

RICARDO FERREIRA MASSABKI

**SUSPENSÃO DE PARTÍCULAS GROSSA DE APATITA:
APLICAÇÃO DO MODELO DE SEDIMENTAÇÃO-DISPERSÃO**

São Paulo

2010

RICARDO FERREIRA MASSABKI

**SUSPENSÃO DE PARTÍCULAS GROSSA DE APATITA:
APLICAÇÃO DO MODELO DE SEDIMENTAÇÃO-DISPERSÃO**

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas
do curso de graduação do Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientação: Prof. Dr. Laurindo de Salles Leal
Filho

São Paulo

2010

TF-2010

M382/s

Siguro 2170891

M20108

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700008313

FICHA CATALOGRÁFICA

Massabki, Ricardo Ferreira

Suspensão de partículas grossas de apatita em células mecânicas de flotação: aplicação do modelo de sedimentação-dispersão / R.F. Massabki. -- São Paulo, 2010.

42 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Agitação de líquidos 2. Flotação de minérios 3. Fosfatos 4. Hidrodinâmica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

Aos meus pais, meu irmão e minha
namorada, por todo apoio e carinho

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de prestar seus mais sinceros agradecimentos:

Ao professor Dr. Laurindo de Salles Leal Filho, pela orientação do trabalho, estando sempre disponível para ajudar, compartilhar suas experiências, sempre levando em conta as condições de operações industriais de tratamento de minérios.

A todos os meus colegas de graduação de engenharia de minas, ingressantes de 2005 e 2006, pelo apoio e convivência harmoniosa ao longo de todo o curso.

Ao CNPQ, pela bolsa de iniciação científica que proporcionou o suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Ao grupo do LFQI: Marisa, Célio, Ivani, Adriana, Kelly, Simone e em especial a Thiago e Odair, pela ajuda durante minha iniciação científica.

“Não confunda derrotas com fracasso nem vitórias com sucesso. Na vida de um campeão sempre haverá algumas derrotas, assim como na vida de um perdedor sempre haverá vitórias. A diferença é que, enquanto os campeões crescem nas derrotas, os perdedores se acomodam nas vitórias.”

Roberto Shinyashiki

RESUMO

A flotação é uma operação unitária aplicada a processos de concentração de minerais em meio aquoso na presença de bolhas de ar, largamente utilizada na indústria mineral. Para tanto, as partículas minerais devem ter as suas superfícies devidamente modificadas por meio de reagentes químicos, e devem ser colocadas em suspensão para possibilitar a colisão entre as partículas sólidas e as bolhas de ar, promovendo a separação seletiva das partículas hidrofóbicas e hidrofílicas. Dessa forma, o conhecimento das condições operacionais que possibilitem uma melhor suspensão dos sólidos é fundamental para um maior entendimento desta operação.

De acordo com Leal Filho (2000), o levantamento das condições de algumas usinas brasileiras de flotação indica que o excesso de turbulência, provocado por uma alta rotação do impelidor, ou a deficiência na suspensão dos sólidos, acarreta um baixo rendimento do processo.

Uma forma de caracterizar o *status* da suspensão de sólidos em células de flotação ou tanques de condicionamento é através da medida das concentrações de sólidos em diferentes alturas do equipamento. Tal amostragem pode ser realizada em diferentes condições de rotação e/ou aeração. Uma ferramenta que pode ser utilizada para auxiliar a interpretação dos resultados experimentais é o modelo de dispersão-sedimentação, proposto por Barresi e Baldi (1987), que permite avaliar o comportamento do coeficiente de difusão turbulenta dos sólidos em sistemas agitados.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a distribuição de sólidos ao longo da altura de uma célula de flotação Denver, em escala de laboratório, bem como a determinação da rotação crítica de suspensão de sólidos, em condições aeradas e não-aeradas. O modelo de sedimentação-dispersão foi utilizado para estudar o comportamento de diferentes zonas de escoamentos numa célula de flotação.

Palavras-chave: Agitação de líquidos, Flotação de minérios, Fosfatos, Hidrodinâmica.

ABSTRACT

Flotation is a unit operation applied to mineral concentration processes in aqueous medium in the presence of air bubbles, widely used in mining industry. For this, the mineral particles must have their surfaces modified duly by chemical reagents, and should be placed in suspension to allow the collision between solid particles and air bubbles, promoting the selective separation of hydrophobic and hydrophilic particles. Thus, knowledge of operating conditions that allow a better suspension of solids is fundamental to an understanding of this operation.

According to Leal Filho (2000), the survey of some Brazilian flotation plants conditions indicates that excessive turbulence, triggered by a high speed impeller, or non-complete suspension of solids, generates a low process yield.

One way to characterize the status of suspended solids in flotation cells or conditioning tanks is by measuring the concentrations of solids at different heights of the equipment. Such sampling may be performed in different conditions of rotation and / or aeration. A tool that can be used to aid interpretation of experimental results, is the sedimentation-dispersion model, proposed by Barresi and Baldi (1987), that allows to evaluate the behavior of the turbulent diffusion coefficient in the stirred systems.

This study aimed to evaluate the distribution of solids along the height of a Denver flotation cell, in laboratory scale as well as determining the critical rotation of solid suspension (1-s criterium), under aerated and non-aerated conditions. The sedimentation-dispersion model was used to study the behavior of different areas of flow in a flotation cell.

Keywords: Liquid agitation, Ore flotation, Phosphates, Hydrodynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Recuperação de quartzo e apatita em função do tamanho de partículas.	11
Figura 2: Circulação de polpa em célula de flotação.....	12
Figura 3: Concentração de sólidos <i>versus</i> profundidade do tanque agitado para diferentes rotações do impelidor	14
Figura 4: Curva ilustrativa do perfil de concentração típico em sistemas agitados.	16
Figura 5: Aparato utilizado para medir a rotação crítica de suspensão de sólidos.....	19
Figura 6: Dispositivo de amostragem de sólidos.....	20
Figura 7: Aparato utilizado nos ensaios de perfil de concentração axial.	21
Figura 9: Ensaio com quartzo em condições não aeradas.....	26
Figura 10: Ensaio com quartzo em condições aeradas.....	26
Figura 11: Resultados dos ensaios com apatita em condições não aeradas	27
Figura 12: Resultados dos ensaios com apatita em condições aeradas	27
Figura 13: Efeito da rotação do rotor nas zonas de escoamento em células de flotação. Mineral: Quartzo, fração -150 + 105 μ m.....	28
Figura 14: Efeito da rotação do rotor nas zonas de escoamento em células de flotação. Mineral: Apatita, fração -150 + 105 μ m.....	29
Figura 15: Perfil de concentração de Quartzo em célula mecânica de flotação.	30
Figura 16: Perfil de concentração de Apatita em célula mecânica de flotação.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização das Fases Sólidas	19
Tabela 2: Rotações dos ensaios de perfil de concentração axial	22
Tabela 3: Resultados de ensaios de rotação crítica.....	23
Tabela 4: Resultados dos testes de precisão e acurácia	25

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

B	razão de massa sólido-líquido, %
D	diâmetro do impelidor, m
dp	diâmetro das partículas, m
Dp	coeficiente de difusão turbulenta dos sólidos, m ² /s
g	aceleração da gravidade, m/s ²
h	altura em relação à base da célula, m
KSL	parâmetro relativo às condições geométricas, s ⁻¹ m ^{-0,31}
KG	parâmetro relativo às condições de aeração, s/cm
m	massa, kg
N	rotação do impelidor, s ⁻¹
Q	vazão volumétrica de ar, L/min
S	parâmetro adimensional relativo à geometria do sistema agitado, [-]
T	diâmetro do tanque, m
vt	velocidade terminal de sedimentação das partículas, m/s
V	volume, m ³
X	concentração mássica de sólidos, %

Letras gregas

ρ	massa específica, kg/m ³
η	viscosidade cinemática, m ² /s

Subscritos

g	relativo a condições aeradas
gl	global
i	relativo a cada cota da célula
js	relativo à rotação crítica
L	líquido
S	sólido
t	total
u	relativo a condições não aeradas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	ROTAÇÃO CRÍTICA DE SUSPENSÃO.....	13
1.2	DISTRIBUIÇÃO AXIAL DE SÓLIDOS NA CÉLULA DE FLOTAÇÃO	14
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
2.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	18
2.2	ROTAÇÃO CRÍTICA SUSPENSÃO.....	19
2.3	PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS	20
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1	ROTAÇÃO CRÍTICA DE SUSPENSÃO.....	23
3.2	PERFIS DE CONCENTRAÇÃO	23
3.2.1	<i>Ensaio preliminares.....</i>	23
3.2.2	<i>Ensaio com o mineral quartzo.....</i>	25
3.2.3	<i>Ensaio com apatita</i>	27
3.2.4	<i>Aplicação do modelo de Sedimentação-Dispersão</i>	28
4	CONCLUSÕES.....	31
4.1	SUGESTÕES	31

1 INTRODUÇÃO

A flotação é uma operação unitária aplicada a processos de separação e concentração de sólidos em meio aquoso, na presença de bolhas de ar, sendo largamente utilizada na indústria mineral. Para que a separação seja bem sucedida, três eventos precisam, necessariamente, ocorrer: (a) colisão entre as partículas sólidas e as bolhas de ar; (b) adesão das partículas hidrofóbicas às bolhas de ar e formação de um agregado partícula-bolha estável, e; (c) o transporte deste agregado até a camada de espuma, de onde é retirado do sistema. Dentre esses subprocessos, a adesão partícula-bolha e formação do agregado são governadas por parâmetros físico-químicos, enquanto que a colisão partícula-bolha e transporte do agregado são governados pelas condições hidrodinâmicas do sistema, ou seja, uma vez estabelecidos os parâmetros físico-químicos, são as condições hidrodinâmicas que vão definir o sucesso ou o fracasso da operação. Dessa forma, o controle e otimização do processo trazem a necessidade de abordagens no âmbito da termodinâmica, hidrodinâmica e mineralogia.

De acordo com Leal Filho (2000), partículas de um mesmo minério, embora submetidas às mesmas condições físico-químicas (pH, concentração de reagentes, temperatura, tensão superficial), apresentam comportamento diferenciado em função da sua granulometria, como ilustra a Figura 1.

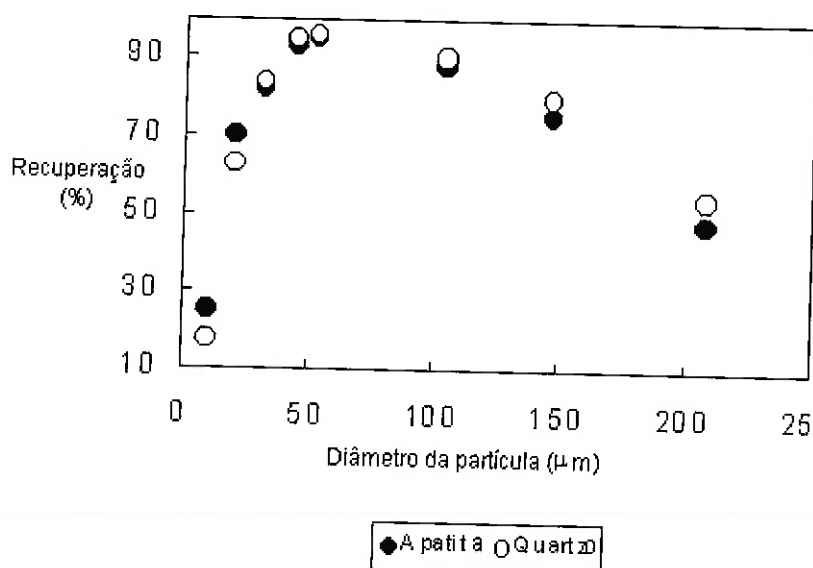


Figura 1: Recuperação de quartzo e apatita em função do tamanho de partículas. (Leal Filho, 2000).

Leal Filho (2000) estimou que aproximadamente 200 mil toneladas de apatita grossa ($d_p \geq 150 \mu\text{m}$) eram perdidas anualmente nos rejeitos das cinco maiores usinas brasileiras de flotação de fosfato (Copebrás, Ultrafértil, Fosfértil, Bunge-Araxá, Bunge-Cajati). As conseqüências dessas perdas são graves, as quais se destacam o desperdício de um recurso natural não-renovável (fosfato), bem como o aumento da quantidade de resíduos sólidos gerados pelas usinas brasileiras.

Para que o processo de flotação seja otimizado, é necessário um amplo estudo das condições hidrodinâmicas do sistema, possibilitando um melhor entendimento dos fenômenos de transporte atuantes em uma célula de flotação, permitindo a melhoria da recuperação do processo, minimizando a quantidade de rejeitos nos circuitos industriais de flotação do Brasil.

Em células mecânicas de flotação, para que ocorra colisão entre bolhas e partículas, é necessário que estas estejam adequadamente suspensas no meio aquoso. Tal suspensão advém da ação mecânica do rotor sobre o meio, promovendo continuamente um fluxo ascendente de polpa dentro da célula, como está ilustrado na Figura 2.

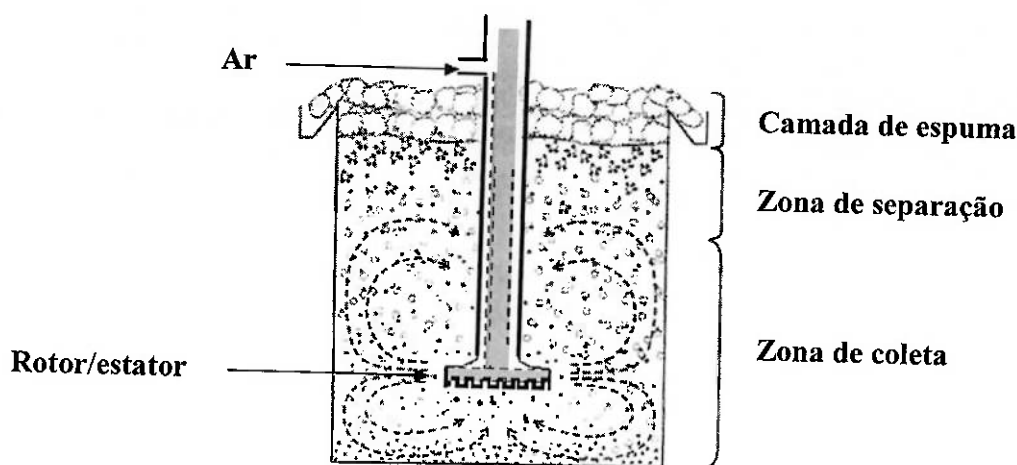


Figura 2: Circulação de polpa em célula de flotação
(LIMA; LEAL FILHO; BARBOSA, 2006).

Tal fluxo se contrapõe à natural tendência das partículas à sedimentação, decorrente da influência do campo gravitacional da Terra. As linhas de fluxo decorrentes da ação do impelidor estão em uma região da célula denominada zona de coleta ou zona turbulenta, região onde ocorrem as interações partícula-bolha, ou seja, colisão e adesão (Schubert, 1985). Na zona de separação ocorre o transporte do agregado partícula-bolha para a camada de espuma. A turbulência da zona de separação é menor do que a apresentada pela zona turbulenta. Esta zona também é chamada de zona quiescente.

Para que o *status* da suspensão de sólidos seja avaliado, é necessário o conhecimento da rotação crítica de suspensão dos sólidos e como os sólidos estão distribuídos ao longo da altura do tanque de flotação.

O presente trabalho teve como objetivos: a) determinação da rotação crítica de suspensão dos minerais Quartzo e Apatita em diferentes condições de aeração em células mecânicas de flotação de laboratório, e; b) determinação do perfil de concentração de sólidos em função da altura do tanque de flotação, possibilitando a análise do comportamento das diferentes zonas de escoamento em células de flotação.

1.1 Rotação crítica de suspensão

O critério mais amplamente utilizado para caracterização da suspensão de sólidos em sistemas agitados é o estabelecido por Zwietering (1958), também chamado critério do 1 segundo (*critério 1-s*). De acordo com tal critério, a rotação crítica de suspensão dos sólidos é aquela em que nenhum sólido permanece no fundo do tanque por mais que 1 ou 2 segundos. Zwietering realizou uma grande quantidade de experimentos, avaliando a rotação crítica em função das propriedades dos sólidos, do fluido e da geometria do sistema (tamanho do tanque, geometria do rotor, etc.), obtendo uma correlação matemática que pode ser utilizada para prever a rotação crítica em tanques agitados em sistemas bifásicos (sistema sólido-líquido), como mostra a Equação 1:

$$N_{js} = S \nu^{0,10} d_p^{0,20} g^{0,45} \left(\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} \right)^{0,45} B^{0,13} D^{-0,85} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde s é um parâmetro geométrico adimensional; ν é a viscosidade cinemática da água; B é a razão entre a massa de sólidos e a massa de água, em percentagem; g é a aceleração da gravidade; ρ_s e ρ_L são respectivamente, as massas específicas do sólido e do líquido; D é o diâmetro do impelidor, e; d_p é o diâmetro médio da partícula sólida.

É importante ressaltar que a Equação 1 foi desenvolvida para a sistemas agitados sem aeração, apenas sólido-líquido. Tal situação é encontrada em tanques de condicionamento de polpa, mas não em células de flotação. Portanto o modelo proposto por Zwietering (1958) apresenta restrições para aplicação em células mecânicas de flotação, já que estas apresentam um sistema trifásico (sólido-líquido-gás).

Para células de flotação, a única correlação encontrada na literatura para prevê a rotação crítica de suspensão em células mecânicas de flotação é aquela proposta por Van der Westhuizen e Deglon (2007). Tal correlação é ilustrada pela Equação 2.

$$N_{jsg} = K_{SL} d_p^{0,33} X^{0,17} \left(\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} \right)^{0,70} \left(\frac{\nu_L}{\nu_w} \right)^{0,05} (1 + K_G J_G) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde N_{jsg} é a rotação crítica para se atingir o critério 1 s em sistema trifásico; K_{SL} é um parâmetro relacionado à geometria do impelidor, sua posição dentro tanque e geometria do tanque; ν é a viscosidade cinemática do líquido; ν_w é a viscosidade cinemática da água a 20°C; X é a concentração mássica de sólidos; K_G é uma constante de aeração do impelidor, e; J_G é a velocidade superficial do ar.

1.2 Distribuição axial de sólidos na célula de flotação

Outra maneira de avaliar o *status* da suspensão de sólidos em tanques agitados é através do conhecimento da distribuição espacial das partículas sólidas neste tanque. A distribuição das partículas pode ser avaliada ao longo das direções axial e radial.

Em tanques agitados, a medida da homogeneidade da distribuição de sólidos é feita através da medida da concentração de sólidos em diferentes alturas (ou profundidades), obtendo-se um perfil axial de concentração de sólidos (X_{hi}) em cada quota h_i da célula (YIANATOS et al., 2001). Desta forma, um gráfico da concentração de sólidos *versus* a altura do tanque, permite uma visualização da extensão da suspensão de sólidos, conforme ilustra a Figura 3.

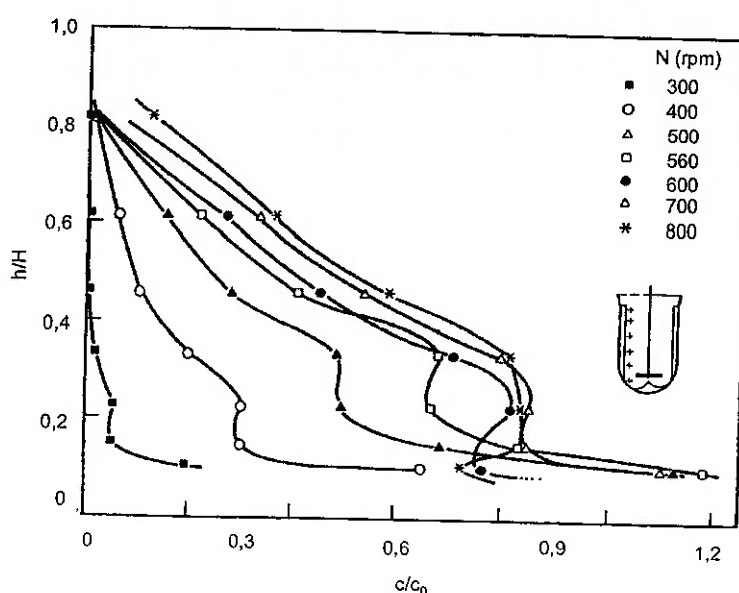


Figura 3: Concentração de sólidos *versus* profundidade do tanque agitado para diferentes rotações do impelidor (YAZI SHAMLOU; KOUTSAKOS, 1988).

A distribuição vertical de sólidos pode também ser descrita através do modelo de Sedimentação-Dispersão (BARRESI; BALDI, 1987). Tal modelo bifásico considera, entre outros pontos, que não há gradiente de concentração radial de sólidos no interior do tanque. Dada a complexidade do regime turbulento, várias simplificações devem ser realizadas para a modelagem dos fenômenos. Algumas considerações são apresentadas na literatura quando o modelo de Sedimentação-Dispersão é considerado (BARRESI; BALDI, 1987; SCHUBERT, 1999):

- a) a diminuição na turbulência causada pelas partículas suspensas pode ser ignorada;
- b) o fenômeno da sedimentação retardada pode ser negligenciado;
- c) não ocorre aglomeração de partículas;

d) à fase sólida pode ser aplicada as equações da mecânica dos meios contínuos.

Considerando estas condições, a partir da equação da continuidade escrita na forma de um gradiente na coordenada axial, Barresi e Baldi (1987) obtiveram a Equação 3.

$$v_t X = -D_p \frac{dX}{dh} \quad (\text{Equação 3})$$

Manipulando a Equação 3, pode-se obter a Equação 4:

$$\frac{d \ln X}{dh} = -\frac{v_t}{D_p} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde v_t é a velocidade terminal dos sólidos, e D_p representa o coeficiente de difusão turbulenta dos sólidos.

Sabendo que a célula de flotação apresenta duas regiões de escoamento, além da camada de espuma: a) uma região de maior turbulência, localizada próxima ao rotor da célula, que é chamada de zona de turbulência ou zona de coleta, e; b) uma região acima da zona turbulenta, mais distante do impelidor, chamada zona quiescente ou de transporte; é possível aplicar o modelo de Sedimentação-Dispersão aos resultados dos perfis de concentração para identificar a extensão de cada uma dessas regiões. Tal identificação é obtida pela mudança brusca de inclinação da curva dos perfis de concentração, sugerindo a mudança de uma zona de escoamento mais turbulenta para outra menos turbulenta (Lima, 2009). Na Figura 4 é ilustrado, de forma simplificada, o comportamento típico dos perfis de concentração de sólidos em sistemas agitados.

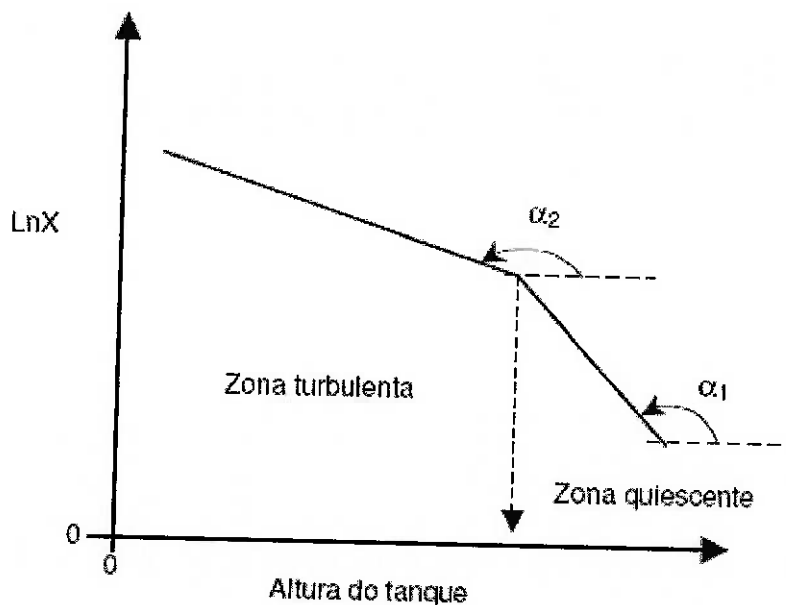


Figura 4: Curva ilustrativa do perfil de concentração típico em sistemas agitados.

O modelo de Sedimentação-Dispersão pode ser utilizado como uma ferramenta para explicar o comportamento ilustrado pela Figura 4.

Na Figura 4 pode ser observado que a inclinação da curva pode ser dividida em duas partes: α_1 e α_2 , com $\alpha_2 > \alpha_1$. Aplicando o modelo de Sedimentação-Dispersão, as Expressões 5 e 6 podem ser escritas.

$$\left(-\frac{v_t}{D_p}\right)_2 > \left(-\frac{v_t}{D_p}\right)_1 \quad (\text{Expressão 5})$$

$$\left(\frac{v_t}{D_p}\right)_2 < \left(\frac{v_t}{D_p}\right)_1 \quad (\text{Expressão 6})$$

Considerando a velocidade terminal constante para todo o volume da célula, a Expressão 7 pode ser escrita.

$$(D_p)_1 < (D_p)_2 \quad (\text{Expressão 7})$$

A Expressão 7 mostra que o coeficiente de difusão turbulenta dos sólidos é menor nas regiões superiores da célula do que nas regiões próximas ao rotor. Dessa forma, a amostragem da polpa em diferentes alturas de uma célula mecânica de

flotação ou um tanque de condicionamento permite avaliar a razão entre a velocidade de sedimentação e o coeficiente de difusão turbulenta dos sólidos, e identificar a extensão da zona de turbulência nesses sistemas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação das amostras

Para os ensaios preliminares e definição da metodologia, foram utilizadas amostras de esferas de vidro, fornecidas pela Zirtec, situada em São Paulo-SP. Para os ensaios definitivos, foram usadas amostras de quartzo proveniente da mineração Jundu lote 60727B e amostras de apatita de Ipirá-BA.

A preparação das amostras de apatita envolveu britagem em britador de mandíbulas, moagem em moinho de rolos, peneiramento a úmido, secagem em estufa a 40°C. A preparação das amostras de quartzo envolveu moagem em moinho de bolas, peneiramento a úmido e secagem em estufa. Já as amostras de esferas de vidro foram apenas peneiradas a úmido e secas em estufa. Após essas etapas para adequação da granulometria, foram feitas pilhas alongadas com todas as amostras e retirados padrões da amostra com a massa adequada. O cálculo dessa massa para as amostras foi feito a partir do volume total de polpa da célula de 4,5 L e da concentração de sólidos global de 15%, utilizando-se as Equações 8 e 9.

$$V_s + V_L = V_t = 4,5 \text{ L} \quad (\text{Equação 8})$$

$$\frac{m_s}{\rho_s V_s + \rho_L V_L} = X_{gl} = 15\% \quad (\text{Equação 9})$$

Substituindo a Equação 8 na Equação 9, obtém-se a Equação 10, utilizada para o cálculo das massas dos padrões de amostra.

$$m_s = \frac{V_t \cdot \rho_s}{\left[\frac{(1 - X_{gl}) \cdot \rho_s}{X_{gl} \cdot \rho_L} + 1 \right]} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde V_t é o volume total de polpa; ρ_s e ρ_L são as massas específicas do sólido e do líquido, respectivamente; X_{gl} é a concentração global de sólidos; V_s e V_L são os volumes do sólido e do líquido, respectivamente, e; m_s é a massa e sólidos.

A massa específica dos sólidos foi obtida por picnometria. A Tabela 1 mostra a faixa granulométrica dos sólidos, bem como suas respectivas massas específicas e quantidade de material utilizado em cada ensaio.

Tabela 1: Caracterização das Fases Sólidas

Sólidos	Faixa granulométrica (μm)	Massa Específica (kg/m^3)	Massa de sólidos (kg)	Massa de água (kg)	Porcentagem de sólidos global obtida (%)
Esfera de vidro	-149+105	2479	0,741	4,250	14,9
Quartzo	-149+105	2645	0,745	4,272	14,8
Apatia ígnea	-149+105	3172	0,752	4,323	14,8

2.2 Rotação crítica suspensão

A rotação crítica para cada sólido na faixa de tamanho utilizado foi determinada, e foram utilizadas as mesmas porcentagens desta rotação tanto para o quartzo quanto para a apatita. As porcentagens da rotação crítica utilizadas foram de 70%, 85%, 100% e 120%. O critério de Zwietering foi caracterizado por inspeção visual, por meio de um espelho inclinado e iluminado colocado abaixo da cuba de acrílico transparente da máquina de flotação, permitindo a visualização do fundo da célula, possibilitando variar a rotação do impelidor, e observar, simultaneamente, o comportamento dos sólidos no fundo do tanque. A Figura 5 ilustra o esquema experimental utilizado para verificar o critério 1-s.

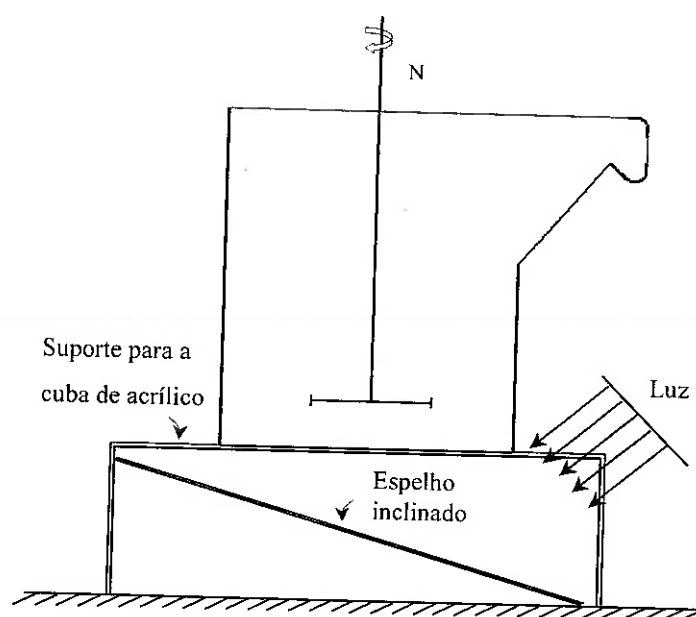


Figura 5: Aparato utilizado para medir a rotação crítica de suspensão de sólidos

A visualização do critério de Zwietering foi obtida pelo aumento gradual da rotação do impelidor ao mesmo tempo em que o fundo da célula de acrílico transparente era observado. Enquanto havia sólidos depositados no fundo da célula,

continuava-se aumentando lentamente a rotação. À medida que se aumentava a rotação do impelidor, menos sólidos permaneciam sedimentados no fundo do tanque. O critério 1-s adotado foi cumprido quando se observava que nenhum sólido permanecia sedimentado no fundo por mais de 1 ou 2 segundos. Às vezes, havia um grupo de partículas depositadas mas que, rapidamente, eram arrancadas do fundo da célula, preenchendo assim o critério adotado neste trabalho.

2.3 Perfil de concentração de sólidos

Para a obtenção do perfil de concentração de sólidos na célula de flotação, a célula foi dividida em 5 regiões de igual volume (900 mL). As alturas do topo de cada zona em relação à base da célula são de 3,9 cm, 7,6 cm, 11,2 cm, 14,6 cm e de 17,8 cm, que era o nível de polpa durante os ensaios. Para que a medida da zona superior da célula pudesse ser realizada, o amostrador foi colocado a 17 cm em relação à base, de tal forma que ele ficasse totalmente imerso. Este dispositivo amostrador foi dimensionado e construído a partir de uma válvula tigre de ½ polegada e dois tubos de PVC transparente, como mostrado na Figura 6.



Figura 6: Dispositivo de amostragem de sólidos.

Os ensaios realizados com esferas de vidro tiveram o objetivo apenas de definição da metodologia experimental. Para tanto, eles foram realizados em um sistema não aerado, por possuir maior facilidade de visualização do dispositivo, e uma rotação ligeiramente acima da rotação crítica (8% acima da rotação crítica), garantindo assim a suspensão de todos os sólidos, e que a média aritmética das concentrações locais se aproximasse da concentração global de sólidos. Van der Westhuizen e Deglon (2007) observaram que, quando se trabalha em rotações abaixo da rotação crítica, existe a formação de um leito de sólidos no fundo da célula, e nesse caso a concentração média ao longo da altura da célula passa a ser menor que a concentração global da célula, pela menor quantidade de sólidos suspensos. Os ensaios preliminares determinaram que um tempo de coleta entre 2 e 3 segundos era suficiente para que a amostra pudesse entrar no dispositivo, sem ocorrer sedimentação de sólidos dentro do amostrador.

Com o auxílio de um suporte universal e uma garra, o amostrador era posicionado no topo de cada região de igual volume, e era medida a massa de polpa coletada, e em seguida essa polpa era seca em estufa até apresentar massa constante. Os ensaios eram realizados em condições aeradas, com uma vazão volumétrica de ar de 3L/min, também em condições não aeradas. A concentração de sólidos local era obtida através da Equação 11, tanto para as polpas aeradas quanto para as polpas não aeradas. O aparato utilizado nos ensaios para determinação do perfil de concentração axial é ilustrado na Figura 7.

$$X_i = \frac{m_{si}}{m_{pi}}$$

(Equação 11)

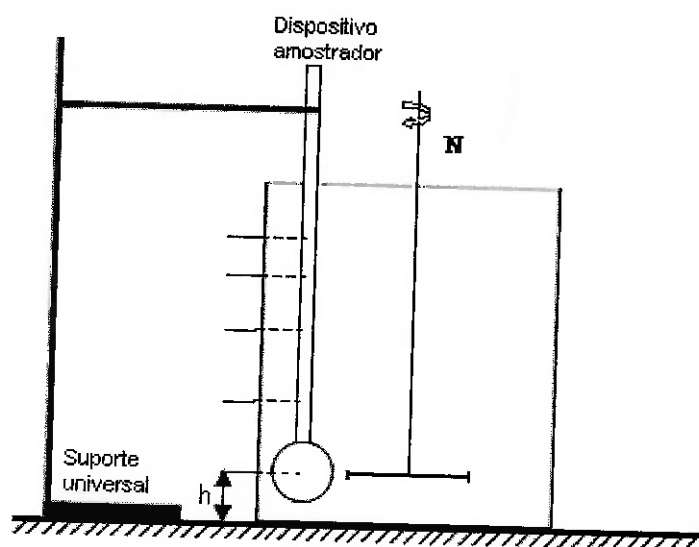


Figura 7: Aparato utilizado nos ensaios de perfil de concentração axial.

A partir dos valores de rotação crítica obtidos, foram determinadas as rotações para os ensaios de determinação do perfil de concentração de sólidos. Estas rotações são apresentadas na Tabela 2

Tabela 2: Rotações dos ensaios de perfil de concentração axial

Material	Condição de aeração	70%N _{js} , rps	85%N _{js} , rps	100%N _{js} , rps	120%N _{js} , rps
Esferas de vidro	não aerada	14,9	18,1	21,3	25,6
	aerada	20,7	25,1	29,6	35,5
Quartzo	não aerada	15,2	18,4	21,7	26,0
	aerada	20,7	25,1	29,6	35,5
Apatita	não aerada	17,2	20,9	24,6	29,5
	aerada	23,3	28,3	33,3	40,0

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Rotação crítica de suspensão

Os valores da rotação crítica de Zwietering para os sistemas aerados e não aerados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados de ensaios de rotação crítica

Sólido	Massa específica (kg/m ³)	Vazão de alimentação de ar (L/min)	Rotação crítica (rps)
Esferas de vidro	2479	0	21,3
Quartzo	2645	0	21,7
		3	29,6
Apatita	3172	0	24,6
		3	33,3

A partir dos dados dispostos na Tabela 3, pode-se perceber que a rotação crítica é maior para a apatita, e menor para as esferas de vidro. Tal fato é explicado pela maior massa específica da apatita em relação ao quartzo e as esferas de vidro, visto que tal parâmetro exerce um papel preponderante na rotação crítica de suspensão, como ilustram as Equações (1) e (2), para tanques agitados e células de flotação, respectivamente. Também se pode notar a necessidade de uma rotação consideravelmente maior para alcançar suspensão crítica em condições aeradas. Isto se deve, provavelmente, pela diminuição da capacidade de bombeamento do impelidor na presença de ar, como mostrado por Lima et al. (2006).

3.2 Perfis de concentração

3.2.1 Ensaios preliminares

A Figura 6 apresenta os resultados dos ensaios preliminares para definição da metodologia experimental para determinação do perfil concentração de sólidos. O experimento 1 foi realizado em sistema não aerado, na rotação crítica, enquanto que os outros experimentos foram realizados em uma rotação ligeiramente maior (8% acima da rotação crítica). Quanto ao tempo e forma de amostragem, tal experimento não obedeceu nenhum critério de coleta, ou seja, o dispositivo era deixado aberto por cerca de 10 a 15 segundos e em seguida era fechado. Como pode ser observado na Figura 5, a concentração de sólidos foi extremamente elevada, provavelmente pela deposição de sólidos no fundo do amostrador.

Como forma de solucionar esse problema, os experimentos seguintes foram realizados com um tempo de amostragem menor, como ilustrado na Figura 8. Os

experimentos 3, 4 e 5 foram realizados em condições idênticas, para avaliar o grau de reprodutibilidade dos ensaios.

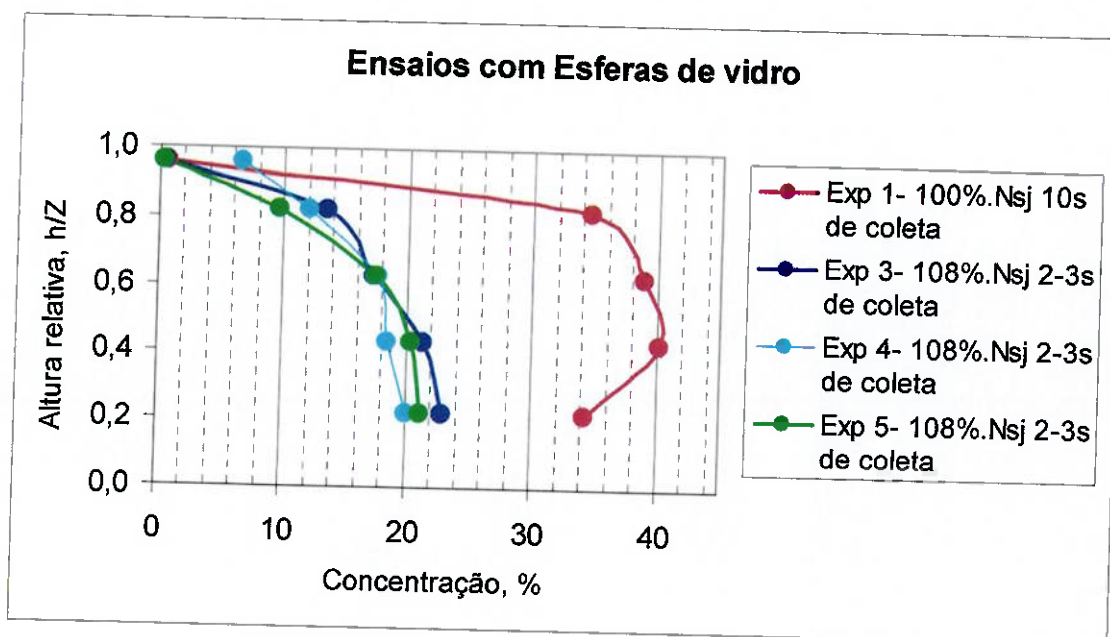


Figura 8: resultados dos ensaios de esferas de vidro

Pode ser observado na Figura 8 que os experimentos 3, 4 e 5 alcançaram uma boa reprodutibilidade. Os ensaios seguintes, com quartzo e apatita foram realizados seguindo a mesma metodologia usada nos experimentos com as esferas de vidro.

Para a avaliação da acurácia, foi utilizada a relação proposta por Westhuizen e Deglon (2007), de que a concentração global de sólidos na célula de flotação é igual à média dos valores de concentrações de sólidos medidos em cada altura, ponderados pelo seu respectivo volume representado. Como a célula foi dividida em 5 zonas de igual volume (900ml), essa média ponderada é calculada através da média aritmética das porcentagens de sólidos em cada altura. A comparação desta média aritmética com a porcentagem de sólidos global previamente estabelecida (15%) nos dá idéia da acurácia do valor de porcentagens de sólidos medidos pelo dispositivo. A tabela 4 mostra os resultados dos testes de acurácia e precisão.

Tabela 4: Resultados dos testes de precisão e acurácia

	X1,%	X2,%	X3,%	$X_{\text{médio altura}}(\%)$	Desv.pad./ $X_{\text{médio}}$
	0,42	0,52	6,56	0,47	0,15
	11,33	12,42	12,09	11,95	0,05
	21,34	17,29	17,62	18,75	0,12
	23,82	21,22	18,37	21,14	0,13
	22,12	22,92	19,94	21,66	0,07
$X_{\text{médio ensaio}}(\%)$	15,81	14,87	14,92	15,20	0,03
$ X_{\text{médio ensaio}} - X_{\text{gl}} /X_{\text{gl}}$	0,05	0,01	0,01		

Os resultados apresentados na tabela 4, boa precisão e acurácia da porcentagem de sólidos medida pelo dispositivo amostrador, com exceção de uma medida, que foi desconsiderada no cálculo de porcentagem média.

3.2.2 Ensaios com o mineral quartzo

Uma vez estabelecida a metodologia experimental, foram realizados os ensaios com quartzo. A Figura 9 apresenta os resultados em condições não aeradas, e a Figura 10 apresenta os resultados dos ensaios com aeração de 3L/min. Não foi possível realizar os ensaios em condições aeradas 20% acima da rotação crítica ($120\% N_{jsg}$), tanto para o ensaio com apatita quanto para o ensaio com quartzo, pois a célula não conseguiu atingir as rotações especificadas (40 rps para apatita e 35,5 rps para o quartzo). A linha tracejada representa a concentração global de sólidos da célula, que em todos os experimentos era igual a 15%.

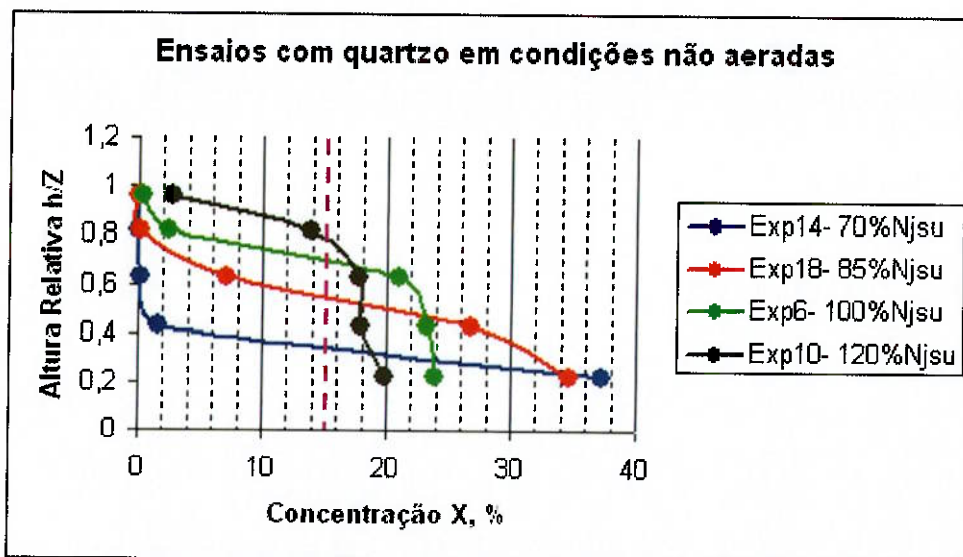


Figura 9: Ensaio com quartzo em condições não aeradas

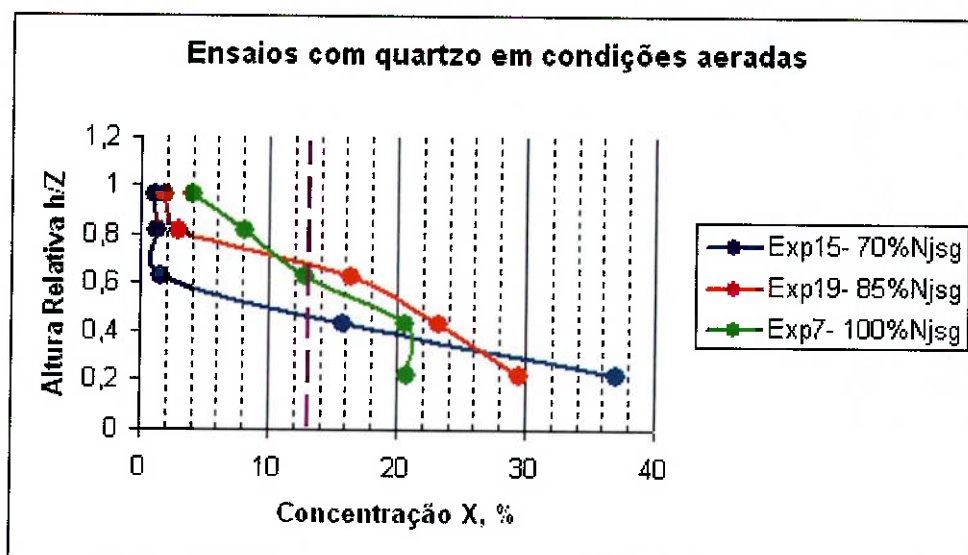


Figura 10: Ensaio com quartzo em condições aeradas

Pode ser notado que, em rotações mais baixas, existem altas concentrações de sólidos nas regiões inferiores da célula, ou seja, os sólidos não estão devidamente suspensos na célula de flotação, e que, com o aumento da rotação, o perfil de concentração tende a ficar mais uniforme, aproximando-se da concentração global de sólidos (linha tracejada). É citado na literatura (SCHUBERT, 1999; VAN DER WESTHUIZEN; DEGLON, 2007) que em rotações 70% ou 80% acima da rotação crítica o perfil de concentrações torna-se aproximadamente uniforme e próximo da concentração global da célula.

Van der Westhuizen e Deglon (2007) convencionaram medir a altura efetiva de suspensão dos sólidos como sendo a altura da célula que possui uma concentração de sólidos igual à metade da concentração global da célula (7,5% no caso). Seguindo esse mesmo critério, observa-se que, conforme a rotação aumenta,

aumenta também a altura efetiva de suspensão dos sólidos. Isso pode ser verificado observando as Figuras 7-10. O aumento da altura de suspensão também pode ser observado visualmente, durante a condução dos ensaios, quando pode ser notado que a altura da interface sólido-líquido clarificado, localizada no topo da célula, aumenta com o aumento da rotação.

3.2.3 Ensaios com apatita

Os ensaios com apatita foram realizados da mesma forma que os ensaios com quartzo. Para o ensaio em condições aeradas com rotação 20% acima da rotação crítica ($120\%N_{js}$) não foi possível atingir a rotação de operação (40 rps). Os resultados são apresentados nas Figuras 11 e 12 para os ensaios não aerados e aerados, respectivamente.

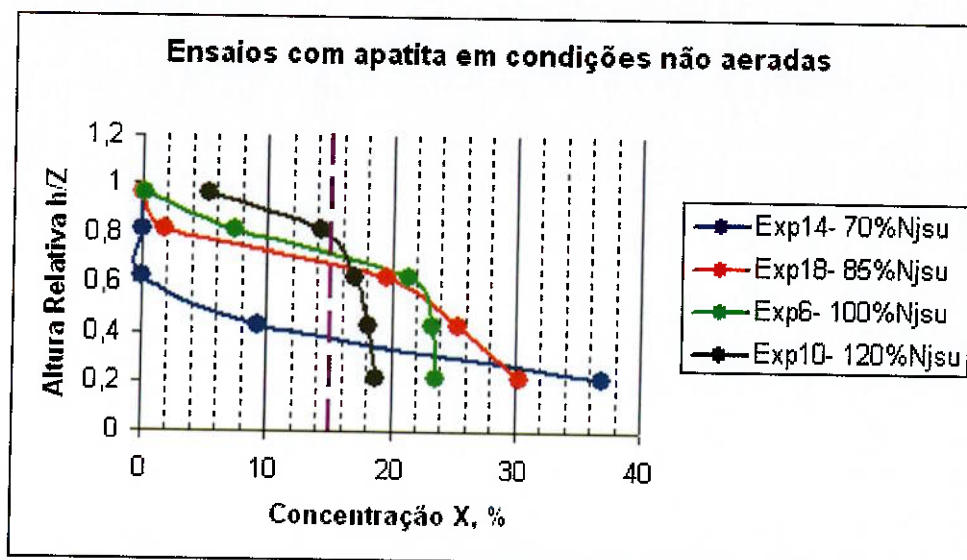


Figura 11: Resultados dos ensaios com apatita em condições não aeradas

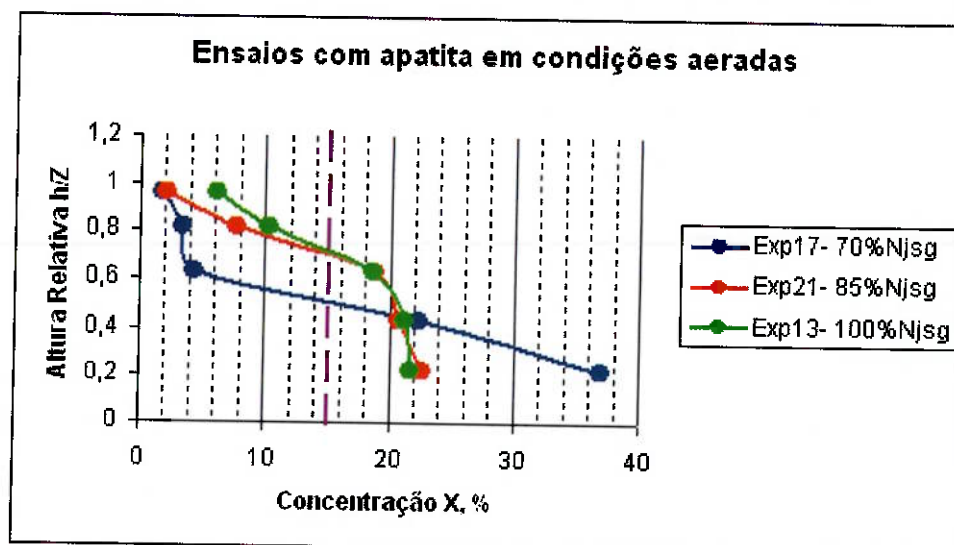


Figura 12: Resultados dos ensaios com apatita em condições aeradas

Da mesma forma como nos ensaios com quartzo, observa-se que em maiores rotações, os sólidos ficam mais uniformemente distribuídos ao longo da altura da célula e que a altura da suspensão aumenta. Em relação à comparação entre os experimentos de quartzo e apatita, pode-se notar que os ensaios em mesmas porcentagens de rotação crítica apresentam perfis de concentração e altura de suspensão semelhantes. Novamente observa-se que à medida que a rotação do impelidor aumenta, o perfil de concentração torna-se mais uniforme, aproximando-se da concentração global de sólidos na célula (linha tracejada).

3.2.4 Aplicação do modelo de Sedimentação-Dispersão

A partir dos resultados obtidos dos perfis de concentração, foram construídos gráficos para mostrar a variação do logaritmo natural da concentração em função da altura relativa, como ilustrado pela Equação 4.

$$\frac{d \ln X}{dh} = -\frac{v_i}{D_p} \quad (\text{Equação 4})$$

Como uma forma de simplificar a análise dos resultados e aplicação do modelo de Sedimentação-Dispersão, a medida da inclinação da curva representada pela Eq.(4) foi feita considerando apenas duas regiões distintas dentro da célula, de acordo com a inclinação média dos pontos: a) uma de maior turbulência (zona turbulenta), e; b) uma de menor turbulência (zona quiescente).

3.2.4.1 Efeito do aumento da rotação nas zonas de escoamento em célula de flotação

As Figuras 13 e 14 ilustram o efeito do aumento da rotação nas zonas de escoamentos em célula mecânica de flotação, utilizando os minerais quartzo e apatita, respectivamente.

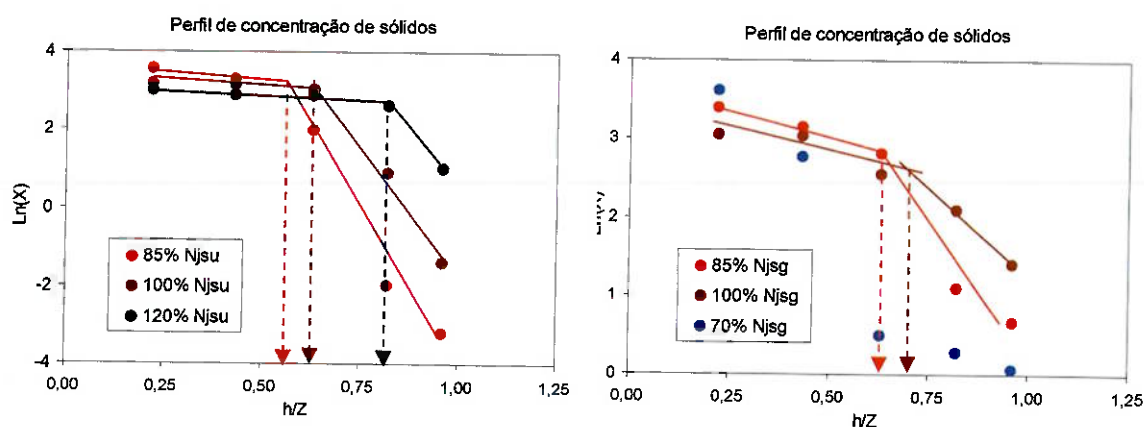


Figura 13: Efeito da rotação do rotor nas zonas de escoamento em células de flotação. Mineral: Quartzo, fração -150 + 105 μ m.

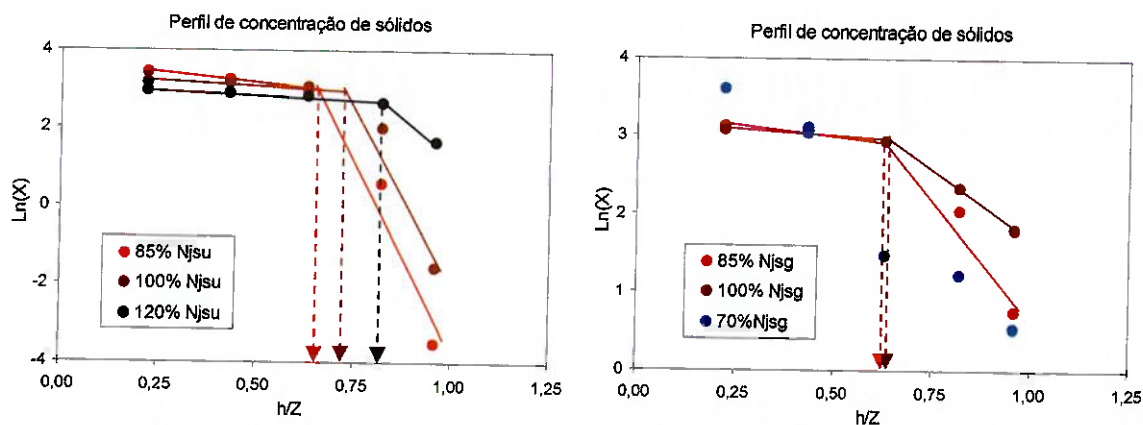


Figura 14: Efeito da rotação do rotor nas zonas de escoamento em células de flotação. Mineral: Apatita, fração -150 + 105 μ m.

Analisando as Figuras 13 e 14, pode-se ver que à medida que a rotação do impelidor aumenta, há um aumento na extensão da zona turbulenta, ou seja, esta fica maior em relação à zona quiescente, e que este efeito é mais efetivo quando o sistema é bifásico (somente sólido e líquido). Também pode ser observado que, quando se trabalha a 70% da rotação crítica, a concentração de sólidos cai rapidamente, tanto para os minerais quartzo ou apatita, indicando que grande parte do material sólido está mal distribuído no interior da célula, havendo uma predominância de material próximo ao fundo da célula e pouco sólidos na região superior do equipamento. Tal comportamento ilustra a importância do conhecimento das condições operacionais dos equipamentos e, mais importante ainda, se estas são capazes de promover a agitação e mistura necessárias ao bom desempenho da operação. No caso de tanques de condicionamento, uma situação ilustrada pelas curvas a 70% da rotação crítica é extremamente desfavorável, pois uma boa parte do material não está devidamente incorporada ao volume do equipamento, não havendo o contato do material sólido com os reagentes químicos necessários à modificação da superfície do mineral, e dessa forma, uma parte do material permanece com a superfície não modificada, prejudicando, necessariamente, o desempenho da operação; no caso de células de flotação, as curvas 70% ilustram a ocorrência de zonas de aterramento, o que promove uma diminuição da taxa de colisões partícula-bolha e, conseqüentemente prejudicando a eficiência do processo. Em ambos os casos, há uma diminuição do volume efetivo do tanque agitado.

3.2.4.2 Efeito do aumento da aeração nas zonas de escoamento em célula de flotação

A fim de avaliar o efeito aeração nos perfis de concentração de sólidos e nas zonas de escoamento em células de flotação, foram realizados experimentos nas rotações críticas de suspensão, em condições aeradas e não-aeradas. As Figuras 15 e 16 ilustram os resultados obtidos.

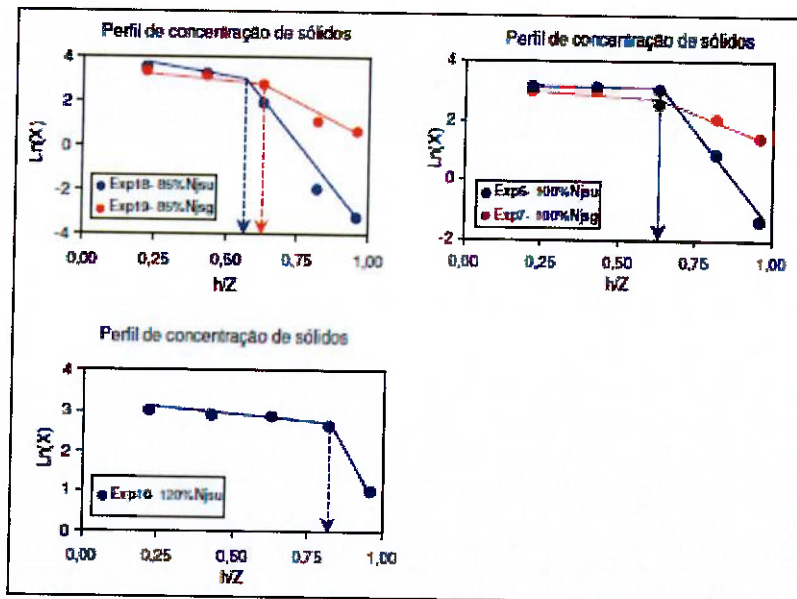


Figura 15: Perfil de concentração de Quartzo em célula mecânica de flotação.

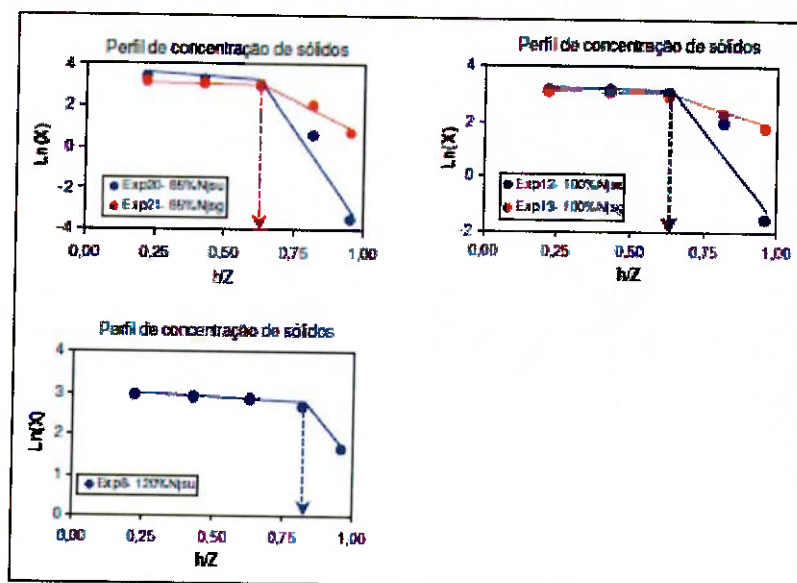


Figura 16: Perfil de concentração de Apatita em célula mecânica de flotação.

Nas Figuras 15 e 16 pode ser observado que a extensão das zonas de escoamento numa célula de flotação não é influenciada significativamente pela aeração do sistema, desde que operem nas mesmas condições, em termos de percentagem, em relação à rotação crítica de suspensão, ainda que, como mostrado anteriormente (ver Tabela 3), a adição de ar aumente consideravelmente a rotação de Zwietering. Também pode ser observado que quando se trabalha com valores acima da rotação crítica em sistemas não aerados ($N=120\%N_{jsu}$), há um aumento da zona de turbulência a valores próximos a 80% da altura do nível do tanque.

4 CONCLUSÕES

Os resultados dos testes preliminares realizados mostraram que o dispositivo amostrador confeccionado, após definição da metodologia de amostragem, possui boa acurácia e precisão na medida da porcentagem de sólidos, tanto em condições aeradas quanto não aeradas, assim como também se apresentou válido tanto para polpa mais densa, quanto para polpa mais diluída.

Os resultados experimentais mostraram que a suspensão de sólidos em células de flotação é influenciada pela presença de ar no sistema, sendo necessária uma maior rotação do impelidor para que o critério do 1-s seja cumprido.

Com relação aos perfis de concentração, foi possível observar que à medida que aumenta a rotação do impelidor, há um aumento na altura de suspensão dos sólidos. No entanto, quando se trabalha com uma rotação de 70% da rotação crítica, pouco material é suspenso para as regiões superiores do equipamento. Tal observação pode ser muito útil para diagnose de sistemas agitados, para verificar o *status* da suspensão de sólidos nesses equipamentos. Os ensaios realizados em sistema sólido-líquido apresentaram um perfil de concentração mais uniforme em relação àqueles realizados com sistema trifásico.

As zonas de escoamento foram avaliadas pela aplicação do modelo de Sedimentação-Dispersão, que mostrou que há uma diminuição do coeficiente de dispersão dos sólidos com a altura do tanque. O modelo de Sedimentação-Dispersão apresentou-se como uma importante ferramenta de análise para identificação das zonas de escoamento em células de flotação.

O aumento da zona turbulenta em células de flotação é influenciado, predominantemente, pela rotação do impelidor e, em menor proporção, pela presença das bolhas de ar. No entanto, de acordo com os resultados obtidos, quando se trabalha na rotação crítica de suspensão de sólidos, a altura da zona de turbulência não se altera, mesmo na presença de ar no sistema.

4.1 Sugestões

Diante dos resultados obtidos, acredito que estudos complementares a este possam ser desenvolvidos, de tal forma que deixo registradas aqui algumas sugestões:

- a) realização de ensaios em cubas de maior tamanho;
- b) caracterização da distribuição granulométrica do material coletado em cada ponto da célula;
- c) avaliação do desempenho da flotação, em sistema contínuo, frente aos diversos perfis de concentração de sólidos, de acordo com cada condição operacional.

5 REFERÊNCIAS

- AYAZI SHAMLOU, P.; KOUTSAKOS, E. Solids suspension and distribution in liquids under turbulent agitation. **Chemical Eng. Science**, vol. 44, pp. 529-542, 1988.
- BARRESI, A.; BALDI, G. Solid dispersion in an agitated vessel. **Chemical Engineering Science**, n. 42, p. 2949-2956, 1987.
- LEAL FILHO, L. S. Flotação de oximinerais: Teoria e prática voltada à solução de problemas brasileiros. Resenha apresentada à banca de concurso para professor titular da área de tratamento de minérios da Escola Politécnica da USP, nos termos do edital 310/99. São Paulo, 191 p., 2000.
- LEAL FILHO, L. S.; RODRIGUES, W. J.; LIMA, O. A.; BARROS, L. A. F. The hole of hydrodynamics in coarse apatite flotation (chapter 3). In: ZHANG, P.; EL-SHALL, H.; MILLER, J.; STANA, R. **Beneficiation of Phosphates – Technology and Sustainability**. American Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc (SME), Littleton, 2006.
- LEAL FILHO, L. S.; RODRIGUES, W. J.; RALSTON, J. Importance of hydrodynamics in coarse particle flotation. In: RALSTON, J.; MILLER, J.; RUBIO, J., **Flotation and Flocculation - from Fundamentals to Applications**. Ian Wark Research Institute, Adelaide, 165-174, 2002.
- LIMA, O. A. Suspensão de partículas grossas de apatita. 2009. 231 p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- LIMA, O. A.; LEAL FILHO, L. S.; BARBOSA, F. S. Caracterização hidrodinâmica de células mecânicas de flotação: capacidade de bombeamento de célula Denver de laboratório. **Revista da Escola de Minas - REM**. V. 59, n.4, p. 415-419, 2006.
- SCHUBERT, H. On the turbulence-controlled microprocesses in flotation machines. **International Journal of Mineral Processing**, 56, p. 257-276, 1999.
- SCHUBERT, H. On some aspects of the hydrodynamics of flotation processes. In: Forsberg, K.S.E., **Flotation of Sulphide Minerals**, Elsevier, Amsterdam, p. 337-355, 1985.
- VAN DER WESTHUIZEN, A. P.; DEGLON, A. D. The evaluation of solids suspension in a pilot scale mechanical flotation cell: critical impeller speed. **Minerals Engineering**, n. 20, p. 233-240, 2007.
- YANTATOS, J., BERGH, L., CONDORI, P.; AGUILERA, J. Hydrodynamic and metallurgical characterization of industrial flotation banks for control purposes. **Minerals Engineering**, vol. 14, n. 9, p. 1033-1046, 2001.
- ZWIETERING, N. T. Suspending of solid particles in liquid by agitators. **Chemical Engineering Science**, v. 8, n.3-4, p. 244-253, 1958.

ANEXO - DADOS EXPERIMENTAIS

Experimento 1: Esferas de vidro a 1280 rpm (tempo de coleta em torno de 10 segundos)

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X, %
1	17,0	9,31	0,06	1,01	0,96	0,63
2		9,72				
3		9,76				
4	14,6	12,29	4,23	1,27	0,82	34,60
5		12,27				
6		12,12				
7	11,2	13,43	5,21	1,31	0,63	38,97
8		12,81				
9		13,87				
10	7,6	14,16	5,65	1,33	0,43	40,16
11		13,98				
12		14,07				
13	3,9	13,68	4,97	1,27	0,22	34,31
14		14,47				
15		15,31				

Experimento 2: Esferas de vidro a 1380 rpm (tempo de coleta de 2-3 segundos)

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X, %
1	17,0	9,42	0,04	1,01	0,96	0,42
2		9,88				
3		9,57				
4	14,6	10,61	1,18	1,08	0,82	11,33
5		10,42				
6		10,21				
7	11,2	11,34	2,34	1,16	0,63	21,34
8		10,61				
9		10,95				
10	7,6	11,17	2,72	1,18	0,43	23,82
11		11,81				
12		11,28				
13	3,9	11,24	2,46	1,16	0,22	22,12
14		11,05				
15		11,07				

Experimento 3: Esferas de vidro a 1380 rpm (tempo de coleta de 2-3 segundos)

Medida	Altura, cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X, %
1	17,0	9,58	0,05	1,01	0,96	0,52
2		9,77				
3		9,57				
4	14,6	10,17	1,29	1,09	0,82	12,42
5		10,27				
6		10,63				
7	11,2	10,85	1,87	1,13	0,63	17,29
8		10,96				
9		10,69				
10	7,6	11,19	2,33	1,16	0,43	21,22
11		10,85				
12		10,95				
13	3,9	11,63	2,59	1,17	0,22	22,92
14		11,06				
15		11,17				

Experimento 4: Esferas de vidro a 1380 rpm (tempo de coleta de 2-3 segundos)

Medida	Altura, cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X, %
1	17,0	10,31	0,66	1,05	0,96	6,56
2		9,91				
3		9,94				
4	14,6	10,19	1,27	1,09	0,82	12,09
5		10,64				
6		10,61				
7	11,2	10,87	1,92	1,13	0,63	17,62
8		10,75				
9		11,12				
10	7,6	10,37	1,98	1,13	0,43	18,37
11		11,22				
12		10,69				
13	3,9	10,79	2,20	1,15	0,22	19,94
14		11,02				
15		11,34				

Experimento 5: Esferas de vidro a 1380 rpm (tempo de coleta de 2-3 segundos)

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	9,43	0,03	1,01	0,96	0,36
2		9,36				
3		9,27				
4	14,6	9,94	0,96	1,07	0,82	9,67
5		10,00				
6		9,95				
7	11,2	10,85	1,88	1,13	0,63	17,50
8		10,74				
9		10,59				
10	7,6	11,05	2,21	1,15	0,43	20,38
11		10,72				
12		10,81				
13	3,9	10,72	2,32	1,15	0,22	21,13
14		10,94				
15		11,28				

Experimento 6: Quartzo a 1300 rpm em condições não aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	9,48	0,02	1,01	0,96	0,25
2		9,38				
3		9,18				
4	14,6	9,35	0,23	1,03	0,82	2,42
5		9,62				
6		9,52				
7	11,2	10,68	2,25	1,16	0,63	20,89
8		10,84				
9		10,74				
10	7,6	10,90	2,55	1,18	0,43	23,23
11		10,95				
12		11,08				
13	3,9	11,22	2,65	1,18	0,22	23,83
14		11,24				
15		10,95				

Experimento 7: Quartzo a 1300 rpm em condições aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X, %
1	17,0	9,36	0,38	1,04	0,96	4,08
2		9,26				
3		9,30				
4	14,6	9,55	0,77	1,06	0,82	8,07
5		9,37				
6		9,69				
7	11,2	9,93	1,27	1,10	0,63	12,78
8		9,86				
9		9,95				
10	7,6	10,06	2,08	1,16	0,43	20,56
11		10,14				
12		10,15				
13	3,9	9,76	2,11	1,16	0,22	20,79
14		10,30				
15		10,43				

Experimento 8: Apatita a 1770 rpm em condições não aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X, %
1	17,0	9,80	0,51	1,05	0,96	5,24
2		9,96				
3		9,65				
4	14,6	10,53	1,49	1,12	0,82	14,27
5		10,38				
6		10,41				
7	11,2	10,54	1,79	1,14	0,63	17,00
8		10,33				
9		10,66				
10	7,6	10,73	1,95	1,15	0,43	18,15
11		10,81				
12		10,74				
13	3,9	10,97	2,02	1,16	0,22	18,79
14		10,62				
15		10,66				

Experimento 10: Quartzo a 1560 rpm em condições não aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X, %
1	17,0	9,60	0,26	1,03	0,96	2,71
2		9,58				
3		9,62				
4	14,6	10,27	1,43	1,11	0,82	13,90
5		10,25				
6		10,27				
7	11,2	10,34	1,84	1,13	0,63	17,68
8		10,50				
9		10,43				
10	7,6	10,68	1,90	1,14	0,43	17,96
11		10,55				
12		10,51				
13	3,9	10,80	2,16	1,15	0,22	19,91
14		10,95				
15		10,84				

Experimento 12: Apatita a 1475 rpm em condições não aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X, %
1	17,0	9,53	0,02	1,01	0,96	0,21
2		9,47				
3		9,52				
4	14,6	10,10	0,74	1,06	0,82	7,42
5		9,86				
6		9,97				
7	11,2	10,99	2,37	1,18	0,63	21,40
8		11,03				
9		11,15				
10	7,6	11,21	2,63	1,20	0,43	23,29
11		11,31				
12		11,36				
13	3,9	11,20	2,70	1,20	0,22	23,63
14		11,33				
15		11,75				

Experimento 13: Apatita a 2000 rpm em condições aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	9,03	0,55	1,05	0,96	6,03
2		9,34				
3		9,14				
4	14,6	9,81	0,99	1,09	0,82	10,25
5		9,44				
6		9,62				
7	11,2	10,02	1,84	1,16	0,63	18,65
8		9,85				
9		9,72				
10	7,6	10,00	2,14	1,18	0,43	21,26
11		9,99				
12		10,26				
13	3,9	9,77	2,20	1,19	0,22	21,71
14		10,30				
15		10,38				

Experimento 14: Quartzo a 910 rpm em condições aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	9,53	0,00	1,01	0,96	0,00
2		9,14				
3		9,55				
4	14,6	9,32	0,00	1,01	0,82	0,00
5		9,66				
6		9,64				
7	11,2	9,55	0,01	1,01	0,63	0,11
8		9,29				
9		9,51				
10	7,6	9,79	0,16	1,02	0,43	1,69
11		9,59				
12		9,65				
13	3,9	12,34	4,64	1,31	0,22	37,18
14		12,26				
15		12,84				

Experimento 15: Quartzito a 1243 rpm em condições aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	9,11	0,10	1,02	0,96	1,06
2		9,09				
3		9,13				
4	14,6	9,36	0,12	1,02	0,82	1,31
5		9,43				
6		9,39				
7	11,2	9,37	0,15	1,02	0,63	1,64
8		9,29				
9		9,40				
10	7,6	9,51	1,58	1,12	0,43	15,77
11		10,29				
12		10,19				
13	3,9	11,19	4,12	1,31	0,22	37,09
14		11,09				
15		11,04				

Experimento 16: Apatita a 1033 rpm em condições não aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	9,67	0,00	1,01	0,96	0,00
2		9,58				
3		9,73				
4	14,6	10,23	0,00	1,01	0,82	0,00
5		9,69				
6		9,68				
7	11,2	9,58	0,00	1,01	0,63	0,03
8		9,63				
9		9,66				
10	7,6	10,17	0,95	1,08	0,43	9,24
11		10,20				
12		10,38				
13	3,9	12,93	4,77	1,35	0,22	37,00
14		12,84				
15		12,88				

Experimento 17: Apatita a 1400 rpm em condições aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	9,12	0,15	1,02	0,96	1,71
2		9,01				
3		8,73				
4	14,6	9,08	0,31	1,03	0,82	3,37
5		9,09				
6		9,45				
7	11,2	9,30	0,40	1,04	0,63	4,31
8		9,16				
9		9,15				
10	7,6	10,88	2,46	1,19	0,43	22,39
11		10,86				
12		11,22				
13	3,9	11,50	4,13	1,35	0,22	37,02
14		11,07				
15		10,87				

Experimento 18: Quartzo a 1105 rpm em condições não aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	9,54	0,00	1,01	0,96	0,04
2		9,15				
3		9,56				
4	14,6	9,73	0,01	1,01	0,82	0,14
5		9,82				
6		9,82				
7	11,2	10,31	0,73	1,06	0,63	7,13
8		10,25				
9		10,02				
10	7,6	11,82	3,14	1,21	0,43	26,80
11		11,80				
12		11,57				
13	3,9	12,05	4,15	1,29	0,22	34,75
14		12,17				
15		11,61				

Experimento 19: Quartzo a 1509 rpm em condições aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	8,45	0,17	1,02	0,96	1,95
2		8,65				
3		8,54				
4	14,6	8,30	0,27	1,03	0,82	3,00
5		9,50				
6		9,23				
7	11,2	10,22	1,67	1,12	0,63	16,45
8		10,26				
9		10,03				
10	7,6	10,82	2,49	1,18	0,43	23,29
11		10,73				
12		10,53				
13	3,9	10,05	3,10	1,24	0,22	29,49
14		10,55				
15		10,94				

Experimento 20: Apatita a 1254 rpm em condições não aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	9,68	0,00	1,01	0,96	0,03
2		9,59				
3		9,72				
4	14,6	9,68	0,17	1,02	0,82	1,78
5		9,66				
6		9,95				
7	11,2	11,42	2,21	1,17	0,63	19,67
8		11,14				
9		11,20				
10	7,6	11,51	3,01	1,22	0,43	25,33
11		12,04				
12		12,10				
13	3,9	12,05	3,68	1,27	0,22	30,30
14		11,83				
15		12,56				

Experimento 21: Apatita a 1700 rpm em condições aeradas

Medida	Altura ,cm	m_{polpa} , g	m_s , g	ρ_p (g/cm ³)	h/Z	X,%
1	17,0	8,71	0,18	1,02	0,96	2,11
2		8,72				
3		8,62				
4	14,6	9,54	0,74	1,07	0,82	7,71
5		9,69				
6		9,58				
7	11,2	10,48	1,94	1,16	0,63	18,76
8		10,29				
9		10,20				
10	7,6	10,21	2,15	1,18	0,43	20,67
11		10,51				
12		10,53				
13	3,9	10,93	2,40	1,19	0,22	22,65
14		10,52				
15		10,30				

Obs.: Os experimentos 9 (2400 rpm e 3L/min) e 11 (2130 rpm e 3L/min) não foram realizados por causa de não ser possível alcançar as rotações especificadas.