradora de microbolhas de ar em sistema de flotação aplicado ao pré-tratamento de efluente têxtil**. Eng Sanitária e Ambiental, v. 16, n. 2, p. 167-174, 2011.

QUARTAROLI, L. **Aplicação da flotação por ar dissolvido como pós-tratamento de efluente de lodo ativado em uma indústria de papel e celulose**. Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, para a obtenção do título de mestre em Ciências Florestais. Irati, 2012.

RODRIGUES, M. I., IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos**. 2ª edição revisada e ampliada. Casa do Espírito Amigo

Fraternidade Fé e Amor. Campinas – SP, 2009.

**RODRIGUES, R. T., RUBIO, J. DAF - dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry.** International Journal of Mineral Processing, v. 82, n. 1, 2007.

**VERMA, A. K., DASH, R. R., BHUNIA, P. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters.** Journal of Environmental Management, v.93, p. 154-168, 2012.