



II-482 - AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO DE UM EFLUENTE DE GALVANOPLASTIA

Luiz Gustavo de Lima Vaz⁽¹⁾

Mestrando em Engenharia Química pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Márcia Teresinha Veit

Doutora em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá

Márcia Regina Fagundes Klen

Doutora em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá

Rosângela Bergamasco

Doutora em Engenharia Química pela Université de Montpellier II e pela Universidade Estadual de Campinas

Salah Din Mahmud Hasan

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas

Endereço⁽¹⁾: Rua da Faculdade, 645, Jardim La Salle, CEP:85903-000, Toledo – PR, Brasil -Tel: (45) 3379-7091 - e-mail: luizgustavovaz@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o processo de coagulação/floculação no tratamento primário de um efluente de galvanoplastia por meio de um planejamento saturado de Plackett e Burman (PB12) seguido de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), estudando as seguintes variáveis: concentração (C), velocidade de mistura rápida (VMR) e lenta (VML) e tempo de mistura rápida (TMR) e lenta (TML), com 30 min de sedimentação. Foram empregados coagulantes do tipo inorgânico (sulfato de alumínio) e orgânico (quitosana, sementes de moringa e Tanfloc SG) no processo de coagulação/floculação. As variáveis de resposta analisadas para cada coagulante foram: cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO. O agente coagulante quitosana apresentou os melhores resultados de remoção, as condições operacionais otimizadas foram: 100 rpm para TMR, 20 rpm para TML, 6 e 30 min para VMR e VML, respectivamente, na concentração de 12,67 ppm e tempo de sedimentação de 30 min.

PALAVRAS-CHAVE: Galvanização, Coagulação/Floculação, Coagulantes, Planejamento Experimental.

INTRODUÇÃO

Os processos de galvanização geram, em geral, graves problemas de poluição nos ecossistemas aquáticos devido as seus despejos, por conterem metais pesados, que acima de determinadas concentrações podem ser tóxicos ao ambiente e ao ser humano, e ainda apresentam grande quantidade de materiais dissolvidos e suspensos, ocasionando altos valores de cor e turbidez, respectivamente.

A maioria dos sais de metais pesados é solúvel em água e conseqüentemente não pode ser separado por processos físicos convencionais de separação. A necessidade de um gerenciamento dos recursos hídricos, notadamente em virtude de sua deterioração e esgotamento, resultou na implementação de Leis e Normas Ambientais cada vez mais restritivas quanto ao despejo dos efluentes.

A indústria da galvanoplastia se apresenta como uma fonte geradora de efluentes contendo metais pesados (cromo, cobre, zinco, níquel, cádmio, chumbo), uma vez que emprega em seus processos de eletrodeposição uma variedade de soluções metálicas e um volume considerável de águas de lavagem que, dependendo do porte da indústria, situa-se entre 250 e 2.000 L/h, havendo instalações em que esta quantidade ultrapassa os 10.000 L/h (Braile e Cavalcanti, 1993). Em relação à vazão dos efluentes, estes variam consideravelmente, dependendo do tamanho das seções de galvanização, havendo relatos desde 8 até 1500 m³/dia (Veit, 2006).

Geralmente a primeira etapa do tratamento de efluentes contendo metais pesados é a coagulação química a qual provavelmente influencia significativamente as etapas de tratamento subsequentes. Dada a importância deste processo de separação é fundamental estudos do comportamento dos agentes coagulantes nesta etapa. Existem vários tipos de coagulantes de origem química e vegetal. Os principais coagulantes químicos utilizados são: sulfato químico, cloreto férrico, hidroxícloreto de alumínio e sulfato férrico (Pavanelli, 2001).



A necessidade crescente da otimização de produtos e processos, minimizando custos e tempo, maximizando rendimento, produtividade e qualidade de produtos, dentre outros objetivos, tem despertado a busca de técnicas sistemáticas de planejamento de experimentos. A metodologia do planejamento fatorial, associada à análise de superfícies de respostas, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro (Barros Neto et al., 2007).

O planejamento experimental reduz o número de experiências ou repetições e melhora a qualidade da informação obtida através dos resultados, o que significa uma sensível diminuição do trabalho e, conseqüentemente, do tempo e do custo final. O planejamento consciente dos experimentos que devem ser realizados para determinar, e mesmo quantificar, a influência das variáveis sobre as respostas desejadas, é indispensável para que resultados confiáveis sejam obtidos e para que análises estatísticas consistentes possam ser realizadas (Barros Neto et al., 2007).

Quando iniciamos com um grande número de fatores (normalmente superior a quatro), é necessário mais de um delineamento experimental para se atingir o objetivo desejado. Inicia-se com a seleção dos fatores realmente significativos, os quais merecem um estudo mais aprofundado, e complementa-se o fatorial mais tarde, se necessário (Barros Neto et al., 2007).

O planejamento saturado de Plackett e Burman (PB12) permite utilizar um número elevado de variáveis com um número reduzido de experimentos, com o intuito de se selecionar as variáveis mais significativas e, em seguida, elaborar uma estratégia de otimização com o uso de outros tipos de planejamento. É um planejamento que nos fornece informações quanto à importância dos efeitos sobre a(s) resposta(s) e se a faixa escolhida de estudo é a mais adequada, e ainda, em que direção devemos seguir no próximo planejamento (Barros Neto et al., 2007).

A otimização do processo é realizada por meio da metodologia de superfícies de resposta (ou RSM, de Response Surface Methodology), uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais. A metodologia de superfícies de resposta tem duas etapas distintas, modelagem e deslocamento, que são repetidas tantas vezes quantas forem necessárias, com o objetivo de atingir uma região ótima da superfície. O Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) é um método de investigação do ponto ótimo de trabalho com a realização de um planejamento completo, somado a um planejamento em estrela e mais repetições no ponto central (Barros Neto et al., 2007).

Os sais de alumínio e ferro são os coagulantes mais utilizados no tratamento de água e esgoto. Contudo, pesquisas têm apontado algumas desvantagens, tais como problemas de saúde causados pelo alumínio residual em águas tratadas, produção de grande volume de lodo, consumo da alcalinidade do meio, acarretando custos adicionais com produtos químicos utilizados na correção do pH, principalmente no tratamento de água. Neste contexto, os coagulantes naturais apresentam-se como uma alternativa viável.

Alguns biopolímeros estão sendo investigados mais intensamente que outros, como é o caso da Moringa Oleifera (Da Silva et al., 2003) e da Quitosana (Moraes et al., 2005). Em geral os estudos são aplicados ao tratamento de águas para fins potáveis. Assim, há lacunas sobre o conhecimento acerca da aplicação de biopolímeros, em especial os de origem vegetal, no tratamento de diferentes águas residuárias industriais (Da Silva et al., 2003).

Vários estudos utilizando a solução da semente de Moringa Oleifera têm mostrado que suas sementes possuem propriedades coagulantes efetivas e que elas não são tóxicas a humanos e animais (Ndabigengesere et al., 1995; Muyibi & Evison, 1995), sendo bastante eficientes no condicionamento do lodo (Muyibi & Evison, 1995).

Quando comparada com coagulantes químicos a Moringa Oleifera apresenta uma série de vantagens, dentre elas: não requer ajustes de pH e alcalinidade, não causa problemas de corrosão, de baixo custo, não altera o pH da água e produz baixo volume de lodo, sendo este biodegradável. (Ghebremichael, 2004).

A quitosana é um produto natural, de baixo custo, renovável e biodegradável, de grande importância econômica e ambiental. Geralmente é obtida a partir da quitina, extraídas das carcaças de crustáceos. É um biopolímero do tipo polissacarídeo, possui uma estrutura molecular quimicamente similar à fibra vegetal (celulose), diferenciando-se somente nos grupos funcionais. Sendo solúvel em meio ácido diluído, formando um polímero catiônico. O lodo gerado pela quitosana apresenta um elevado teor de matéria orgânica o que facilita o processo de decomposição natural.



O agente coagulante/floculante Tanfloc SG é um polímero orgânico-catiônico obtido por meio de um processo de lixiviação da casca da Acácia Negra, constituído basicamente por tanato quartenário de amônio. É um extrato vegetal completamente biodegradável, o que permite sua total digestão nas etapas biológicas do processo de tratamento. O lodo gerado não possui alumínio incorporado, o que possibilita sua compostagem. (TANAC, 2008).

As vantagens potenciais do uso de polímeros são a redução da quantidade de lodo e a sua maior amenidade à desidratação. Embora o custo unitário dos polímeros catiônicos seja cerca de 10 a 15 vezes maior que o custo do sulfato de alumínio, as reduzidas dosagens requeridas reduz seu custo, próximos aos dos coagulantes químicos. Outra vantagem dos polímeros catiônicos são as características do lodo formado, relativamente mais denso o que facilita sua desidratação e disposição final. Ao contrário do lodo gelatinoso e volumoso oriundo do uso do sulfato de alumínio. Além disso, os flocos resultantes da coagulação com sulfato de alumínio são essencialmente de natureza inorgânica, portanto, o lodo não entra em decomposição biológica (Santos Filho e Santa Rita, 2002).

Desta forma o presente trabalho teve por objetivo avaliar quatro agentes coagulantes/floculantes (quitosana, sementes de moringa, Tanfloc SG e sulfato de alumínio) e determinar as condições ótimas do processo de coagulação/floculação no tratamento primário de um efluente de galvanoplastia.

MATERIAIS E MÉTODOS

CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Foram realizadas três coletas em datas distintas do efluente proveniente de uma indústria de galvanização localizada na região oeste do Paraná. As atividades desenvolvidas nesta indústria são: estanhagem, niquelagem, cromagem e cobreação, sendo as águas de lavagem provenientes destes tratamentos de superfícies destinados num único tanque de tratamento. A quantidade de efluente gerado na indústria está diretamente relacionada à produção diária de peças, uma vez que a empresa opera em função de pedidos de clientes. Após cada coleta foi realizada a caracterização do efluente, segundo cor (mg PtCo/L), turbidez (NTU), DQO (mg O₂/L) e pH.

TESTES DE PRECIPITAÇÃO

Foram realizados testes de precipitação variando o pH inicial do efluente do primeiro lote até 12, com intervalo de 0,5 pela adição de solução de NaOH de concentração 0,1 N. Este ensaio teve como finalidade identificar o pH em que se inicia a precipitação. Amostras do efluente foram dispostas em béqueres de 100 mL e houve correção do pH inicial.

ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

Foram realizados testes em Jar-Test Microcontrolado marca Milan, Modelo JT – 103 para avaliar a eficiência de cada coagulante. Foram analisados coagulantes do tipo inorgânico (sulfato de alumínio) e orgânico (quitosana, sementes de Moringa Oleifera Lam e Tanfloc SG) no processo de coagulação/floculação.

Para analisar a eficiências dos coagulantes, foi realizado um planejamento saturado de Plackett e Burman (PB12). As seguintes variáveis foram estudadas: concentração (C), velocidade de mistura rápida (VMR) e lenta (VML) e tempo de mistura rápida (TMR) e lenta (TML).

A escolha das melhores dosagens de coagulantes bem como as variáveis: velocidade de mistura rápida (VMR) e lenta (VML) e tempo de mistura rápida (TMR) e lenta (TML) a serem utilizados no PB12 foram estabelecidos com base na literatura (Da Silva et al. 2003, Fiorentini 2005, Cardoso 2007 e TANAC 2008). Nas Tabelas (1) e (2) são apresentadas as faixas de concentração de cada coagulante estudado e as variáveis, respectivamente, seguindo os dados da literatura.



Tabela 1: Concentrações utilizadas no PB12

Coagulante	Concentração (ppm)		
	-1	0	+1
Sulfato de Alumínio	40	45	50
Quitosana	5	6	7
Sementes de Moringa	200	350	500
Tanfloc SG	300	350	400

Tabela 2: Valores das variáveis utilizadas no PB 12

Variável	-1	0	+1
VMR (rpm)	100	110	120
VML (rpm)	20	25	30
TMR (min)	1	2	3
TML (min)	10	15	20

Os ensaios foram realizados num Jar-Test com 1,2 L de efluente empregando as condições apresentadas na Tabela (3). O tempo de sedimentação utilizado para os quatro coagulantes foi de 30 min, sendo este valor estipulado com base em resultados preliminares (Genevro, et al. 2008).

Tabela 3: Matriz do planejamento saturado de Plackett e Burman (PB12)

Ensaio	C	VMR	VML	TMR	TML
1	+1	-1	+1	-1	-1
2	+1	+1	-1	+1	-1
3	-1	+1	+1	-1	+1
4	+1	-1	+1	+1	-1
5	+1	+1	-1	+1	+1
6	+1	+1	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1	+1	-1
8	-1	-1	+1	+1	+1
9	-1	-1	-1	+1	+1
10	+1	-1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	-1
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0

Após cada ensaio foi coletada uma amostra de cerca de 50 mL do sobrenadante para a determinação dos seguintes parâmetros: cor (mg Pt/Co), turbidez (NTU) e DQO (mg O₂/L) e outra amostra de 1 litro para a determinação de sólidos sedimentáveis (mL/L.h) A partir dos resultados destes parâmetros foi selecionado o coagulante que apresentou os melhores resultados de remoção.

Posteriormente, foi feito um tratamento estatístico para identificar as variáveis mais significativas no processo de coagulação/floculação. A partir destes resultados foram realizados novos ensaios com um novo planejamento DCCR (Delineamento Composto Central Rotacional), para as respostas cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Nas Tabelas (4-6) são apresentadas as características das águas de lavagem do efluente de galvanoplastia empregados nos ensaios de coagulação/floculação em Jar-Test para os ensaios preliminares (1º lote), planejamento saturado de Plackett e Burman (2º lote) e Delineamento Composto Central Rotacional (3º lote), respectivamente.

Tabela 4: Parâmetros caracterizados das águas de lavagem do efluente de galvanoplastia para o 1º lote

Parâmetro	Cor (mg PtCo/L)	Turbidez (NTU)	pH
	1608,00	264,80	6,45

Tabela 5: Parâmetros caracterizados das águas de lavagem do efluente de galvanoplastia para o 2º lote

Parâmetro	Cor (mg PtCo/L)	Turbidez (NTU)	DQO (mg O ₂ /L)	pH
	1521,17	232,39	198,50	6,18

Tabela 6: Parâmetros caracterizados das águas de lavagem do efluente de galvanoplastia para o 3º lote

Parâmetro	Cor (mg PtCo/L)	Turbidez (NTU)	DQO (mg O ₂ /L)	pH
	1820,00	297,00	283,00	6,55

TESTES DE PRECIPITAÇÃO

Os resultados do teste de precipitação demonstraram que após a correção do pH inicial do efluente em intervalos de 0,5 com adição NaOH houve precipitação, tornando o efluente visualmente com menor quantidade de materiais dissolvidos e suspensos. Além disso, como o valor de pH do efluente se enquadra na faixa de operação requerida para cada coagulante estudado (Cardoso 2007, Cruz et al. 2007, Divakaran e Sivasankara Pillai 2002), optou-se por trabalhar sem correção do pH do efluente.

PLANEJAMENTO SATURADO DE PLACKETT E BURMAN (PB12)

Nas Tabelas 7-10 são apresentados os resultados obtidos das porcentagens de remoção de cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO, para os coagulantes sulfato de alumínio, quitosana, sementes de *Moringa oleifera* Lam e Tanfloc SG no planejamento PB12, respectivamente.

Verifica-se por meio das Tabelas 7-10 que a melhor combinação dos resultados para maior taxa de remoção de cor, turbidez e DQO e menor geração de lodo ocorreu com o agente coagulante/floculante quitosana, com 93,48 %, 95,71 % e 31,46 % de remoção, para cor, turbidez e DQO respectivamente e com 0,60 % de geração de lodo (sólidos sedimentáveis).

Apesar da menor remoção de DQO, em relação ao coagulante sulfato de alumínio e Tanfloc SG, a escolha da quitosana é atribuída a maior quantidade de matéria orgânica no lodo, o que propicia o processo de decomposição natural.



Tabela 7: Matriz com resultados de cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO para o coagulante Sulfato de Alumínio no PB12

Ensaio	C	VMR	VML	TMR	TML	Cor	Turbidez	Sólidos	DQO
1	50	100	30	1	10	82,47	84,15	1,25	41,23
2	50	120	20	3	10	85,50	87,25	1,40	40,74
3	40	120	30	1	20	85,11	83,92	1,35	44,69
4	50	100	30	3	10	81,88	81,89	1,30	14,57
5	50	120	20	3	20	88,64	90,87	1,10	42,22
6	50	120	30	1	20	83,84	85,51	0,70	37,78
7	40	120	30	3	10	82,47	82,79	0,80	27,41
8	40	100	30	3	20	83,15	83,92	1,40	41,23
9	40	100	20	3	20	85,50	87,70	1,40	48,64
10	50	100	20	1	20	84,92	86,87	1,25	38,77
11	40	120	20	1	10	82,08	84,23	0,90	13,09
12	40	100	20	1	10	80,80	83,02	1,00	33,83
13	45	110	25	2	15	82,76	85,81	1,30	41,23
14	45	110	25	2	15	82,47	85,28	1,20	41,23
15	45	110	25	2	15	82,66	85,36	0,90	40,74
16	45	110	25	2	15	79,63	82,64	1,30	45,19

Tabela 8: Matriz com resultados de cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO para o coagulante Quitosana no PB12

Ensaio	C	VMR	VML	TMR	TML	Cor	Turbidez	Sólidos	DQO
1	9	100	30	1	10	87,87	90,73	1,40	3,48
2	9	120	20	3	10	90,34	93,75	1,40	29,25
3	7	120	30	1	20	88,20	92,28	1,10	28,52
4	9	100	30	3	10	88,65	92,28	1,50	24,10
5	9	120	20	3	20	93,48	95,71	2,00	24,10
6	9	120	30	1	20	93,15	95,29	2,30	29,25
7	7	120	30	3	10	88,43	90,98	1,40	29,99
8	7	100	30	3	20	89,10	91,93	1,40	28,52
9	7	100	20	3	20	90,00	92,90	1,40	31,46
10	9	100	20	1	20	92,81	95,54	1,10	17,47
11	7	120	20	1	10	85,62	89,19	0,60	16,73
12	7	100	20	1	10	84,72	88,29	1,20	0,53
13	8	110	25	2	15	90,00	92,09	1,20	24,10
14	8	110	25	2	15	88,99	90,81	0,90	24,10
15	8	110	25	2	15	90,34	91,87	1,30	21,15
16	8	110	25	2	15	88,31	90,24	1,40	24,83



Tabela 9: Matriz com resultados de cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO para o coagulante Moringa no PB12

Ensaio	C	VMR	VML	TMR	TML	Cor	Turbidez	Sólidos	DQO
1	500	100	30	1	10	43,50	86,51	0,00	-22,91
2	500	120	20	3	10	42,93	86,64	0,00	-25,55
3	200	120	30	1	20	42,59	86,51	0,02	-13,22
4	500	100	30	3	10	40,79	82,97	0,00	-49,78
5	500	120	20	3	20	40,68	74,98	0,20	-50,22
6	500	120	30	1	20	40,90	76,42	0,03	-26,43
7	200	120	30	3	10	38,20	75,63	0,09	-1,32
8	200	100	30	3	20	41,47	82,05	0,03	-11,01
9	200	100	20	3	20	41,58	69,21	0,03	-13,66
10	500	100	20	1	20	33,91	68,03	0,11	-39,21
11	200	120	20	1	10	39,10	75,11	0,04	-16,30
12	200	100	20	1	10	42,03	78,12	0,02	-9,69
13	350	110	25	2	15	35,71	70,39	0,00	-31,28
14	350	110	25	2	15	35,26	69,08	0,00	-29,07
15	350	110	25	2	15	35,49	72,23	0,01	-30,40
16	350	110	25	2	15	35,94	70,66	0,02	-26,87

* valores negativos correspondem ao aumento do valor do parâmetro

Tabela 10: Matriz com resultados de cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO para o coagulante Tanfloc SG no PB12

Ensaio	C	VMR	VML	TMR	TML	Cor	Turbidez	Sólidos	DQO
1	400	100	30	1	10	54,18	97,61	5,20	21,05
2	400	120	20	3	10	56,20	98,44	5,90	47,37
3	300	120	30	1	20	53,89	98,45	4,80	34,74
4	400	100	30	3	10	54,18	97,85	4,60	36,32
5	400	120	20	3	20	55,91	98,45	6,40	38,95
6	400	120	30	1	20	56,20	98,37	8,20	39,47
7	300	120	30	3	10	54,32	96,96	7,40	25,79
8	300	100	30	3	20	54,18	97,31	7,60	10,53
9	300	100	20	3	20	56,05	98,40	8,40	36,84
10	400	100	20	1	20	56,63	98,10	8,20	26,32
11	300	120	20	1	10	54,76	98,42	8,00	18,42
12	300	100	20	1	10	53,17	96,96	7,60	40,53
13	350	110	25	2	15	55,04	98,33	8,60	12,63
14	350	110	25	2	15	54,61	97,06	8,80	9,47
15	350	110	25	2	15	54,76	97,33	8,40	8,42
16	350	110	25	2	15	55,19	98,12	9,00	1,05

Assim sendo, fez-se análise estatística para a quitosana buscando valores mais altos para cor, turbidez e DQO e valores mais baixos para sólidos. Por meio dos gráficos de Pareto (Figura 1), verifica-se que para nível de significância de 5%, as variáveis TML e C influenciam positivamente a remoção de cor e turbidez, indicando que um aumento dessas variáveis resulta no aumento acentuado de ambas quanto as taxas de remoção. Para os sólidos sedimentáveis, apenas a variável C teve influência no processo, indicando que para diminuir o volume de lodo gerado, deve-se diminuir a concentração de coagulante. Por outro lado, este volume gerado é pequeno, não necessitando minimizá-lo ainda mais. O que torna atrativo este tipo de lodo produzido, quando comparado ao lodo obtido por coagulantes químicos, é a sua maior facilidade à desidratação e posterior disposição final,

confirmado por Santos Filho e Santa Rita (2002). Com relação à remoção de DQO utilizando a quitosana, verificou-se que as variáveis TMR, TML e VMR influenciam positivamente esta variável.

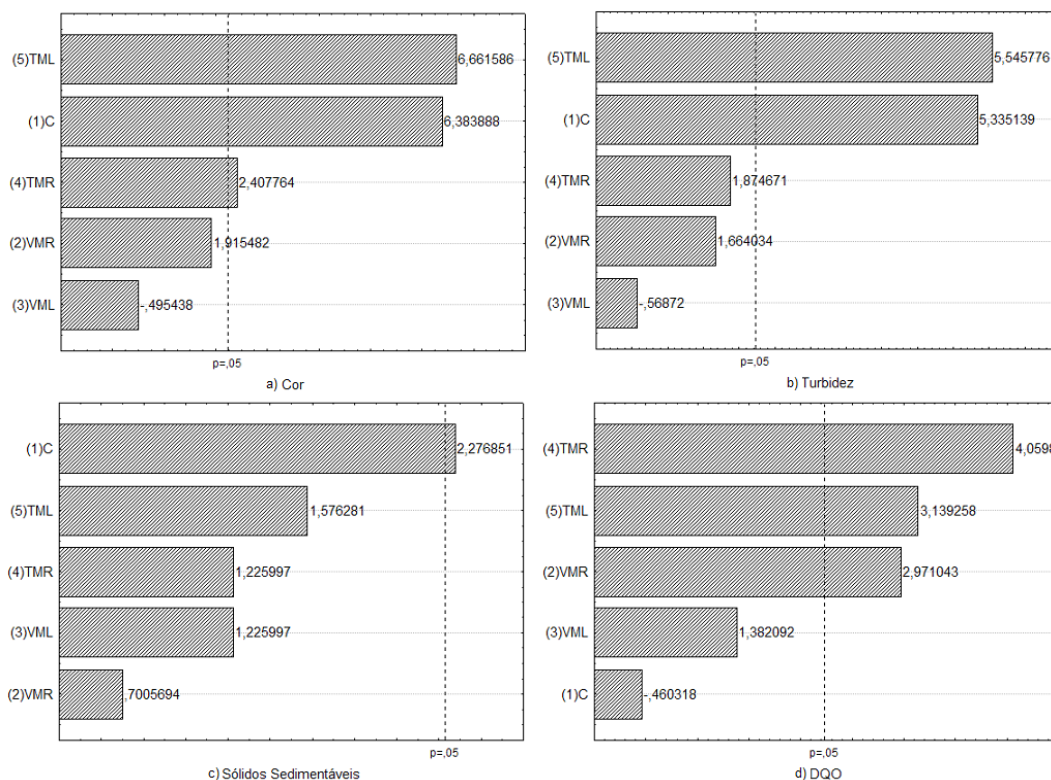


Figura 1: Gráficos de Pareto para as respostas a) cor, b) turbidez, c) sólidos sedimentáveis e d) DQO do coagulante quitosana

DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL (DCCR)

Após a análise estatística das respostas obtidas para a quitosana, realizou-se a otimização das variáveis mais significativas, concentração (C), tempo de mistura rápida (TMR) e tempo de mistura lenta (TML), usando um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), com 2^3 (planejamento completo) + 2×3 (estrela) + 4 (centrais), totalizando 18 ensaios, para as respostas cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO. Sendo usados níveis mais elevados para as variáveis a serem estudadas. As variáveis velocidade de mistura rápida (VMR) e velocidade de mistura lenta (VML) foram fixadas em 100 e 20 rpm, respectivamente.

Na Tabela 11 é apresentada às faixas de concentração, tempo de mistura rápida e tempo de mistura lenta para o coagulante quitosana no DCCR.

Tabela 11: Concentrações e variáveis utilizadas no DCCR

Variável	-1,68	-1	0	+1	+1,68
C (ppm)	10	14,05	20	25,95	30
TMR (rpm)	4	4,24	5	5,36	6
TML (rpm)	25	27,01	30	32,59	35

Na Tabela 12 são apresentadas a matriz do DCCR utilizado e as porcentagens de remoção de cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO, após a realização do DCCR. Observa-se na Tabela 12 que o aumento da concentração de coagulante está relacionado ao aumento de lodo gerado, o que não limita seu emprego em virtude deste lodo apresentar maior potencial de decomposição biológica e maior amenidade à desidratação. A partir dos resultados obtidos foi realizada análise estatística dos parâmetros avaliados.



Pelo fato de ter mais de uma variável de resposta (cor, turbidez e DQO) e se tem interesse em encontrar os valores operacionais ótimos das variáveis independentes (C, TMR e TML) que satisfaçam simultaneamente todos os requisitos necessários às variáveis dependentes, o programa estatístico utiliza a abordagem da função Desirability (desejabilidade). Com este artifício, a otimização simultânea das variáveis de respostas maximiza-se num único valor, a desejabilidade global. A vantagem do uso dessa definição é que a desejabilidade global sempre é anulada quando uma resposta apresenta um valor inaceitável, mesmo que outras respostas apresentem valores aceitáveis (Barros Neto et al., 2007).

Tabela 12: Matriz com resultados de cor, turbidez, sólidos sedimentáveis e DQO para o coagulante Quitosana no DCCR

Ensaio	C	TMR	TML	Cor	Turbidez	Sólidos	DQO
1	14,05	4,24	27,01	88,25	96,53	1,70	6,64
2	25,95	4,24	27,01	88,04	92,76	0,90	26,57
3	14,05	5,36	27,01	88,22	94,72	0,80	29,52
4	25,95	5,36	27,01	88,11	94,43	1,80	35,79
5	14,05	4,24	32,59	88,25	95,94	1,20	5,90
6	25,95	4,24	32,59	88,18	94,57	2,00	12,55
7	14,05	5,36	32,59	88,18	96,87	2,10	24,72
8	25,95	5,36	32,59	88,15	96,53	2,00	34,32
9	10	5	30	88,22	96,09	1,30	35,06
10	30	5	30	88,07	95,16	2,40	26,94
11	20	4	30	88,76	96,09	2,10	18,82
12	20	6	30	88,91	95,21	1,40	25,46
13	20	5	25	88,51	96,77	2,60	24,72
14	20	5	35	88,65	95,94	2,00	14,76
15	20	5	30	88,11	95,70	2,40	29,89
16	20	5	30	87,93	94,96	2,30	20,30
17	20	5	30	87,85	93,69	2,00	15,87
18	20	5	30	87,53	94,08	2,00	18,45

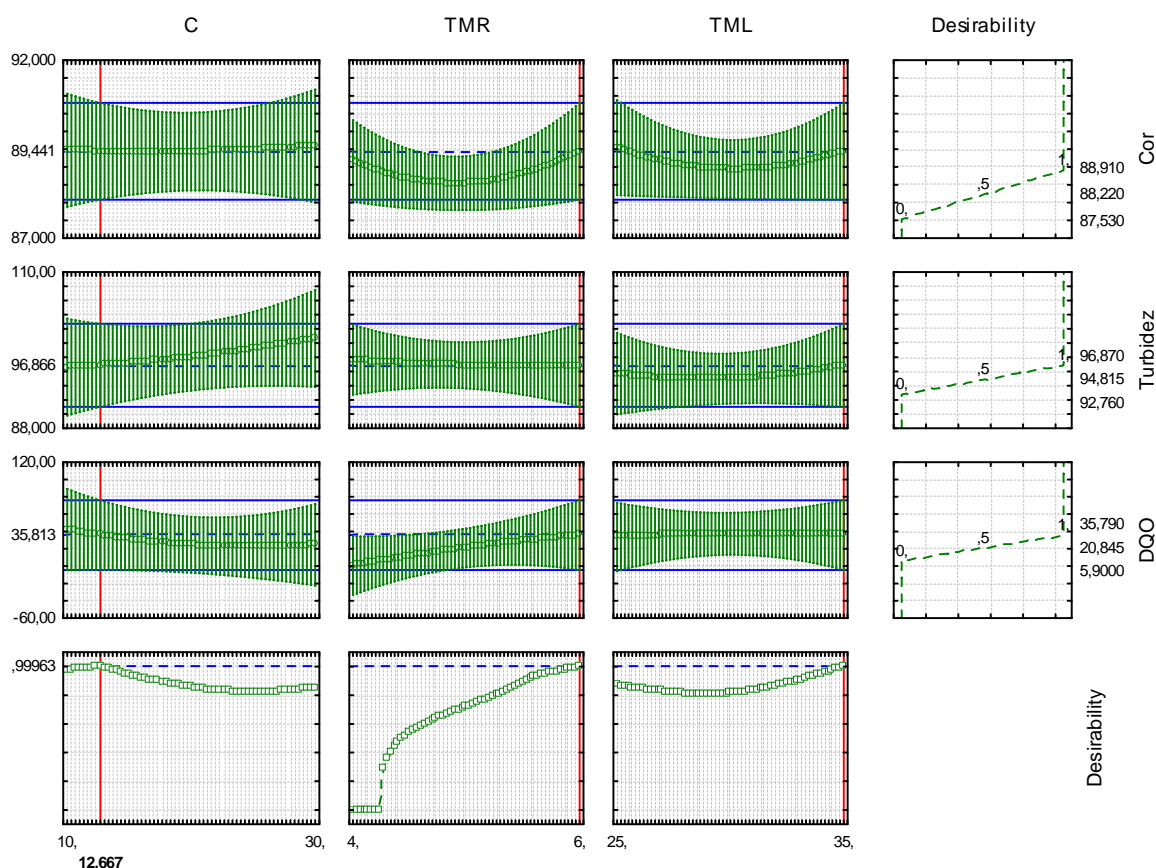


Figura 2: Gráficos estatísticos para a função desirability global

Como pode ser observado na Figura 2, o conjunto de condições que maximiza a desejabilidade global (0,99) são: concentração igual a 12,67 ppm, tempo de mistura rápida de 6 min e tempo de mistura lenta de 35 min, no tempo de sedimentação de 30 min, velocidade de mistura rápida e lenta de 100 rpm e 20 rpm, respectivamente. Nessas condições as três variáveis de resposta, cor, turbidez e DQO, devem apresentar valores para porcentagem de remoção igual a 89,44; 96,87 e 35,81, respectivamente.

CONCLUSÕES

Os experimentos demonstraram que dentre os agentes coagulantes testados, após a realização do Planejamento Saturado de Plackett e Burman, a quitosana apresentou a melhor combinação dos resultados para maior taxa de remoção de cor, turbidez e DQO com 93,48 %, 95,71 % e 31,46 %, respectivamente e menor geração de lodo (sólidos sedimentáveis) correspondendo a 0,60 % para o efluente de galvanoplastia. A partir do Delineamento Composto Central Rotacional, a condição operacional ótima determinada estatisticamente pela função Desirability para o agente coagulante/floculante quitosana foi: concentração igual a 12,67 ppm, tempo de mistura rápida de 6 min, tempo de mistura lenta de 35 min, velocidade de mistura rápida de 100 rpm e velocidade de mistura lenta de 20 rpm, em um tempo de sedimentação de 30 min, para a remoção de cor, turbidez e DQO. Assim sendo a quitosana mostrou-se um agente coagulante/floculante promissor para o tratamento do efluente de galvanoplastia estudado.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. BARROS NETO, B., SCARMINIO, I.S., BRUNS, R.E. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria, Ed.: Editora da Unicamp (ed.). Campinas, 2002. Vol.3, 1-480.
2. BRAILE, P.M., CAVALCANTI, J.E.W.A. Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais, CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, Brasil. 1993.
3. CARDOSO, V.C. Estudo do Processo de Coagulação/Floculação por Meio da Moringa Oleifera Lam para Obtenção de Água Potável. Maringá. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá 2007.
4. CRUZ, J.G.H., MENEZES, J.C.S.S., RUBIO, J., SCHNEIDER, I.A.H. Aplicação de Coagulante Vegetal à Base de Tanino no Tratamento de por Coagulação/Floculação e Adsorção/Coagulação/Floculação do Efluente de uma Lavanderia Industrial, XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL 2005. Anais. Campo Grande MS, 2005.
5. DA SILVA, F.J.A., SOUZA, L.M.M., MAGALHÃES, S.L. Uso potencial de biopolímeros de origem vegetal na descolorização de efluente têxtil índigo, XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL 2003. Anais. Joinville SC, 2003.
6. DIVAKARAN, R., SIVASANKARA PILLAI, V.N. Flocculation of river silt using chitosan, Water Research, 36 (9), p.2414-2418, May 2002.
7. FIORENTINI, V. Uso do Tanino no Processo de Tratamento de Água como Melhoria em Sistema de Gestão Ambiental. Santa Maria. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria 2005.
8. GENEVRO, G.M., VAZ, L.G.L., FAGNANI, K.C., FAGUNDES-KLEN, M.R., VEIT, M.T., DA SILVA, E.A. Estudo da remoção de cor e turbidez em um efluente de galvanoplastia utilizando diferentes agentes coagulantes, CONGRESSO DA ACADEMIA TRINACIONAL DE CIÊNCIAS 2008. Anais. Foz do Iguaçu PR, 2008.
9. GHEBREMICHAEL, K, A. Moringa seed and pumice as alternative natural materials for drinking water treatment. 2004. PhD thesis. Stockholm: Department of Land and Water Resources Engineering, 2004.
10. MORAES, L.C.J., BERGAMASCO, R., TAVARES, C.R.G., RIBEIRO, R.M. Utilização do polímero natural quitosana no processo de coagulação/floculação/ultrafiltração para a produção de água potável, XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E SANITÁRIA AMBIENTAL 2005. Anais. Campo Grande MS, 2005.
11. MUYIBI, S. A., EVISON, L. M. Optimizing physical parameters affecting coagulation of turbid water with Moringa Oleifera seeds. Water Resources, Fenix, v. 29, n. 12, p. 2689-2695, 1995.
12. NDABIGENGESERE, A., NARASIAH, S., TALBOT, B.G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera. Water Research, Cardiff, UK v. 29, n. 2, p. 703-710, 1995.
13. PAVANELLI, G. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada. São Carlos. 2001. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos 2001.
14. SANTOS FILHO, J.D. E SANTA RITA, E.S. Gerenciamento do Resíduo Gerado Na Clarificação de água da RLAM. 2002. Monografia de Especialização, Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica 2002.
15. TANAC. Boletim Informativo. Montenegro. Brasil, 2008, pp57.
16. VEIT, M.T. Estimação de parâmetros de transferência de massa para biossorção de cromo (III) e Níquel(II) num sistema contínuo em coluna de leito fixo pela biomassa de alga marinha Sargassum filipendula. Maringá. 2006. Dissertação de Doutorado. Universidade Estadual de Maringá 2006.