

## EFEITO DA DOSAGEM DE COAGULANTE E FLOCULANTE NA SEDIMENTAÇÃO DE LAMAS DE MINÉRIO DE FERRO\*

*Anderson Willian Henrique Santini<sup>1</sup>  
João Paulo Sousa Coelho<sup>2</sup>  
Wellington Ribeiro Moreira<sup>3</sup>*

### Resumo

A sedimentação consiste em uma operação unitária de separação entre sólidos e líquido, realizada em tanques denominados sedimentadores, que se baseia na ação do campo gravitacional sobre as partículas para decantá-las e removê-las da água. Sua eficácia é extremamente dependente do tamanho das partículas, tendo em vista que a velocidade de sedimentação é diretamente proporcional ao tamanho delas. Dessa forma, no espessamento das lamas, é imprescindível a utilização de reagentes químicos (coagulante e floculante) que possibilitem a formação de agregados de maior tamanho. Neste contexto, realizou-se esse trabalho para investigar o efeito da dosagem desses reagentes sobre a sedimentação de lamas de minério de ferro. Para isso, empregou-se o Planejamento Fatorial, por meio do qual se planejou uma série de ensaios de sedimentação, variando-se as dosagens desses reagentes. As variáveis resposta monitoradas foram: a área unitária de sedimentação, o índice de turbidez do líquido sobrenadante e o percentual de sólido do material sedimentado. Baseado nos resultados experimentais, concluiu-se que os menores valores de área unitária de espessamento foram obtidos em dosagens maiores de coagulante e floculante, ao passo que dosagens excessivas desses reagentes, especialmente de floculante, provocaram um aumento do índice de turbidez do líquido sobrenadante e uma redução do grau de adensamento da polpa espessada.

**Palavras-chave:** Espessamento; Lamas; Floculante; Coagulante.

### THE IMPACT OF THE DOSAGE OF FLOCCULANT AND COAGULANT ON THE THICKENING OF IRON ORE SLIMES

#### Abstract

Sedimentation is a unit operation of separation between solids and liquid, performed in tanks called thickeners, that is based on the action of gravitational field on the particles in order to remove them from water. Its efficiency is extremely dependent on particle size, considering that the sedimentation rate is directly proportional to their sizes. Because of this, in thickening of slimes, it's necessary to employ coagulation and flocculation process, which make use of chemical reagents in order to bring them together, forming larger aggregates which have higher sedimentation rates. In this context, it was performed this work with the proposal to investigate the impact of dosage of coagulant and flocculant on sedimentation of a sample of iron ore slime. For this objective, it was used a Factorial Design to design a set of sedimentation tests, which it was performed with different doses of these reagents. The response variables that were monitored during tests were: the unit area of sedimentation, turbidity of the supernatant liquid and the solid percentage of sediments. Based on the results, it can be concluded that the smaller unit area values of thickness were obtained at higher doses of coagulant and flocculant, whereas the abrupt elevation of the amount of such reagents added to the slurry, especially flocculant, caused an increase in turbidity of the supernatant liquid and a reduction in the degree of thickening of the thickened pulp.

**Keywords:** Thickening; Slimes; Coagulation and Flocculation.

\* Contribuição técnica ao 18º Simpósio de Mineração, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

- <sup>1</sup> *Administrador de Empresas, Especialista em Engenharia de Produção, Coordenador de Controle Operacional, Gerência de Controle Operacional de Processos (GCOP), CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), Congonhas, Minas Gerais e Brasil.*
- <sup>2</sup> *Engenheiro Químico, Especialista em Engenharia de Tratamento Mineral, Engenheiro de Processos, Gerência de Controle Operacional de Processos (GCOP), CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), Congonhas, Minas Gerais e Brasil.*
- <sup>3</sup> *Engenheiro de Minas, Mestre em Tecnologia Mineral, Gerente de Controle Operacional de Processos, Gerência de Controle Operacional de Processos (GCOP), CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), Congonhas, Minas Gerais e Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Cremasco (2012), a sedimentação pode ser definida como uma operação de separação entre sólido e líquido, que se utiliza da ação do campo gravitacional sobre as partículas em suspensão para removê-las da água. Lacerda, Luz e Oliveira (2004) afirmam que ela é realizada geralmente em sedimentadores, os quais consistem em tanques cilíndricos dentro dos quais a suspensão de lama é deixada em repouso para permitir a sedimentação dos sólidos suspensos, promovendo, dessa forma, a redução dos índices de turbidez da água para valores adequados à sua reutilização no processo industrial.

Conforme pode ser constatado por meio da Figura 1.1, a sedimentação é a operação de separação entre sólido e líquido que apresenta menor custo operacional, fato que, segundo Da Luz (2010), pode ser atribuído ao mecanismo de remoção das partículas sólidas da suspensão. Outro ponto que merece ser ressaltado é que, à medida que se reduz o tamanho das partículas, aumentam-se os custos dos processos de separação sólido/líquido.

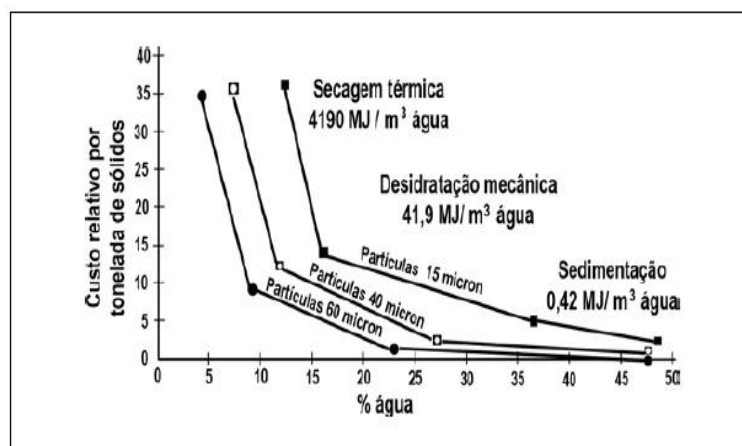


Figura 1.1: Comportamento do custo de desaguamento em função do tamanho das partículas e da quantidade de água presente. Fonte: Metso Minerals, 2006 apud Da Luz, 2010.

No caso específico das operações de sedimentação, esse comportamento (custo x tamanho das partículas) pode ser atribuído à diminuição da velocidade de sedimentação causada pela redução do tamanho das partículas. Esse fenômeno impacta diretamente nos requisitos de área dos tanques dos Espessadores, que, nesta condição, precisam ser maiores, impondo a necessidade de utilização dos processos de aglomeração.

Os processos de aglomeração consistem num conjunto de técnicas que envolvem a utilização de reagentes químicos e que visam desestabilizar os sólidos suspensos, possibilitando, dessa forma, a formação de agregados entre as partículas ultrafinas e coloidais. Esses agregados, cujos tamanhos são maiores que as partículas isoladas, possuem velocidade de sedimentação superior às últimas.

Os processos de aglomeração mais utilizados são a coagulação e a floculação. O primeiro se caracteriza pela aplicação de coagulantes, os quais consistem em eletrólitos, à suspensão visando promover a compressão da dupla camada elétrica das partículas e, dessa forma, reduzir a repulsão entre elas, possibilitando a formação de agregados menores, chamados coágulos. Já a floculação envolve a utilização de polímeros com elevado peso molecular, denominados floculantes, objetivando promover a união dos coágulos ou agregados de partículas, proporcionando a formação dos flocos.

É importante ressaltar que, geralmente, para aumentar a eficiência das operações de espessamento das lamas encontradas nos rejeitos das plantas de beneficiamento de minério, constituídas por partículas coloidais e ultrafinas, são empregados os dois processos de aglomeração.

Dentro deste contexto, este trabalho se propõe, através de uma série de ensaios de decantação com uma amostra de lama, proveniente da deslamagem dos finos de minério de ferro, estudar o efeito da dosagem de coagulante e floculante sobre o processo de sedimentação.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para realização do trabalho, o primeiro passo foi elaborar o planejamento dos ensaios de sedimentação de forma a atender o objetivo do trabalho. Dentro deste contexto, adotou-se o método de Planejamento Fatorial por Delineamento Composto Central com réplica, sendo a sequência dos ensaios e as respectivas dosagens de floculante e coagulante geradas no *software* estatístico Minitab® (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Planejamento Fatorial dos testes de sedimentação das lamaz

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Floculante (g/t)	Coagulante (g/t)
24	1	0	1	40	175
6	2	-1	1	54	175
21	3	-1	1	40	281
10	4	0	1	40	175
19	5	-1	1	54	175
1	6	1	1	30	100
3	7	1	1	30	250
5	8	-1	1	26	175
26	9	0	1	40	175
11	10	0	1	40	175
16	11	1	1	30	250
17	12	1	1	50	250
15	13	1	1	50	100
25	14	0	1	40	175
4	15	1	1	50	250
14	16	1	1	30	100
12	17	0	1	40	175
23	18	0	1	40	175
8	19	-1	1	40	281
2	20	1	1	50	100
7	21	-1	1	40	69
20	22	-1	1	40	69
22	23	0	1	40	175
18	24	-1	1	26	175
9	25	0	1	40	175
13	26	0	1	40	175

De posse do planejamento dos ensaios, o próximo passo foi obter as amostras para realização dos testes de sedimentação.

## 2.1. ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO

Os testes foram realizados seguindo o procedimento padrão do laboratório de processos da Mina Casa de Pedra/CSN Mineração.

### 2.1.1. MATERIAIS

- Becker;
- Cronômetro;
- Proveta de vidro de 2.000 ml;
- Floculante aniônico de alta densidade Flonex 934VHM®, fornecido pela empresa SNF;
- Coagulante Praestol 187K®, fornecido pela empresa Solenis;
- Plunger (Haste de Agitação);
- Turbidímetro;
- Análise granulométrica: peneiramento, na faixa granulométrica compreendida entre 150 e 38 $\mu$ m, e *cyclosizer* da empresa CIMAQ, na faixa de tamanhos inferior a 38 $\mu$ m;

### 2.1.2. PROCEDIMENTO

O primeiro passo foi homogeneizar a amostra de lama, oriunda da planta de tratamento de minérios da Mina Casa de Pedra. Em seguida, retiraram-se duas alíquotas, sendo uma para aferição da fração mássica de sólidos da polpa e a outra para determinação das características química e granulométrica da amostra.

O próximo passo foi registrar o peso da proveta vazia ( $M_v$ ) e fixar a fita adesiva, onde seriam registradas as leituras da interface da camada em sedimentação.

Para realização dos ensaios, preparam-se, em dois béqueres de 2000ml, soluções diluídas de coagulante a 1% p/p (peso de soluto/peso da solução) e floculante a 0,05% p/p.

De posse das soluções dos reagentes e da massa de sólido presente na proveta, calcularam-se os volumes das respectivas alíquotas de coagulante e floculante que deveriam ser dosadas, tendo em vista a respectiva dosagem específica (g/t) correspondente ao ensaio (Tabela 2.1).

Antes que se iniciasse a dosagem dos reagentes, foi necessário promover a agitação da polpa a fim de se homogeneizar a suspensão. Após essa homogeneização e utilizando uma seringa de 10ml, adicionou-se à lama o volume calculado da alíquota de coagulante. Em seguida, com auxílio de um *plumger* (haste), agitou-se vigorosamente a mistura (polpa + coagulante), visando propiciar a formação dos coágulos.

Finalizado o processo de coagulação, o próximo passo foi dosar a solução diluída de floculante. Neste contexto e de forma análoga ao procedimento narrado no parágrafo anterior, gotejou-se, com auxílio de uma seringa, o volume calculado de floculante na proveta. Após o gotejamento, agitou-se levemente a mistura (polpa + coagulante + floculante), a fim de se promover a floculação.

Terminado o processo de floculação e usando um cronômetro, iniciou-se a contagem do tempo de sedimentação da lama e o registro das respectivas alturas da interface estabelecida entre o sedimento e a camada de água clarificada.

É importante ressaltar que, ao término dos ensaios, foi retirada uma alíquota do líquido sobrenadante para determinação do seu índice de turbidez.

De posse dos dados experimentais, o próximo passo foi a construção das curvas de sedimentação e o cálculo da área unitária de sedimentação, usando-se o método de *Talmadge e Fitch*.

O procedimento narrado neste item foi repetido para cada um dos 25 ensaios de sedimentação restantes, nos quais se alteraram apenas os valores referentes às dosagens específicas dos reagentes (coagulante e floculante).

É importante ressaltar que todos os testes foram conduzidos no pH natural da polpa, cujo valor se situou em torno de 7.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam as características granulométrica e química da amostra da lama utilizadas nos ensaios de sedimentação.

Tabela 3.1: Distribuição granulométrica da amostra de lama utilizada nos ensaios de sedimentação.

Malha ( $\mu\text{m}$ )	Massa (g)	% Ret.Simples	% Ret. Ac.	%Pass. Ac.
150	0,0	0,00	0,00	100,00
106	0,0	0,00	0,00	100,00
44	0,0	0,00	0,00	100,00
38	0,0	0,00	0,00	100,00
27	25,3	8,43	8,43	91,58
20	2,6	0,88	9,30	90,70
14	3,8	1,25	10,55	89,45
9	16,0	5,33	15,88	84,13
7	32,0	10,65	26,53	73,48
-7	220,4	73,48	100,00	0,00

Examinando a Tabela 3.1, constata-se que mais de 90% da amostra apresenta-se com tamanho abaixo da malha de  $14\mu\text{m}$ , fato que evidencia o reduzido tamanho dos seus grãos e, por consequência, a elevada área superficial das partículas.

Já a Tabela 3.2 mostra que tanto o teor de óxido de alumínio quanto de PPC (perda por calcinação) foram elevados, fato que é um indicativo da preponderância de minérios hidratados nas lamas.

Tabela 3.2: Teores dos elementos presentes na amostra de lama utilizada nos ensaios de sedimentação.

Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Mn (%)	P (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	PPC (%)
48,07	11,87	9,32	1,455	0,221	0,082	0,178	0,334	8,77

### 3.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os ensaios de sedimentação foram executados de acordo com a sequência aleatória, definida pelo *software* estatístico Minitab®, a qual foi apresentada na Tabela 2.1. Os parâmetros utilizados, para mensurar os efeitos da dosagem de coagulante e floculante sobre o processo de sedimentação das lamas, foram: a área unitária de espessamento (Au), o índice de turbidez e a fração mássica de sólidos no material sedimentado (%UF), sendo todos os resultados correspondentes a esses índices anotados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Resultados obtidos nos ensaios de sedimentação.

RunOrder	Au (m <sup>2</sup> xdia/t)	Índice de turbidez (NTU)	%UF	RunOrder	Au (m <sup>2</sup> xdia/t)	Índice de turbidez (NTU)	%UF
1	0,89	111	33%	14	1,14	120	34%
2	0,32	332	32%	15	0,23	260	33%
3	0,46	149	32%	16	1,27	103	35%
4	0,99	113	34%	17	0,72	120	34%
5	0,32	340	31%	18	0,94	119	34%
6	1,33	106	35%	19	0,49	153	32%
7	1,19	52	34%	20	0,33	392	33%
8	1,29	66	35%	21	0,78	148	35%
9	0,91	116	34%	22	0,82	150	34%
10	0,79	116	34%	23	0,97	117	34%
11	0,80	56	34%	24	1,09	70	35%
12	0,23	265	32%	25	0,96	110	32%
13	0,29	395	32%	26	0,82	110	34%

O primeiro passo, antes de se interpretar os resultados, foi proceder a análise dos resíduos experimentais para avaliar se os resultados dos ensaios atenderam as duas premissas fundamentais para aplicação da Análise de Variância: normalidade e independência entre os dados experimentais (MONTGOMERY, 2008).



As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam os gráficos obtidos para cada uma das três variáveis resposta monitoradas nos ensaios. Elas mostram que não houve violação das premissas de validade da Análise de Variâncias, pois, em todos os casos, se constata que os resíduos seguiram um modelo de distribuição normal e se distribuíram aleatoriamente, não mostrando relação de dependência, seja com o valor ajustado, ou com a ordem do experimento.

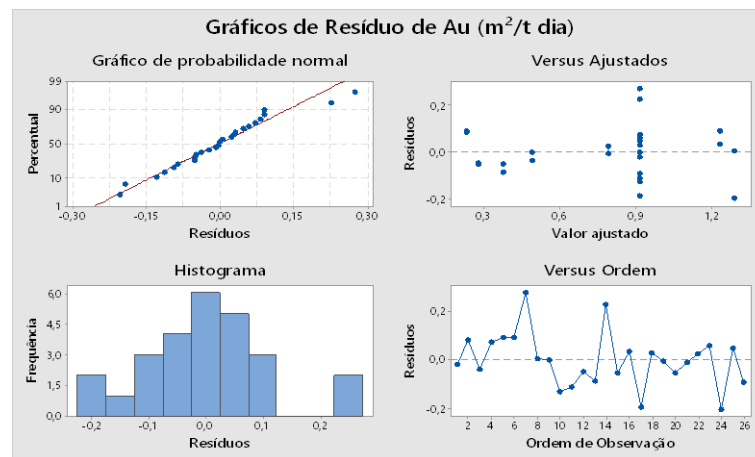


Figura 3.1: Gráfico com a análise estatística dos resíduos referentes aos índices de área unitária de espessamento.

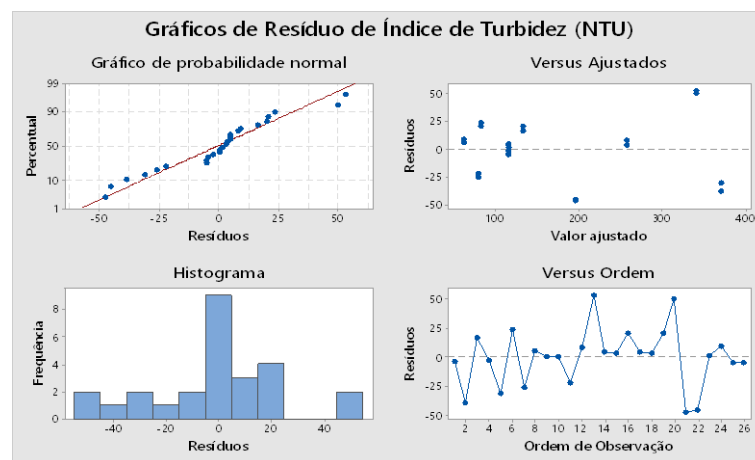


Figura 3.2: Gráfico com a análise estatística dos resíduos referentes aos índices de turbidez do líquido clarificado.

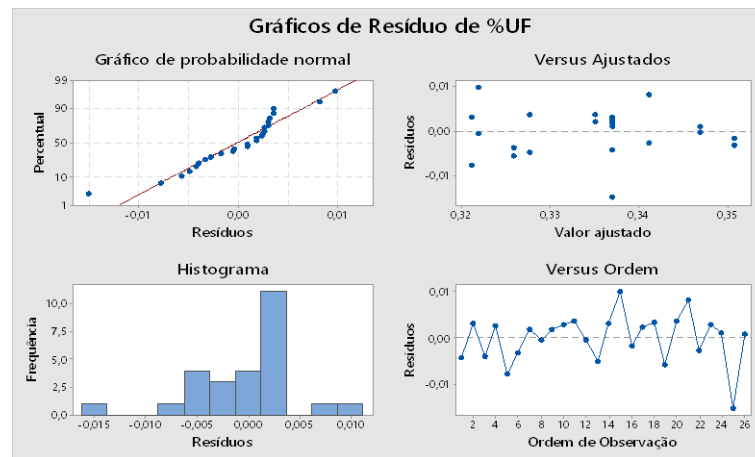


Figura 3.3: Gráfico com a análise estatística dos resíduos dos resultados do percentual de sólidos no material espessado.

A Figura 3.4 apresenta os valores com a análise de variância dos resultados experimentais. Conforme pode ser constatado pelos valores de P, menores que 0,05, tanto os fatores lineares quanto os quadráticos, correspondentes às dosagens dos reagentes, foram estatisticamente relevantes.

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	2,72699	0,54540	36,73	0,000
Linear	2	2,39687	1,19844	80,70	0,000
Floculante	1	2,22106	2,22106	149,57	0,000
Coagulante	1	0,17581	0,17581	11,84	0,003
Quadrado	2	0,30630	0,15315	10,31	0,001
Floculante*Floculante	1	0,08144	0,08144	5,48	0,030
Coagulante*Coagulante	1	0,22486	0,22486	17,34	0,000
Interação com 2 Fatores	1	0,02382	0,02382	1,60	0,220
Floculante*Coagulante	1	0,02382	0,02382	1,60	0,220
Erro	20	0,29699	0,01485		
Falta de ajuste	3	0,07042	0,02347	1,76	0,193
Erro puro	17	0,22658	0,01333	*	*
Total	25	3,02398			

Sumário do Modelo			
S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,121859	90,18%	87,72%	82,91%

Coeficientes Codificados						
Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante		0,9147	0,0385	23,74	0,000	
Floculante	-0,7452	-0,3726	0,0305	-12,23	0,000	1,00
Coagulante	-0,2096	-0,1048	0,0305	-3,44	0,003	1,00
Floculante*Floculante	-0,1530	-0,0765	0,0327	-2,34	0,030	1,02
Coagulante*Coagulante	-0,2720	-0,1360	0,0327	-4,16	0,000	1,02
Floculante*Coagulante	0,1091	0,0546	0,0431	1,27	0,220	1,00

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\text{Au (m}^2/\text{t dia)} = 1,194 + 0,0112 \text{ Floculante} + 0,00416 \text{ Coagulante} \\ - 0,000765 \text{ Floculante*Floculante} \\ - 0,000024 \text{ Coagulante*Coagulante} \\ + 0,000073 \text{ Floculante*Coagulante}$$

Figura 3.4: Análise de variância dos valores de área unitária em função dos níveis de dosagem de coagulante e floculante.

A Figura 3.5 apresenta o gráfico de superfície da área unitária em função das dosagens de coagulante e floculante. Examinando-se o gráfico, constata-se a

presença de uma curvatura acentuada na superfície de resposta, fato que já havia sido evidenciado pelos respectivos valores de P dos termos quadráticos do modelo matemático. Além do mais, observa-se, pela declividade da curva, que o efeito da variação da dosagem de floculante sobre os valores de área unitária de sedimentação foi muito mais pronunciado do que o do coagulante, fato que reflete a magnitude da diferença entre os coeficientes dos dois fatores. Esse fato pode estar relacionado à maior influência da dosagem de floculante sobre a cinética de floculação e o tamanho dos flocos formados.

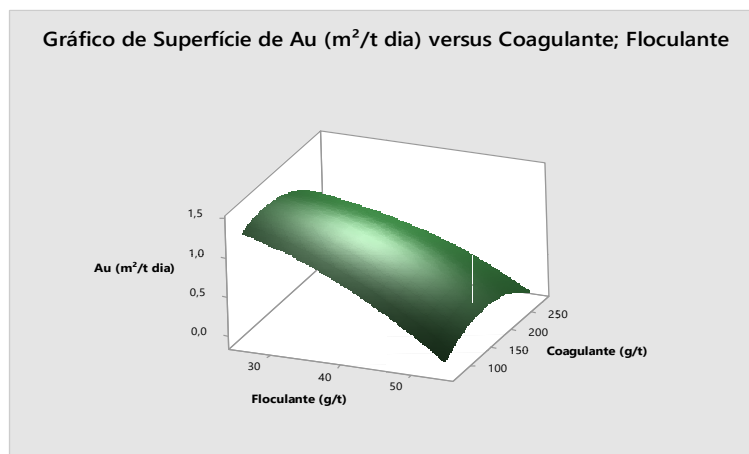


Figura 3.5: Gráfico de superfície da área unitária em função das dosagens de coagulante e floculante.

A Figura 3.6 apresenta a análise de variância dos índices de turbidez obtidos nos ensaios, medidos em NTU's (Unidade Nefelométrica de Turbidez). Conforme pode ser constatado pelos valores de P, os quais são inferiores a 0,05, tanto os fatores lineares quanto os quadráticos foram estatisticamente significativos.

Análise de Variância						
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	
Modelo	5	242955	48591	63,61	0,000	
Linear	2	200048	100024	130,94	0,000	
Floculante	1	192067	192067	251,43	0,000	
Coagulante	1	7981	7981	10,45	0,004	
Quadrado	2	39667	19833	25,96	0,000	
Floculante*Floculante	1	35210	35210	46,09	0,000	
Coagulante*Coagulante	1	8220	8220	10,76	0,004	
Interação com 2 Fatores	1	3240	3240	4,24	0,053	
Floculante*Coagulante	1	3240	3240	4,24	0,053	
Erro	20	15278	764			
Falta de ajuste	3	15057	5019	385,90	0,000	
Erro puro	17	221	13	*	*	
Total	25	258233				

Sumário do Modelo				
S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
27,6387	94,08%	92,60%	87,53%	

Coeficientes Codificados						
Termo	Efeito	EP de		Valor T	Valor-P	VIF
		Coef	Coef			
Constante		115,20	8,74	13,18	0,000	
Floculante	219,13	109,56	6,91	15,86	0,000	1,00
Coagulante	-44,67	-22,33	6,91	-3,23	0,004	1,00
Floculante*Floculante	100,61	50,31	7,41	6,79	0,000	1,02
Coagulante*Coagulante	48,61	24,31	7,41	3,28	0,004	1,02
Floculante*Coagulante	-40,25	-20,12	9,77	-2,06	0,053	1,00

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas	
Índice de Turbidez (NTU)	= 478 - 24,59 Floculante - 0,737 Coagulante
	+ 0,5031 Floculante*Floculante
	+ 0,00432 Coagulante*Coagulante
	- 0,0268 Floculante*Coagulante

Figura 3.6: Análise de variância dos valores de turbidez do líquido sobrenadante em função dos níveis de dosagem de coagulante e floculante.

Ainda de acordo com os dados da Figura 3.6, constata-se, pelos valores do  $R^2$  ajustado ( $R^2_{aj}$ ), que o modelo matemático proposto explica 92% das variações observadas durante o experimento, não obstante existir evidência estatística, dada pelo valor de P correspondente ao termo “Falta de ajuste”, de que ele não é o mais adequado para explicar o comportamento do índice de turbidez.

A Figura 3.7 apresenta o gráfico de superfície do índice de turbidez em função das dosagens de coagulante e floculante. Analisando o gráfico, observa-se que, partindo-se da origem, há uma ligeira queda no índice de turbidez nas dosagens iniciais de coagulante e floculante, comportamento que se inverte à medida que se elevam esses valores (dosagens). Esse fenômeno pode ser consequência do processo de saturação superficial das partículas ultrafinas, as quais, segundo Lewellyn e Avotins (1998 apud DA LUZ, 2010) estão mais susceptíveis a sofrerem recobrimento total (overdose) pelas moléculas do reagente, por causa do seu reduzido tamanho. Este fenômeno provoca a estabilização estérica das partículas, que dessa forma não se aglomeram, mantendo-se isoladas. Nesta condição e por ser extremamente pequenas, elas permanecerão indefinidamente em suspensão, levando ao aumento do índice de turbidez do líquido sobrenadante.

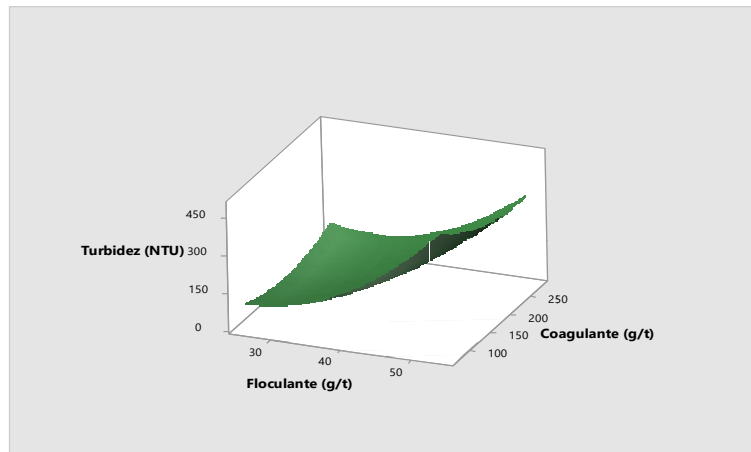


Figura 3.7: Gráfico de superfície do índice de turbidez do líquido sobrenadante em função das dosagens de coagulante e floculante.

A Figura 3.8 apresenta os valores com a análise de variância dos percentuais de sólido. Conforme pode ser constatado pelos valores de P, os quais são inferiores a 0,05, os fatores lineares correspondentes às dosagens dos reagentes são estatisticamente relevantes, ao passo que aqueles relacionados aos termos quadráticos não são significativos (P valor maior que 0,05), sugerindo a inexistência de curvatura. Esse fenômeno implica que o adensamento do material espessado exibe um comportamento linear com a dosagem dos reagentes, decrescendo à medida que essa aumenta, visto que ambos os coeficientes são negativos.

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	0,001902	0,000380	11,59	0,000
Linear	2	0,001790	0,000895	27,25	0,000
Floculante	1	0,001325	0,001325	40,33	0,000
Coagulante	1	0,000465	0,000465	14,17	0,001
Quadrado	2	0,000063	0,000032	0,96	0,398
Floculante*Floculante	1	0,000030	0,000030	0,92	0,350
Coagulante*Coagulante	1	0,000041	0,000041	1,26	0,275
Interação com 2 Fatores	1	0,000049	0,000049	1,49	0,236
Floculante*Coagulante	1	0,000049	0,000049	1,49	0,236
Erro	20	0,000657	0,000033		
Falta de ajuste	3	0,000146	0,000049	1,61	0,223
Erro puro	17	0,000511	0,000030	*	*
Total	25	0,002559			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0057307	74,34%	67,92%	55,90%

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante		0,33707	0,00181	186,00	0,000	
Floculante	-0,01820	-0,00910	0,00143	-6,35	0,000	1,00
Coagulante	-0,01079	-0,00539	0,00143	-3,76	0,001	1,00
Floculante*Floculante	-0,00294	-0,00147	0,00154	-0,96	0,350	1,02
Coagulante*Coagulante	-0,00345	-0,00172	0,00154	-1,12	0,275	1,02
Floculante*Coagulante	0,00495	0,00248	0,00203	1,22	0,236	1,00

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\%UF = 0,3762 - 0,00031 \text{ Floculante} - 0,000097 \text{ Coagulante} - 0,000015 \text{ Floculante} \cdot \text{Floculante} - 0,000000 \text{ Coagulante} \cdot \text{Coagulante} + 0,000003 \text{ Floculante} \cdot \text{Coagulante}$$

Figura 3.8: Análise de variância dos valores do percentual de sólidos do material sedimentado (%UF) em função dos níveis de dosagem de coagulante e floculante.

O comportamento decrescente do grau de adensamento com a dosagem de coagulante e floculante, o qual é mostrado na Figura 3.9, é consequência direta do mecanismo de floculação. Conforme abordado anteriormente, o processo de floculação por “pontes” envolve a formação de agregados extremamente porosos (Figura 3.11), que contém uma grande quantidade de água “aprisionada” em seu interior (DA LUZ, 2010).

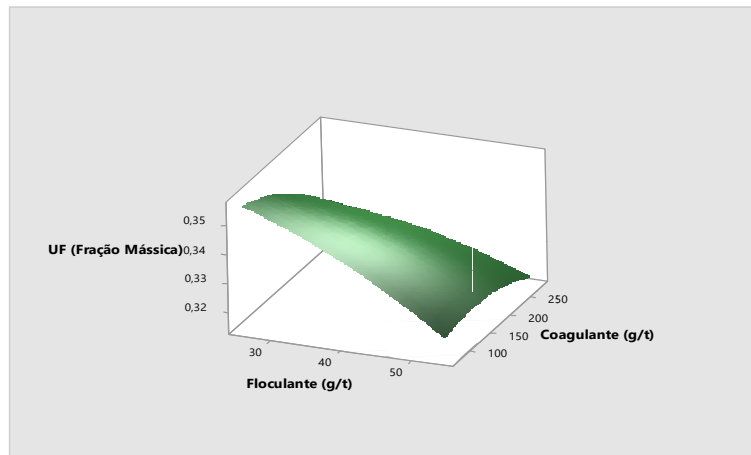


Figura 3.9: Gráfico de superfície do percentual de sólido do material sedimentado em função das dosagens de coagulante e floculante.

#### 4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir, com base nos resultados experimentais, que a dosagem de coagulante e de floculante exerceu um papel preponderante sobre os três fatores que foram utilizados para mensurar a eficiência do processo de sedimentação, afetando-os de forma distinta.

A área unitária de sedimentação exibiu uma queda acentuada em seu valor à medida que se aumentou a dosagem de reagentes, fenômeno que pode ser associado ao crescimento mais acelerado do tamanho dos agregados formados.

O índice de turbidez do líquido sobrenadante foi inferior em dosagens menores de reagentes. Este fato se deve à maior propensão das partículas coloidais, responsáveis pelo aumento do índice de turbidez, a ser, mais rapidamente, completamente recobertas pelas moléculas dos reagentes, e, por

consequência, sofrer estabilização estérica, fenômeno que impede o processo de floculação.

Já o percentual de sólidos do material sedimentado, como era esperado, decresceu à medida que se elevou a dosagem dos reagentes. O decréscimo do grau de compactação com a elevação da dosagem dos reagentes, especialmente de floculante, é consequência direta do mecanismo de floculação por pontes, o qual resulta na formação de agregados extremamente porosos, que possuem grande quantidade de água aprisionada em seu interior.

## REFERÊNCIAS

- 1 CREMASCO, M. A. Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. São Paulo: Blucher, 2012.
- 2 DA LUZ, Adão Benvindo et al. **Tratamento de Minérios**. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- 3 LACERDA, C.M.M; LUZ, J.A.M; OLIVEIRA, M.L.M. Espessamento e Filtragem. Disponível em: <[https://cetm\\_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/apostila\\_ufop.pdf](https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/apostila_ufop.pdf).> Acesso em: 07 nov. 2015.
- 4 MONTGOMERY, Douglas C.Applied. **Statistics and probability for engineers** / Douglas C. Montgomery, George C.Runger. 3th ed. Arizona: John Wiley & Sons, Inc, 2008.