

## II-032 – AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE CORANTE AZUL REATIVO 5G POR ELETROFLOCULAÇÃO

### **Bruna Souza dos Santos<sup>(1)</sup>**

Tecnóloga em Gestão Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Medianeira. Mestre em Tecnologias Ambientais – PPGTAMB - UTFPR. Doutoranda em Engenharia Química – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – Câmpus Toledo.

### **Eduardo Eyng<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Químico pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE - Câmpus Toledo. Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Docente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Medianeira. Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PPGTAMB – UTFPR.

### **Paulo Rodrigo Stival Bitencourt<sup>(3)</sup>**

Químico pela Universidade Estadual de Maringá – UEM. Doutor em Química pela Universidade Estadual de Maringá – UEM. Docente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Medianeira. Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PPGTAMB – UTFPR.

### **Laercio Montovani Frare<sup>(4)</sup>**

Engenheiro Químico pela Universidade Estadual de Maringá – UEM. Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá – UEM. Docente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Medianeira. Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PPGTAMB – UTFPR.

### **Andrieli Cristina Helmann<sup>(5)</sup>**

Graduanda em Engenharia Ambiental – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Medianeira. Bolsista de Iniciação Científica – PIBIC - Fundação Araucária.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Brasil, 4232 – Parque Independência – Medianeira – PR – CEP: 85.884-000 – Tel: (45) 3240-8000 – email: brusouzasantos@hotmail.com

**Endereço<sup>(2)</sup>:** Av. Brasil, 4232 – Parque Independência – Medianeira – PR – CEP: 85.884-000 – Tel: (45) 3240-8000 – email: eduardoe yng@utfpr.edu.br

**Endereço<sup>(3)</sup>:** Av. Brasil, 4232 – Parque Independência – Medianeira – PR – CEP: 85.884-000 – Tel: (45) 3240-8000 – email: paulob@utfpr.edu.br

**Endereço<sup>(4)</sup>:** Av. Brasil, 4232 – Parque Independência – Medianeira – PR – CEP: 85.884-000 – Tel: (45) 3240-8000 – email: laercio@utfpr.edu.br

**Endereço<sup>(5)</sup>:** Av. Brasil, 4232 – Parque Independência – Medianeira – PR – CEP: 85.884-000 – Tel: (45) 3240-8000 – e-mail: andrieli.utfpr@hotmail.com

## RESUMO

Nos últimos anos o desenvolvimento das atividades industriais tem provocado impactos significativos aos recursos naturais. Apesar do setor têxtil no Brasil possuir um grande potencial econômico, as indústrias do ramo representam um grande problema ambiental. Um dos motivos pelos quais elas são assim designadas é devido ao volume de água necessário ao processo produtivo, este efluente quando não é tratado e disposto de maneira adequada implica geralmente na promoção de impactos ambientais negativos que afetam a qualidade dos corpos hídricos receptores. A forte coloração é a característica predominante nestes efluentes têxteis, como consequência da utilização de corantes para o tingimento do tecido. Além disso, devido a sua toxicidade e baixa degradabilidade, causam inúmeros impactos aos seres vivos, o que justifica a busca por métodos alternativos para remoção desses constituintes. Os resultados positivos alcançados em estudos prévios demonstram a aplicabilidade da técnica de eletrofloculação como tratamento físico-químico, e levando em consideração os métodos convencionais e também as dificuldades no tratamento dos efluentes têxteis, o processo eletrolítico conhecido como eletrofloculação surge como uma técnica inovadora. Este processo envolve a desestabilização de poluentes emulsificados, ou em suspensão, em meio aquoso. Consiste basicamente na geração de coagulantes pela dissolução dos íons ferro e/ou alumínio pela ação de corrente elétrica aplicada nos eletrodos. Desta forma o objetivo deste trabalho foi realizar o tratamento para a remoção do Corante Reativo Azul 5G de um efluente têxtil sintético através da eletrofloculação. As variáveis analisadas foram: ddp (diferença de potencial aplicada aos eletrodos de sacrifício), pH inicial do efluente a ser tratado e

tempo de retenção hidráulica (TRH), e a variável-resposta foi a remoção percentual da cor, parâmetro físico-químico de qualidade do efluente sintético. O tratamento eletrolítico testado removeu satisfatoriamente a cor da solução utilizada, apresentando remoção da cor de 64,38 a 90,87% e para a validação uma remoção média de 89,01% (valores próximos do predito pelo modelo). Além disso, a partir das análises estatísticas dos resultados o modelo se mostrou válido a 95% de confiança, o qual pode ser utilizado para subsidiar a realização da otimização das condições operacionais estudadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Efluentes Têxteis, Tratamento Eletrolítico, Tratamento físico-químico.

## INTRODUÇÃO

A racionalização do uso da água é uma questão de grande importância, já que esse recurso está cada vez mais escasso. Essa questão decorre do seu mau uso por diversos setores da sociedade, principalmente pela atividade industrial que utiliza grande quantidade de água, o que gera consequentemente, grandes volumes de efluentes com os mais diversos tipos de contaminantes. Atualmente há uma grande preocupação com a recuperação de águas naturais contaminadas, pois, além dos efeitos negativos sobre os corpos hídricos, estas substâncias contaminantes podem afetar também a saúde humana.

Dentre as atividades industriais geradoras de efluentes líquidos as indústrias têxteis se destacam por utilizarem em seu processo produtivo elevada quantidade de água, corantes e produtos químicos, gerando efluentes potencialmente poluidores, com elevada carga orgânica, cor acentuada e compostos tóxicos (PASCHOAL; TREMILIOSI & FILHO, 2005). Deste modo, o estudo de tecnologias alternativas para o tratamento é de suma importância, uma vez que a necessidade de proporcionar o reuso desta água se torna cada vez mais imprescindível.

A principal preocupação das indústrias têxteis refere-se à remoção de corantes do efluente gerado no processo, pois de uma maneira geral, ele é caracterizado por sua baixa degradabilidade (CERQUEIRA *et al.*, 2009). Várias tecnologias têm sido empregadas para o tratamento destes resíduos. Processos convencionais para descoloração de rejeitos vêm sendo utilizados e envolvem procedimentos de adsorção, precipitação, degradação química, biodegradação, floculação, etc (PASCHOAL & TREMILIOSI-FILHO, 2005).

No entanto o emprego de técnicas que utilizam reatores eletroquímicos tem apresentado resultados promissores para o tratamento de vários tipos de efluente (CRESPILHO & REZENDE, 2004). Este processo é denominado de eletrofloculação, eletroflotação ou eletrocoagulação.

Na tecnologia de eletrofloculação não ocorre à adição de floculantes, o que evita a formação de lodo residual. Trata-se de um processo eletroquímico baseado na geração de bolhas de gás substituindo os aditivos floculantes. Esse processo é dividido em quatro etapas: geração de pequenas bolhas de gás; contato entre as bolhas e as partículas em suspensão; adsorção das pequenas bolhas de gás na superfície das partículas e ascensão do conjunto partículas/bolhas para a superfície (PASCHOAL; TREMILIOSI-FILHO, 2005).

Durante o processo eletroquímico a geração de coagulantes ocorre *in situ* a partir de eletrodos submetidos a uma corrente elétrica (CERQUEIRA *et al.*, 2011). Assim, ao contrário dos processos convencionais onde os coagulantes são adicionados ao efluente na forma de sais, no processo de eletrofloculação os coagulantes são adicionados à suspensão por meio da dissolução do ânodo, que provoca a agregação das partículas posteriormente removidas por sedimentação ou filtração (SASSON; ADIN, 2010).

A técnica de eletrofloculação vem ganhando popularidade e se tornando uma alternativa reconhecidamente viável frente ao processo convencional de coagulação/floculação (HARIF; ADIN, 2007). Desta forma, este trabalho tem como objetivo a busca por tecnologias mais limpas de tratamento, pois visa a eficiência na remoção de poluentes do efluente têxtil (especificamente o corante reativo Azul 5G), por meio de uma técnica menos agressiva ao meio ambiente, como é o caso da eletrofloculação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As soluções de corantes utilizadas foram preparadas a partir do corante comercial reativo Azul 5G, com uma concentração de 50 mg/L obtida pela dissolução em água destilada. A determinação da concentração do corante nas amostras foi realizada no Espectrofotômetro de absorção molecular UV-Vis de varredura com feixe duplo, marca PerkinElmer, modelo Lambda 45. O fundamento desta técnica é a absorção de radiação eletromagnética na região do visível por parte dos compostos coloridos de interesse.

A determinação do comprimento de onda no qual o composto a ser quantificado absorve o máximo de radiação é feito mediante uma varredura ao longo da faixa espectral de interesse.

## TRATAMENTO POR ELETROFLOCULAÇÃO

Soluções aquosas de mesma concentração inicial de corante reativo Azul 5G (50 mg/L) foram preparadas para posterior tratamento por eletrofloculação. O procedimento experimental consistiu em ensaios de eletrofloculação em batelada, sendo o sistema composto por um béquer de 1L, agitador magnético, fonte de corrente contínua e os eletrodos de sacrifício de ferro, de dimensões: 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e espessura aproximada de 0,6 mm. Para cada teste foi utilizado 500 mL de solução de corante reativo azul 5G. O par de eletrodos foi separado por uma distância aproximada de 1 cm, e a área efetivamente utilizada para a eletrofloculação de  $2,5 \times 10^{-3} \text{m}^2$ .

Antes de realizar a eletrólise o pH foi ajustado de acordo com a matriz do delineamento experimental (Tabela 1), sendo utilizadas soluções de hidróxido de sódio e ácido clorídrico conforme necessário. Manteve-se fixa a condutividade elétrica da solução em  $4,23 \pm 0,45 \text{ mS.cm}^{-1}$  mediante a adição de 1 g de cloreto de sódio à solução do corante. Após o tratamento, deixou-se estabilizar amostras por 10 minutos e em seguida realizou-se a medida da absorbância.

## PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR pretendeu-se avaliar a influência das seguintes variáveis: diferença de potencial (ddp) aplicada nos eletrodos de sacrifício, pH inicial do efluente a ser tratado e tempo de retenção hidráulica (TRH). A variável-resposta foi a remoção percentual de cor, parâmetro físico-químico de qualidade do efluente sintético.

De acordo com o planejamento experimental DCCR, foram executados 2<sup>3</sup> ensaios fatoriais, somados a três repetições no ponto central e seis ensaios nos pontos axiais, totalizando-se 17 ensaios, que foram feitos em duplicata. Os valores reais, correspondentes à faixa de estudo das variáveis foram determinados por testes preliminares, conforme podem ser observados na Tabela 1:

Tabela 1 - Valores reais correspondentes aos codificado					
	-1,68	-1	0	1	+1,68
pH	4	5,2	7	8,8	10
Tempo (min)	10	14	20	26	30
ddp (V)	5	8	12,5	17	20

A partir deste planejamento experimental foram realizados os ensaios de eletrofloculação em batelada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### ESPECTRO DE VARREDURA DO CORANTE REATIVO AZUL 5G

Conforme se observa na Figura 1, o comprimento de onda no qual a absorção do corante reativo Azul 5G foi maior corresponde a 618 nm. A partir destes resultados os demais ensaios foram baseados neste comprimento de onda de maior absorção.

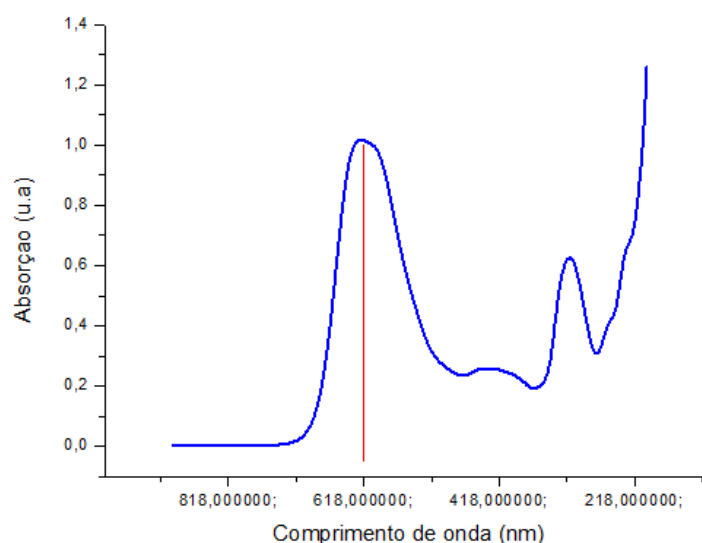


Figura 1 – Gráfico do Espectro de Varredura do Corante Reativo Azul 5G

#### APLICAÇÃO DA ELETROFLOCULAÇÃO PARA REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO AZUL 5G EM BATELADA

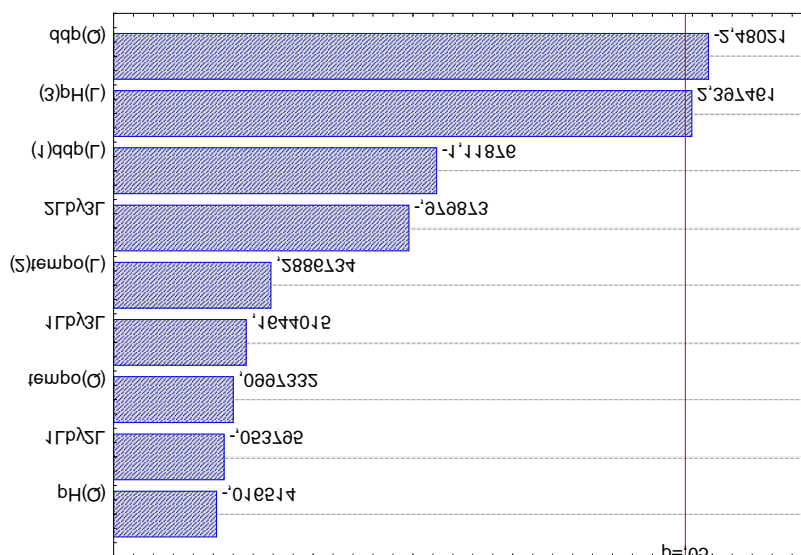
A Tabela 2 apresenta os valores da variável resposta cor após o tratamento da solução de corante. Através da absorbância da solução sem tratamento de cada ensaio foi possível calcular a eficiência de remoção da cor (%). Cabe salientar que os dados apresentados são valores médios, pois os testes foram realizados em duplicata.

Tabela 2 – Matriz do delineamento experimental e eficiência de remoção da cor

Ensaio	ddp (V)	Tempo (min)	pH	Eficiência de Remoção da Cor (%)
1	8 (-1)	14 (-1)	5,2 (-1)	72,28±0,0042
2	17 (1)	14 (-1)	5,2 (-1)	64,38±0,0085
3	8 (-1)	26 (1)	5,2 (-1)	75,02±0,0071
4	17 (1)	26 (1)	5,2 (-1)	76,99±0,0085
5	8 (-1)	14 (-1)	8,8 (1)	86,73±0,0014
6	17 (1)	14 (-1)	8,8 (1)	90,87±0,0438
7	8 (-1)	26 (1)	8,8 (1)	90,13±0,0198
8	17 (1)	26 (1)	8,8 (1)	83,33±0,0163
9	12,5 (0)	20 (0)	7 (0)	82,55±0,0028
10	12,5 (0)	20 (0)	7 (0)	85,76±0,0085
11	12,5 (0)	20 (0)	7 (0)	89,66±0,0184
12	20 (1,68)	20 (0)	7 (0)	67,11±0,0940
13	5 (-1,68)	20 (0)	7 (0)	79,30±0,0028
14	12,5 (0)	30 (1,68)	7 (0)	87,37±0,0361
15	12,5 (0)	10 (-1,68)	7 (0)	89,58±0,0120
16	12,5 (0)	20 (0)	10 (1,68)	87,75±0,0233
17	12,5 (0)	20 (0)	4 (-1,68)	87,82±0,0537

Observa-se que a eficiência encontrada teve uma variação de 64,38% a 90,87% para a cor removida, e que o desvio-padrão das duplicatas se manteve baixo para todos os ensaios.

Na Figura 2 observa-se o Gráfico de Pareto para os parâmetros estudados. Este gráfico permite verificar o efeito de cada parâmetro, bem como quais termos são estatisticamente significativos. Pela análise da figura é possível verificar que, considerando o intervalo de confiança de 95%, somente o termo quadrático da diferença de potencial (ddp) e o termo linear do pH se mostraram significativos na remoção da cor do corante reativo azul 5G. Optou-se por reduzir o número de termos do modelo, mantendo-se os termos significativos, além do termo linear da ddp. A soma dos quadrados dos termos excluídos do modelo foi incorporada ao resíduo.



Estimativa do efeito baseado no valor absoluto

Figura 2 – Diagrama de Pareto para o processo de remoção da cor, com 95% de confiança

Através dos resultados obtidos foram calculados os coeficientes de regressão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes de regressão

	EFEITOS	COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média		86,36138837	1,826451022	6,17632E-16
ddp	-4,259692756	-2,129846378	1,501409778	0,179552865
I(ddp^2)	-10,48304561	-5,241522807	1,53937366	0,004697245
pH	9,128402363	4,564201181	1,501409778	0,009481676

Para realização do teste F e conseqüente avaliação da validade do modelo é necessário a análise de variância (ANOVA) para a resposta remoção de cor, conforme pode ser observada na Tabela 4. Este modelo de análise é o mais utilizado para se avaliar numericamente a qualidade do ajuste de um modelo, fazendo um exame dos resíduos.

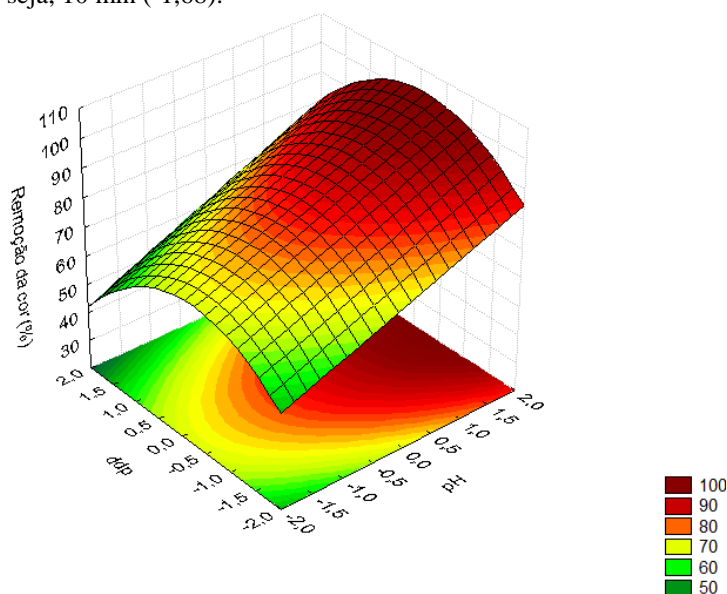
Tabela 4 – Análise de variância para a resposta remoção de cor (intervalo de confiança de 95%)

Fonte de Variação	SQ <sup>a</sup>	GL <sup>b</sup>	QM <sup>c</sup>	F <sub>calculado</sub>	p-valor
Regressão	702,753	3	234,251	7,616	0,0034
Resíduos	399,861	13	30,759		
Total	1102,614	16			

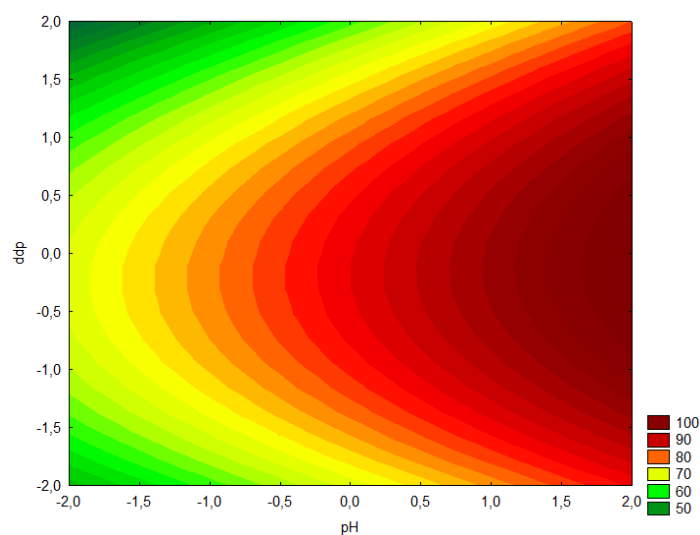
% variação explicada ( $R^2$ ) = 63,73%  $F_{3; 13; 0,05} = 3,41^a$  = soma de quadrados; <sup>b</sup> = graus de liberdade; <sup>c</sup> = quadrados médios.

De acordo com a tabela 3 o valor de  $F_{\text{calculado}}$  é maior que o  $F_{\text{tabelado}}$  determinando a validade do modelo a 95% de confiança, o que também pode ser observado pelo fato do p-valor ser menor que 0,05.

A partir do modelo, foi possível gerar os gráficos de superfície de resposta e curvas de contorno para a variável remoção da cor. Nas Figuras 3 e 4 observa-se o gráfico da resposta em função das variáveis pH inicial e diferença de potencial (ddp), que foram considerados significativos, fixando a variável tempo no valor inferior da faixa de estudo, ou seja, 10 min (-1,68).



**Figura 3 - Gráfico de superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%), em função do pH e da ddp**

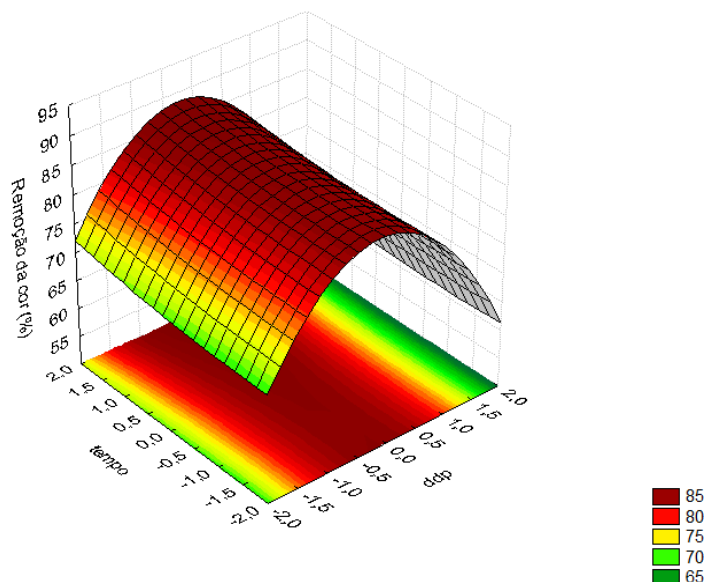


**Figura 4 - Gráfico de curvas de contorno para o parâmetro remoção da cor (%), em função do pH e da ddp**

O gráfico aponta uma região ótima para a diferença de potencial (ddp), de aproximadamente -0,5 a 0,5 em valores codificados, e uma tendência crescente para o pH, chegando a atingir 100% de remoção. Porém, na prática, tais resultados são inviáveis, uma vez que não é possível se trabalhar com um pH inicial muito alto, pois a eletrofloculação é um processo que já eleva o pH do efluente final, devido à dissociação da água em  $\text{OH}^-$  e  $\text{H}^+$ , o qual volatiliza. Assim, ao se partir de um pH inicial alto, obter-se-ia um efluente final com pH muito elevado, e portanto passível de prejudicar a qualidade ambiental, o que não é o objetivo do trabalho.



Assim, para os fins de encontrar a região ótima para a diferença de potencial, optou-se por trabalhar com o gráfico da superfície de resposta para a remoção de cor, em função da ddp e do tempo de retenção, mantendo-se o pH fixo no ponto central, 7 (0), por ser um valor razoável e prático de se atingir. O gráfico pode ser observado na Figura 5.



**Figura 5 - Gráfico de superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%), em função do tempo e da ddp para o pH 7**

Neste gráfico, é possível perceber que de fato, o tempo não é significativo, uma vez que as faixas de remoção independem do valor do tempo. Nesse caso, porém, é possível identificar uma região ótima para a ddp, que corresponde à faixa de -0,6 a 0,2 em valores codificados e de 9,8 a 13,5 V em valores reais, para a qual se obtém um valor de remoção de 85%.

A validação das condições experimentais foi realizada nas condições ótimas encontradas através do modelo para as variáveis significativas. Para a diferença de potencial (ddp), derivando-se o modelo em função dessa variável e igualando-o a zero obteve-se o valor real de 11,6 V, o que corresponde à condição otimizada para o parâmetro. Para o pH inicial, porém, não foi possível obter a condição, uma vez que o termo relativo ao pH no modelo era linear. Assim, para a validação o pH inicial foi fixado no ponto central, 7 (valor real). O termo tempo de retenção, por não ser significativo, também foi fixado, porém no valor inferior da faixa de estudos, ou seja, 10 minutos (valor real). Com essas condições, o valor de remoção de cor predito pelo modelo é de 86,58%. Foram realizados cinco testes em duplicata nas condições mencionadas, e as médias dos resultados encontram-se na Tabela 5.

**Tabela 5 - Resultados validação das condições experimentais**

ENSAIO	ABSORBÂNCIA BRUTA	MÉDIA ABSORBÂNCIA TRATADO	REMOÇÃO DA COR (%)
1	1,325	0,168	87,35
2	1,339	0,123	90,81
3	1,343	0,198	85,26
4	1,284	0,121	90,55
5	1,350	0,120	91,09
Média			89,01

Pode-se observar que os valores de remoção encontrados nos ensaios de validação variaram de 85,26 a 91,09%, valores muito próximos do predito pelo modelo. Além disso, o erro percentual médio entre o valor predito pelo modelo para as condições ótimas e o valor observado nos ensaios de validação ficou em 2,73%, valor considerado satisfatório. Dessa forma, comprovou-se a validade do modelo para as condições experimentais.

## **CONCLUSÕES**

Este trabalho buscou avaliar a eficiência do tratamento de eletrofloculação para um efluente sintético utilizando Corante Reativo Azul 5G. O tratamento eletroquímico testado foi capaz de remover satisfatoriamente a cor da solução preparada, para os ensaios esse percentual de remoção variou de 64,38 a 90,87% e para a validação uma remoção média de 89,01%, valores muito próximos do predito pelo modelo. Além disso, o modelo ajustado com base na análise estatística dos resultados se mostrou válido a 95% de confiança. Tal modelo pode ser utilizado para a realização da otimização das condições operacionais estudadas: diferença de potencial empregada entre os eletrodos de sacrifício, tempo de reação e pH.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. CERQUEIRA, A. A; MARQUES, M. R. C; RUSSO, C. Avaliação do Processo Eletrolítico em Corrente alternada no Tratamento de Água de Produção. Química Nova, v.34, n.1, p.59-63, 2011.
2. CERQUEIRA, A; RUSSO, C; MARQUES, M. R. C. Electroflocculation For Textile Wastewater Treatment. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.26, n.4, p.659-668, 2009.
3. CRESPILO, F. N.; REZENDE, M. O. O. Eletroflotação: Princípios e Aplicações. RIMA, São Carlos, 2004.
4. HARIF, T; ADIN, A. Characteristics of Aggregates Formed by Electroflocculation of a Colloidal Suspension. Water Research, v.41, n.13, p.2951-2961, 2007.
5. PASCHOAL, F. M. M; TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. Química Nova, v.28, n.5, p.766-772, 2005.
6. SASSON, M. B; ADIN, A. Fouling Mechanisms and Energy Appraisal in Microfiltration Pretreated by Aluminum-Based Electroflocculation. Journal of Membrane Science, v.352, n.1-2, p.86-94, 2010.