

HENRIQUE ALVES GRAZIEL

**ESTUDOS HIDRODINÂMICOS VISANDO À OTIMIZAÇÃO DO
DESEMPENHO DA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE NÍQUEL POR
FLOTAÇÃO.**

**São Paulo
2006**

EPMI
TF-2006
g 796e
lyno 1573H8

M2006A

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005953

*À Vida, por sempre ter me
proporcionado grandes momentos
de felicidade e alegria.
Aos meus amigos os quais
amo muito.
À minha família,
e em especial à meu Pai Geraldo:
aqui está a prova de que
força de vontade, persistência, dedicação,
e, acima de tudo, alegria no que se faz,
geram resultados impressionantes...*

Agradecimentos

O presente formando gostaria de prestar seus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Laurindo de Salles Leal Filho, orientador deste trabalho, pelos bons momentos de aprendizado, pelo incentivo e, principalmente, pela paciência, itens fornecidos sempre com dedicação e empenho;

ao Mestre e futuro Doutor Odair Alves de Lima, pela honra de ter trabalhado e estudado em sua parceria, pelos “toques” sempre precisos e eficientes, pelo empenho e pelos bons momentos de gargalhadas e boas “estórias”;

à Votorantim Metais, na pessoa do Engenheiro Geraldo Magela Silveira, por fornecer insumos para a realização deste trabalho e por permitir a publicação do mesmo;

à minha família, pelo apoio e compreensão;

aos meus amigos, pela motivação e bons momentos de alegria e felicidade;

à Cris e aos amigos e parceiros de trabalho do banco Itaú, os quais foram de fundamental importância para meu crescimento pessoal e profissional nos dois últimos anos.

Acima de tudo agradeço à Vida por sempre permitir que encontrasse em meu caminho felicidade, alegria, paz, boas pessoas e grandes desafios...

Resumo

Este trabalho de formatura é parte de um estudo realizado pelo Laboratório de Físico Química de Interfaces (LFQI) em conjunto com pesquisadores do CETEM a pedido da empresa Votorantim Metais (VM), onde foram realizados estudos termodinâmicos e hidrodinâmicos, em escala piloto e de laboratório, visando contribuir para a otimização da concentração de minério de níquel por flotação.

A VM realizava testes com o minério de níquel pentlândita $((\text{Fe},\text{Ni})_{9\pm x}\text{S}_8)$, proveniente da região de Niquelândia (GO), na planta em escala piloto da Fundação Gorceix (Ouro Preto - MG), buscando a otimização da flotação deste minério. Os primeiros relatório gerados pela empresa apontavam alto teor de MgO no “produto que flutua” (concentrado). Este fato se mostrou um indicativo de que partículas de ganga indesejáveis se reportaram ao produto flutuado, provocado, muito provavelmente, pelo arraste hidrodinâmico de partículas.

Abordando-se a hidrodinâmica da flotação de níquel, escopo deste trabalho, foram realizados diversos experimentos nas células mecânicas da Fundação Gorceix - configuradas em dois arranjos diferentes-, os quais eram compostos basicamente de análise de Distribuição dos Tempos de Residência (DTR), ferramenta amplamente utilizada na indústria química para caracterizar escoamentos reais, e complementados com o levantamento da dispersão dos sólidos ao longo da altura das células.

A partir dos estudos hidrodinâmicos realizados, pôde-se concluir que as células mecânicas da fundação Gorceix, nos dois arranjos estudados, apresentavam condições hidrodinâmicas desfavoráveis a flotação do minério de níquel de Niquelândia. Estas condições foram apontadas através de um baixo fator de *scale-up* das células, da DTR com altos valores de dispersão, do número de tanques ideais que demonstrou ser menor que o número de tanques reais em operação, do alto Número de Froude verificado nas células e ao perfil vertical de porcentagem de sólidos ao longo da altura das mesmas.

Por fim, tendo em vista as constatações realizadas, foram apresentadas à Votorantim Metais sugestões para otimizar o desempenho da concentração do minério de Niquelândia por flotação.

Palavras-chave: beneficiamento mineral – flotação – hidrodinâmica – tempos de residência – escala piloto – níquel.

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Sumário	v
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	vii
1. Introdução.....	8
2. Objetivos.	9
3. Relevância do Trabalho.	9
4. Revisão Bibliográfica.	11
4.1. Distribuição dos Tempos de Residência (DTR).....	11
4.2. Números Hidrodinâmicos Adimensionais e sua Influência na Flotação.....	15
4.3. Dispersão dos Sólidos – Subdivisão da Célula de Flotação em Regiões.....	17
4.4. Dimensionamento de Células Mecânicas – Fator de <i>Scale-Up</i>.....	18
5. Materiais e Métodos.	20
5.1. Análise DTR.....	22
5.2. Dispersão dos Sólidos.	23
6. Resultados e Discussões.	24
6.1. Resultados DTR.....	24
6.2. Perfil de Porcentagem de Sólidos - Etapa Rougher.	28
7. Conclusões e Sugestões de Melhoria.....	29
8. Referências Bibliográficas.	31
Anexo A	33
Anexo B	38

Índice de Figuras

Figura 1 - Célula mecânica de flotação industrial.....	11
Figura 2 – Esquema ilustrativo de uma célula mecânica subaerada em escala piloto e seus principais componentes.	12
Figura 3 – DTR: Sinais de entrada tipo degrau e pulso e suas respostas típicas.....	13
Figura 4 - Esquema para determinação da DTR	13
Figura 5 – Divisão da célula de flotação em regiões.	18
Figura 6 - Fluxograma do circuito em escala piloto da Fundação Gorceix.	21
Figura 7 - Esquema ilustrativo do procedimento experimental da análise DTR	22
Figura 8 - Esquema ilustrativo da sondagem para determinação do perfil de porcentagem de sólidos dentro da célula.	23
Figura 9 – Curvas DTR do circuito <i>rougher</i> configuração velha: (a) $C(t) \times t$; (b) $E(t) \times t$; (c) $F(t) \times t$	25
Figura 10 – Curvas DTR do circuito <i>rougher</i> configuração nova: (a) $C(t) \times t$; (b) $E(t) \times t$; (c) $F(t) \times t$	25
Figura 11 – Curvas DTR do circuito <i>scavenger</i> configuração velha: (a) $C(t) \times t$; (b) $E(t) \times t$; (c) $F(t) \times t$	26
Figura 12 – Curvas DTR do circuito <i>scavenger</i> configuração nova: (a) $C(t) \times t$; (b) $E(t) \times t$; (c) $F(t) \times t$	26
Figura 13 - Altura da Célula x % de Sólidos da Polpa.....	28

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Recuperação versus Tempo.....	10
Tabela 2 - Números hidrodinâmicos de interesse à flotação.....	16
Tabela 3 - Números hidrodinâmicos de células mecânicas “ <i>rougher</i> ” de algumas usinas brasileiras de flotação (Rodrigues, 2002).....	17
Tabela 4 - Arranjo e Condições Operacionais dos Circuitos de Flotação <i>Rougher</i>	20
Tabela 5 – Arranjo e Condições Operacionais dos Circuitos de Flotação <i>Scavenger</i>	20
Tabela 6 - Dados adicionais das células de flotação utilizados nos experimentos de sondagem para levantamento do perfil de porcentagem de sólidos das células.....	23
Tabela 7 - Parâmetros de DTR dos Circuitos de Flotação <i>Rougher</i> e <i>Scavenger</i>	27
Tabela 8 – Arranjo e Condições Operacionais Ótimas para os Circuitos de Flotação.....	30

1. Introdução.

Nos últimos anos, os metais básicos vêm recebendo especial atenção no cenário econômico mundial devido, sobretudo, aos preços recordes que têm atingido. Neste contexto destaca-se o níquel que atingiu em 20/10/2006 o preço de US\$ 30.710,00 a tonelada na Bolsa de Valores de Londres (Níquel Metálico - Fonte: DNPM).

O níquel é um metal de grande importância para a indústria, sendo utilizado em pelo menos 300 mil produtos, abrangendo diversos seguimentos, tanto na sua forma metálica quanto na forma de ligas (responsável por 65% do consumo mundial). O níquel pode ser obtido através da exploração e conseqüente concentração de minerais sulfetados (pentlândita) ou oxidados (garnierita), estimando-se que 55% da produção mundial seja através destes primeiros (SILVEIRA, 2006). Os minérios sulfetados possuem como rota básica de beneficiamento a flotação, cuja hidrodinâmica é o tema deste trabalho.

Em sistemas de flotação, apesar da importância de se conhecer, medir e controlar variáveis hidrodinâmicas, observa-se que a literatura tradicionalmente vinculada à tecnologia mineral não oferece um grande número de artigos técnico-científicos devotados especificamente a este tema. Neste sentido, o Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, através do grupo de pesquisa em tratamento de minérios, tem se preocupado com essa deficiência, realizando diversos estudos e elaborando metodologias experimentais para otimizar a hidrodinâmica de células de flotação, tanto em escala de laboratório quanto nas escalas piloto e industrial.

Este trabalho é parte de um estudo realizado pelo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP em conjunto com o CETEM (Centro de Tecnologia Mineral – RJ) a pedido da empresa Votorantim Metais (VM), onde foram realizados estudos termodinâmicos e hidrodinâmicos, em escala piloto e de laboratório, visando contribuir para a otimização da concentração de minério de níquel por flotação. Os experimentos em escala piloto foram realizados na Fundação Gorceix (Ouro Preto – MG), cujo circuito era composto basicamente de moagem, flotação em células mecânicas, flotação em colunas e separação magnética, utilizando-se o minério de níquel pentlândita $((\text{Fe},\text{Ni})_{9\pm x}\text{S}_8)$ da Votorantim Metais, proveniente da região de Niquelândia – GO.

A hidrodinâmica do circuito de flotação, escopo deste trabalho, foi estudada apenas nas células mecânicas do circuito piloto, dispostas em dois arranjos diferentes, onde existiam indícios de que estaria ocorrendo arraste hidrodinâmico de partículas da polpa para o flutuado. Para isto, utilizou-se uma técnica amplamente conhecida na indústria química para caracterizar escoamentos reais, a Distribuição dos Tempos de Residência (DTR). Os estudos hidrodinâmicos foram complementados com o levantamento da dispersão dos sólidos ao longo da altura das células.

2. Objetivos.

A partir do estudo da hidrodinâmica das células mecânicas de flotação em escala piloto, utilizando-se o minério de níquel da Votorantim Metais, este trabalho busca atingir os seguintes objetivos:

- a) Determinação do “estado” de agitação promovido pelos impelidores dentro da célula, através do levantamento do Número de Froude e comparação com a bibliografia corrente;
- b) Determinação da distribuição dos tempos de residência dentro das células, obtendo-se parâmetros importantes para observar a qualidade da mistura que está ocorrendo nas mesmas;
- c) Verificação da adequação do fator de *scale-up* das células mecânicas com o fornecido pelo seu fabricante;
- d) Avaliar a dispersão dos sólidos, utilizando-se uma técnica qualitativa que é o levantamento do perfil de porcentagem de sólidos ao longo da altura das células.

A partir dos resultados obtidos, foram sugeridas propostas de melhorias a serem implantadas no circuito, buscando-se a otimização da concentração do minério de níquel por flotação.

3. Relevância do Trabalho.

Analisando os resultados de relatórios apresentados pela Votorantim Metais sobre estudos anteriormente executados com o minério de níquel de Niquelândia, pôde-se verificar que um dos problemas mais relevantes no desempenho da flotação era o alto teor de MgO no concentrado, indicando que partículas de ganga indesejáveis se reportavam a este produto. Para entender isso, teremos que rever os mecanismos responsáveis pelo transporte de partículas da polpa à camada de espuma, os quais são (VERA, 2002):

- a) True Flotation → As partículas do mineral que se deseja flotar colidem com as bolhas de ar, aderem às mesmas e são conduzidas até a camada de espuma. Trata-se de um mecanismo seletivo, desde que as condições termodinâmicas (pH, Eh, sistema de reagentes) sejam adequadas.
- b) Arraste hidrodinâmico → A polpa que transborda no *overflow* da célula carrega consigo partículas minerais. Trata-se de um mecanismo não-seletivo que arrasta partículas independentemente de seu grau de hidrofobicidade.

O sistema de coletores adotado (tiocoletores) não privilegia o mecanismo de *true flotation* para os minerais de ganga portadores de MgO, visto que estes são minerais da família dos silicatos (serpentina, olivina e piroxênios). Tais minerais possuem oxigênio em sua rede

cristalina, por isto, fazem pontes de hidrogênio com a água e, conseqüentemente, são molhados por ela em grande intensidade (FUERSTENAU, 1985). Deste modo, não se espera que as partículas de silicatos de magnésio se reportem ao concentrado de níquel por *true flotation*. Por outro lado, alguma partícula mista de silicato+sulfeto pode ser transportada por *true flotation* da polpa para o concentrado. Neste caso específico, o teor de MgO no concentrado seria reduzido somente após aumento do grau de liberação dos minerais sulfetados em relação aos silicatos de magnésio. Mais informações relativas à caracterização do minério poderiam esclarecer esta dúvida.

O arraste hidrodinâmico, tanto de partículas de silicatos de magnésio quanto de sulfetos, é esperado, visto que:

- a) Granulometria da alimentação da flotação é muito fina ($\sim 60\% < 37\mu\text{m}$);
- b) A suspensão de partículas finas em células de flotação é controlada pela turbulência do sistema, que se sobrepõe à tendência das partículas de se sedimentar sob ação do seu peso (YIANATOS, 2001; SCHULZE, 1984).

Trabalhando com resultados de ensaios de flotação executados em laboratório com o minério de Niquelândia, na presença de agente espumante e ausência de tiocoletores, temos um perfil de como ocorre a recuperação em massa e metalúrgica de Ni e MgO. Tal comportamento é ilustrado na tabela 1, onde é possível observar que, para cada intervalo de tempo, essas recuperações são muito próximas.

Tabela 1 - Recuperação versus Tempo.

Tempo de Flotação (min)	Recuperações Acumuladas(%)		
	Massa	Níquel	MgO
3	8,4	8,1	8,4
12	28,5	27,7	28,4
21	54,0	49,2	53,8

Os dados apresentados na Tabela 1 indicam que quanto mais massa se reportar ao concentrado, mais níquel e magnésio também o farão. Este é o princípio do arraste hidrodinâmico. Por outro lado, observa-se que recuperação metalúrgica do níquel é ligeiramente menor que o rendimento mássico (recuperação em massa).

A razão disto poderia ser a maior densidade apresentada pelas partículas de sulfetos de níquel. Ainda na Tabela 1 é importante ressaltar que a recuperação metalúrgica de MgO é praticamente igual à recuperação em massa. Trata-se de um indício a mais da necessidade de se diminuir o arraste hidrodinâmico do sistema.

Tendo em vista todas essas considerações iniciais, o estudo das características hidrodinâmicas do circuito de flotação da Fundação Gorceix tem sua relevância comprovada.

4. Revisão Bibliográfica.

4.1. Distribuição dos Tempos de Residência (DTR).

As células mecânicas de flotação são constituídas de um tanque onde atua um rotor (impelidor) envolvido por uma capa denominada estator.

Como nas bombas centrífugas, o giro do rotor faz com que a polpa seja impelida na direção do topo do tanque, atingindo uma certa altura a partir da qual esta experimenta movimento descendente, até atingir a região do rotor-estator, quando é novamente impelida na direção ascendente. Tal agitação intensa existe para promover tanto a suspensão de partículas como dispersão das bolhas de ar no sistema (SCHULZE, 1984). A suspensão impede que os sólidos se sedimentem e causem aterramento da célula, além de maximizar a probabilidade de sua colisão com as bolhas. A dispersão de bolhas e partículas ao longo do volume da célula efetua a mistura das três fases (ar, sólidos e água). Quando tal mistura está sendo efetuada de maneira adequada, a ocorrência de zonas mortas ou curto-circuito é minimizada, oferecendo condições hidrodinâmicas mais apropriadas para um melhor desempenho do processo de flotação. A Figura 1 ilustra uma célula mecânica de flotação industrial e a Figura 2 ilustra esquematicamente uma célula mecânica subaerada em escala piloto e seus principais componentes.

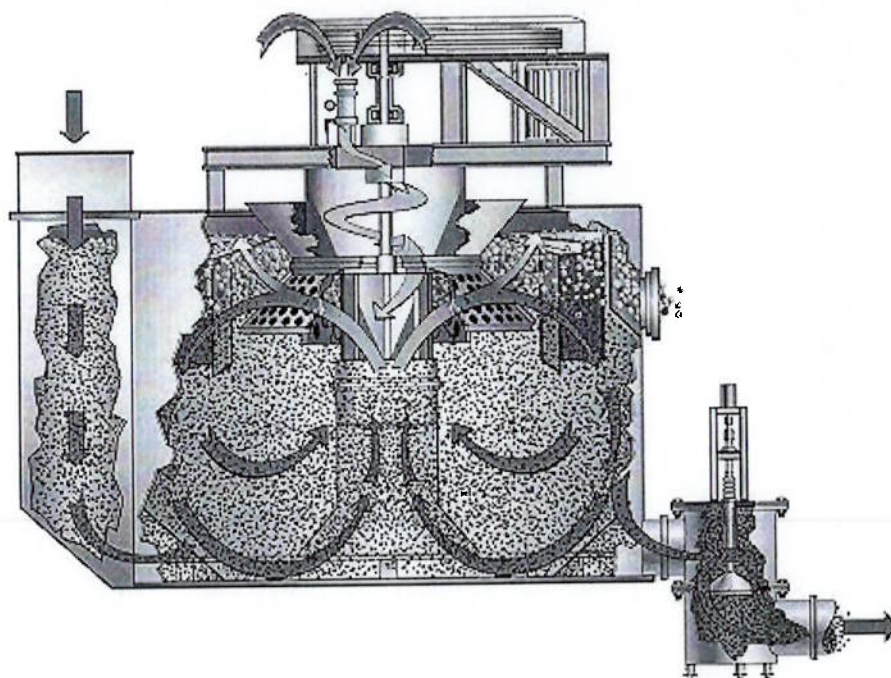


Figura 1 - Célula mecânica de flotação industrial
(WEMCO SmartCell™ – Fonte: www.mining-technology.com)

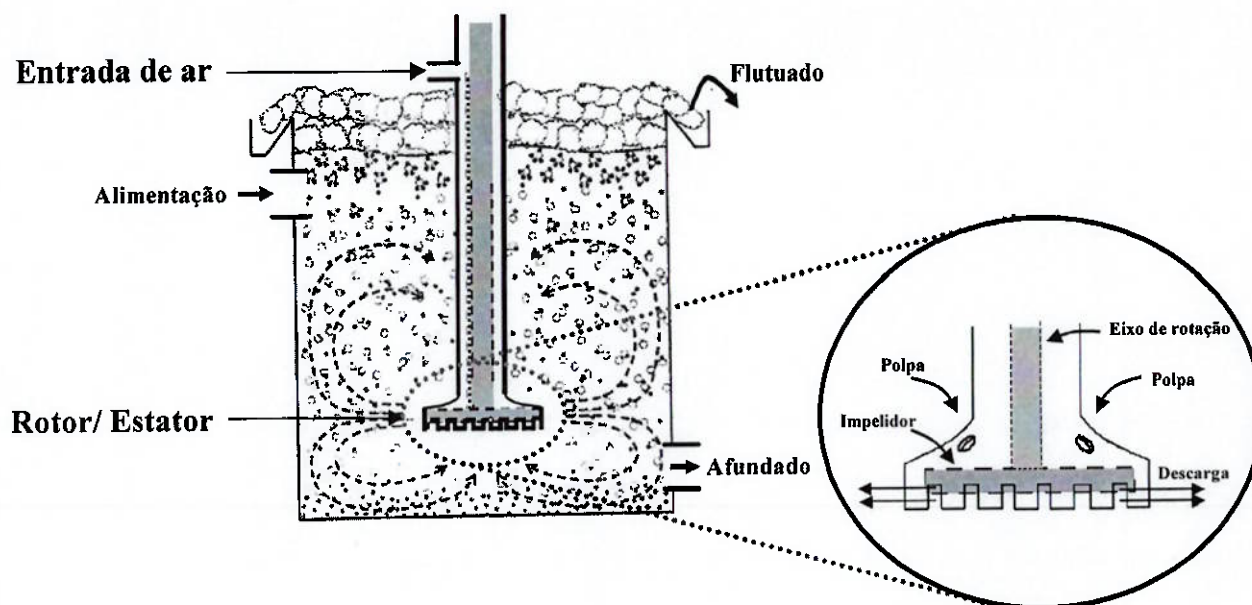


Figura 2 – Esquema ilustrativo de uma célula mecânica subaerada em escala piloto e seus principais componentes.

Se um engenheiro de processos minerais deseja caracterizar a qualidade da mistura das células mecânicas de flotação de seu circuito industrial ou piloto, ele poderá fazer uso de uma técnica muito utilizada no âmbito da indústria química denominada Distribuição de Tempos de Residência (DTR).

Quando se dimensionam células mecânicas de flotação, normalmente faz-se uso do tempo de residência nominal (τ) da polpa no sistema, definido pela Equação 1. Tal tempo também pode ser denominado “tempo espacial”.

$$\tau = \frac{V}{Q}$$

Equação 1

Onde:

V é o volume útil do tanque;

Q é a vazão volumétrica de alimentação de polpa na entrada do sistema.

Devido ao fato de células mecânicas serem tanques de mistura agitados, a polpa apresenta uma DTR cujo valor do tempo de residência médio (t_m) pode diferir muito do tempo de residência nominal (τ). De fato, esses valores são coincidentes apenas para o caso de um tanque operando perfeitamente, e que pode ser considerado como um sistema fechado, ou seja, aquele no qual o fluido entra ou sai do equipamento com perfil de velocidades plano, não havendo, na entrada ou saída do sistema, ocorrência de difusão ou turbilhões (LEVENSPIEL, 1974).

A DTR é uma típica técnica de estímulo e resposta. Em todas essas técnicas, perturba-se o sistema e verifica-se sua resposta ao estímulo. Uma análise da resposta fornece as informações desejadas sobre o sistema. Na DTR, o estímulo é a entrada de um traçador dentro da célula, juntamente com a polpa que alimenta a mesma, enquanto que a resposta é o registro do tempo no qual as frações desse traçador deixam a célula. Qualquer material que possa ser detectado e que não perturbe o sistema, ou seja, que não reaja com a polpa ou com os reagentes de flotação, pode ser usado como traçador. Diversos tipos de sinal de entrada podem ser utilizados, porém, os mais usuais são o sinal em degrau e o sinal em forma de pulso, devido principalmente à maior simplicidade de suas formulações matemáticas. Esses sinais e suas respostas típicas são mostrados na Figura 3.

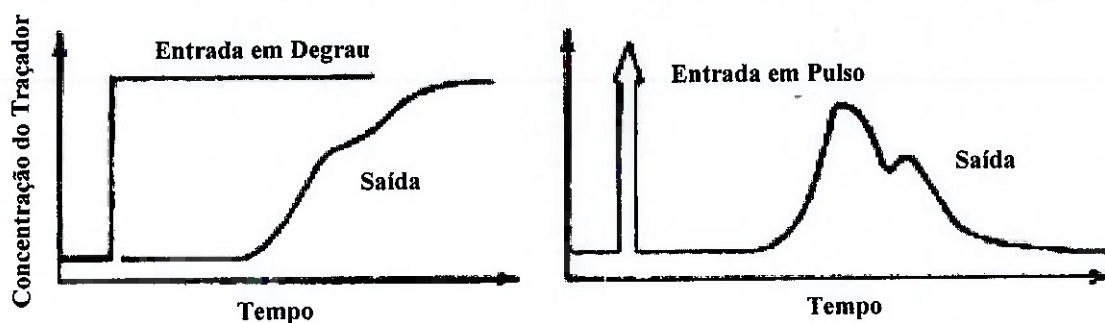


Figura 3 – DTR: Sinais de entrada tipo degrau e pulso e suas respostas típicas.

Para efeitos deste trabalho, consideraremos apenas as formulações matemáticas para um sinal de entrada tipo pulso, uma vez que este é mais simples de se tratar matematicamente. O sinal tipo pulso foi utilizado em todos os experimentos realizados no circuito piloto.

Experimentalmente, a DTR é conduzida injetando-se na corrente de entrada da célula um pulso de traçador em um tempo (t) igual a zero, e então é medida a sua concentração (C) na corrente de saída como uma função do tempo. A Figura 4 ilustra como o experimento de DTR é realizado.

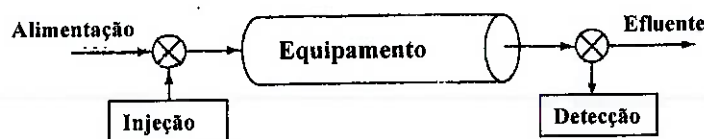


Figura 4 - Esquema para determinação da DTR

Obtidos os dados de concentração do traçador *versus* tempo, é feita a determinação da função DTR, também denominada distribuição da idade de saída da polpa.

Analisando as curvas de DTR, é possível a obtenção de informações pertinentes à hidrodinâmica do sistema real, através da comparação desta com a de tanques de mistura ideais e também através da forma das curvas obtidas. Dessa maneira, podem ser detectadas a ocorrência de curto-circuito ou presença de zonas de estagnação no equipamento (Figura 5).

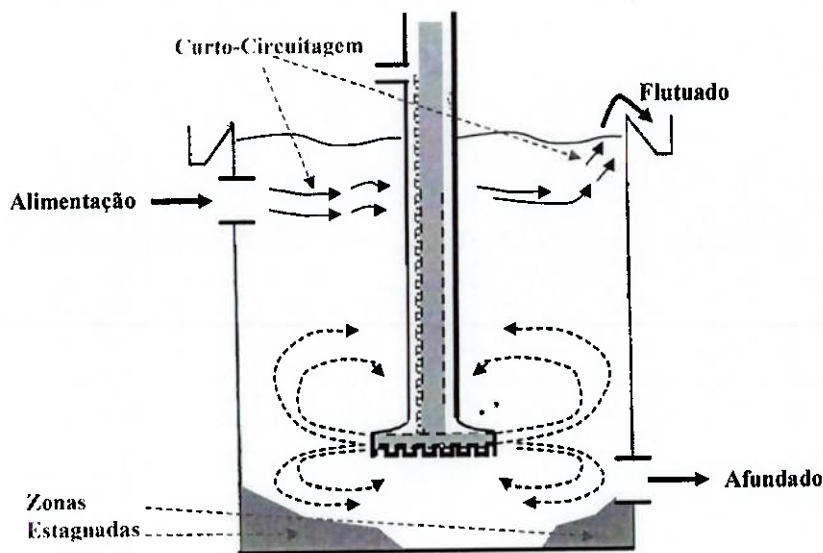


Figura 5 – Zonas de estagnação e curto-circuitagem em células mecânicas de flotação..

As funções que caracterizam a DTR são, principalmente, a função $E(t)$, chamada de função distribuição dos tempos de residência, o tempo de residência médio, (t_m) e a variância (σ^2). Tais funções são definidas pelas Equações 2 a 4 (FOGLER, 1970).

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad \text{Equação 2}$$

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt} = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt \quad \text{Equação 3}$$

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 E(t) dt \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

t é o tempo de permanência da fração de polpa no tanque;

$C(t)$ é a concentração do traçador no fluido no tempo t .

Uma outra forma de expressar a DTR é através da função $F(t)$, que é a função DTR cumulativa, definida pela Equação 5, que representa, diretamente, a fração de fluido que permanece dentro do tanque por um período menor ou igual a t .

$$F(t) = \int_0^t E(t)dt \quad \text{Equação 5}$$

Para representar escoamentos reais são utilizados vários modelos matemáticos. Dentre eles, o modelo dos tanques de mistura ideais em série constitui um método simples, e utiliza os dados de DTR para diagnosticar o desempenho de tanques reais. Tal modelo possui apenas um parâmetro (n), definido pela Equação 6.

$$n = \frac{\tau^2}{\sigma^2} \quad \text{Equação 6}$$

A Equação 6 indica o número de tanques de mistura ideais em série que representam o sistema real. Portanto, quanto maior o valor de n , melhor a qualidade da mistura apresentada pelas máquinas em operação.

4.2. Números Hidrodinâmicos Adimensionais e sua Influência na Flotação.

Uma maneira simples de se efetuar a caracterização hidrodinâmica de um sistema de flotação é através de números adimensionais que representam a razão entre forças que influenciam o sistema (gravidade, inércia, viscosidade, tensão superficial, etc). A Tabela 2 apresenta definições e equações (Equações 7 a 14) para cálculo de números hidrodinâmicos relevantes para a flotação (LEAL FILHO, L.S., 2000; LEAL FILHO, L.S. et al., 2002; RODRIGUES, 2001; SCHULZE, 1984).

Neste trabalho abordamos apenas o Número de Froude das células de flotação, o qual forneceu uma visão inicial da ação do impelidor. Um Número de Froude menor que a unidade ($Fr < 1$) indica que as forças gravitacionais são maiores que as forças inerciais atuantes nos sistema. Esta deve ser uma das condições de trabalho das células de flotação, tendo em vista que não se deseja uma “suspensão” total das partículas, como ocorre em condicionadores de polpa, onde se deseja máxima homogeneização dos materiais dentro do tanque. Entretanto, o Número de Froude não deve ser muito pequeno, haja vista que o rotor deve promover a suspensão das partículas e a colisão destas com as bolhas de ar (RODRIGUES, 2001).

Tabela 2 - Números hidrodinâmicos de interesse à flotação.

Número	Equações	Relação entre forças	Legenda
Reynolds (N_{Re})	$N_{Re} = \frac{\rho \cdot N \cdot D^2}{\mu}$ Equação 7	Inércia/ Viscosidade	D = diâmetro do rotor; N = rotação do rotor; ρ = densidade fluido; μ = viscosidade dinâmica do fluido; g = aceleração da gravidade P = potência consumida pelo rotor; p = pressão; Q_{ar} = Vazão de ar que percola o volume da célula; γ = tensão superficial; x = um comprimento característico (cm), por exemplo, o diâmetro do corpo.
Froude (N_{Fr})	$N_{Fr} = \frac{D \cdot N^2}{g}$ Equação 8	Inércia/ Gravidade	
Potência (N_{Po})	$N_{Po} = \frac{P}{N^3 \cdot D^5 \cdot \rho}$ Equação 9	Potência consumida / Inércia produzida	
Euler (N_{Pr})	$N_{Pr} = \frac{p}{N^2 \cdot D^2 \cdot \rho}$ Equação 10	Pressão/ Forças de inércia	
Fluxo (N_q)	$N_q = \frac{Q_{ar}}{N \cdot D^3}$ Equação 11	Inércia do fluxo de ar / Inércia do rotor	
Weber (N_w)	$N_w = \frac{N^2 \cdot D^3 \cdot \rho}{\gamma}$ Equação 12	Forças de inércia/ Forças capilares	
Bond (N_B)	$N_B = \frac{x^2 \cdot g \cdot \rho}{\gamma}$ Equação 13	Forças gravitacionais/ Forças Capilares	
Capilar (N_c)	$N_c = \frac{D \cdot N \cdot \mu}{\gamma}$ Equação 14	Forças de Viscosidade/ Forças capilares	

Ainda de acordo com Rodrigues (2001), células industriais operam com número de Froude variando na faixa de $0,5 < Fr < 1,0$. Todavia, alguns circuitos de beneficiamento operam com Número de Froude maior que a unidade, como é o caso do circuito da Mineração N. Sr^a. do Carmo, que utiliza células Denver com $Fr=1,6$ (Tabela 3).

Tabela 3 - Números hidrodinâmicos de células mecânicas “rougher” de algumas usinas brasileiras de flotação (RODRIGUES, 2001).

Empresa	Minério	Fabricante	Modelo	Números Hidrodinâmicos		
				Reynolds ($\times 10^6$)	Froude	Weber ($\times 10^4$)
Samarco	Ferro	Wemco	144	1,3	0,8	-
Samitri-1		Wemco	144	1,7	0,8	-
Samitri-2		Wemco	144	1,4	0,7	-
CVRD-1		Outokumpu	OK-16	1,4	0,5	-
CVRD-2		Outokumpu	OK-16	1,3	0,5	7,8
CVRD-3		Wemco	144	1,3	0,7	-
Fosfertil	Fosfato	Wemco	120	0,9	0,6	5,8
Copebrás		Wemco	120	1,0	0,8	-
Ultrafertil		Wemco	144	1,3	0,8	-
Serrana		Wemco	66	0,5	1,3	1,9
N Sra do Carmo	Fluorita	Denver	18 SP	0,9	1,6	-
Caraíba	Cobre	Wemco	120	1,2	0,9	-
CBMM	Nióbio	Galligher	-	1,4	0,5	-
Mineira de Metais-1	Zinco Oxidado	Galigher	-	1,0	0,7	-
Mineira de Metais-2		Wemco	120	2,4	2,3	-
Morro Agudo	Zinco sulfetado	Wemco	144	1,3	0,7	-
Morro Agudo	Galena	Wemco	144	1,3	0,7	-

Obs: Samitri-1 → Circuito de grossos; Samitri-2 → Circuito convencional; CVRD-1 → Conceição; CVRD-2 → Cauê; CVRD-3 → Timbopeba; Mineira de Metais-1 → Calamina; Mineira de Metais-2 → Willemita.

4.3. Dispersão dos Sólidos – Subdivisão da Célula de Flotação em Regiões.

Assim como a qualidade da mistura dentro da célula, aqui estudada através da DTR, os números hidrodinâmicos (Potência, Reynolds, Froude, Weber, etc) e a rotação crítica de suspensão das partículas, por exemplo, é importante que se conheça a distribuição das partículas ao longo da altura da célula.

Numa célula de flotação, como citado anteriormente, necessitamos da atuação de um impelidor que provoque a suspensão dos sólidos e maximize a probabilidade de colisão partícula-bolha. Porém, a energia fornecida pelo impelidor não deve ser muito elevada a ponto de desfazer o agregado partícula-bolha ou promover o arraste hidrodinâmico.

Neste ponto, pode-se dizer então que a célula de flotação possui regiões bem distintas (WESTHUIZEN, 2004). Tais regiões estão ilustradas na Figura 6.

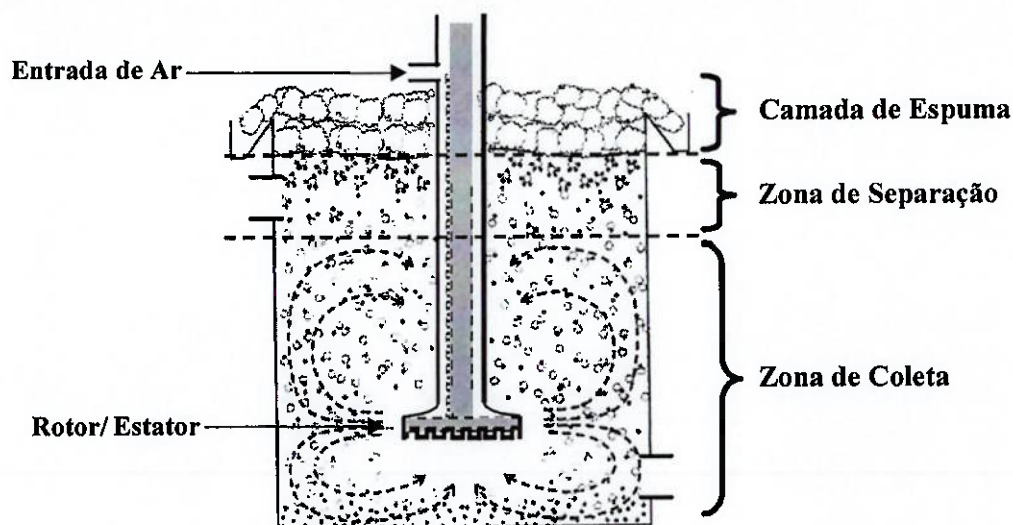


Figura 6 – Divisão da célula de flotação em regiões.

Assim, podemos dizer que em cada zona, para uma célula operando em condições hidrodinâmicas adequadas, tem-se mecanismos diferentes em ação (VERA, 2001; WESTHUIZEN, 2004; YIANATOS, 2001):

- a) Da base da célula até aproximadamente 80% do nível da polpa, tem-se uma região denominada Zona de Coleta. Em tal região, o impelidor deve fazer com que as partículas estejam em estado de suspensão tal que a colisão entre partículas e bolhas ocorra de modo eficiente. Um indicativo disto seria uma % de sólidos mais alta que a média da célula, com perfil de distribuição mais vertical;
- b) Na porção superior da célula (de 80 a 100% do nível da polpa) tem-se a região denominada Zona de Separação. O ideal é que tal zona seja menos turbulenta que a Zona de Coleta. Um indicativo de que uma célula estaria operando nestas condições seria o fato da %sólidos ser muito inferior à média da célula.

Este tópico pode ser tratado tanto qualitativamente, como a divisão das células em regiões, ilustrada acima, quanto quantitativamente, através do cálculo do coeficiente de difusão turbulenta das células, utilizando-se o modelo de sedimentação-dispersão dos sólidos (WESTHUIZEN, 2004). O coeficiente de difusão turbulenta é um bom indicativo dos níveis de turbulência que estão atuando no sistema, onde altos valores dessa grandeza remetem a altos níveis de turbulência. Realizaremos neste trabalho apenas a abordagem qualitativa que pode ser obtida a partir do perfil de porcentagem de sólidos ao longo da altura da célula.

4.4. Dimensionamento de Células Mecânicas – Fator de *Scale-Up*.

Nesta seção, serão apresentados as ferramentas básicas e largamente empregadas no dimensionamento de células mecânicas de flotação.

Assim como o próprio mecanismo de flotação, o dimensionamento de células mecânicas depende, em resumo, de dois parâmetros (DENVER SALA, 1995):

a) **Tempo de retenção** necessário para que uma adequada separação ocorra, levando em consideração as propriedades físicas e químicas da polpa. Este parâmetro determina o tamanho (volume) e o número de células necessários em cada etapa da flotação (*rougher*, *scavenger*, etc);

b) **Agitação e Aeração** necessárias para as condições ótimas de flotação. Determinam o tipo de mecanismo de flotação e a potência (energia) a ser fornecida para o sistema.

A seleção do tamanho e do número de células para cada estágio do circuito de flotação é realizada basicamente em três passos: Determinação do volume total das células de flotação → Seleção do tamanho das células → Determinação do número de células.

O cálculo do volume total das células necessário pode ser obtido a partir da Equação 15.

$$V_{Total} = \frac{(Q \cdot T_r \cdot S)}{(60 \cdot a)} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

Q é a vazão de polpa (m^3/h);

T_r é o tempo de retenção (min);

S é o fator de escala:

0,85 para células operando em escala industrial;

1,00 para células operando em escala piloto;

1,70 para células operando em laboratório.

a é o fator de aeração, normalmente 0,85.

A partir das Equações 1 e 15, obtemos a relação descrita na Equação 16.

$$S = \frac{\tau}{T_r} \quad \text{Equação 16}$$

Observações:

T_r é igual ao t_m obtido através da análise DTR de células em operação;

V no cálculo do tempo espacial (Equação 1) é o volume real de polpa na célula, desconsiderando-se o espaço destinado ao volume de ar, rotor, estator, etc.

Assim, uma forma eficiente de averiguar se células já implementadas em circuitos de flotação estão operando adequadamente é verificar o seu fator de *scale-up* (adimensional), comparando-o com o fornecido pelo fabricante, tendo em vista que este último reflete o ponto mais adequado de operação da célula.

5. Materiais e Métodos.

No início das atividades na planta piloto da fundação Gorceix, os engenheiros responsáveis pelo projeto avaliaram a necessidade de se efetuar testes de dois modelos diferentes de células na etapa *rougher* da flotação. Isso ocorreu pois suspeitava-se que estaria ocorrendo um curto circuito entre o *under flow* e o *over flow* das células que se encontravam em operação.

Dessa forma, o levantamento dos parâmetros hidrodinâmicos contemplou o circuito de flotação *rougher* (DTR e dispersão de sólidos) e *scavenger* (DTR), que exibiram dois arranjos diferentes de células: Circuito Velho e Circuito Novo, tendo as demais etapas do circuito em escala piloto permanecendo inalteradas. A Figura 7 apresenta o fluxograma do circuito da Fundação Gorceix, com as etapas *rougher* e *scavenger* na configuração velha. As Tabelas 4 e 5 apresentam o arranjo e as condições operacionais desses dois circuitos.

Tabela 4 - Arranjo e Condições Operacionais dos Circuitos de Flotação *Rougher*.

Variáveis	Circuito Velho	Circuito Novo
Layout do circuito	2 tanques de 80 litros em série	3 tanques de 31 litros em série
Fabricante	Denver	Denver
Volume total do sistema (V)	160 litros	93 litros
Número de Tanques	2	3
Vazão de Polpa na Alimentação (Q)	6,54 l/min	5,10 l/min
Diâmetro do impelidor (D)	150 mm	100 mm
Rotação do impelidor (N)	1090 rpm	1100 rpm
Tempo espacial (τ)	24,5 min	18,2 min
Número de Froude	5,1	3,4

Tabela 5 – Arranjo e Condições Operacionais dos Circuitos de Flotação *Scavenger*.

Variáveis	Circuito Velho	Circuito Novo
Layout do circuito	6 tanques de 31 litros em série	3 tanques de 31 litros em série + 3 tanques de 9,5 litros em série
Fabricante	Denver	Denver
Volume total do sistema (V)	186 litros	121,5 litros
Número de Tanques	6	6
Vazão de Polpa na Alimentação (Q)	7,68 L/min	10,20 L/min
Diâmetro do impelidor (D)	100mm	100mm e 95mm
Rotação do impelidor (N)	1090 rpm	1090 rpm
Tempo espacial (τ)	24,2min	11,9min
Número de Froude (Fr)	3,4	3,8 e 3,2

5.1. Análise DTR.

A DTR de cada um dos circuitos foi executada através da técnica de adição de traçador químico, apresentada na seção 4.1, onde uma certa quantidade de traçador (NaCl) foi adicionada de uma só vez (entrada em pulso) na alimentação do circuito e sua concentração monitorada ao longo do tempo na descarga do circuito - produto afundado da última célula-, conforme ilustrado na Figura 8.

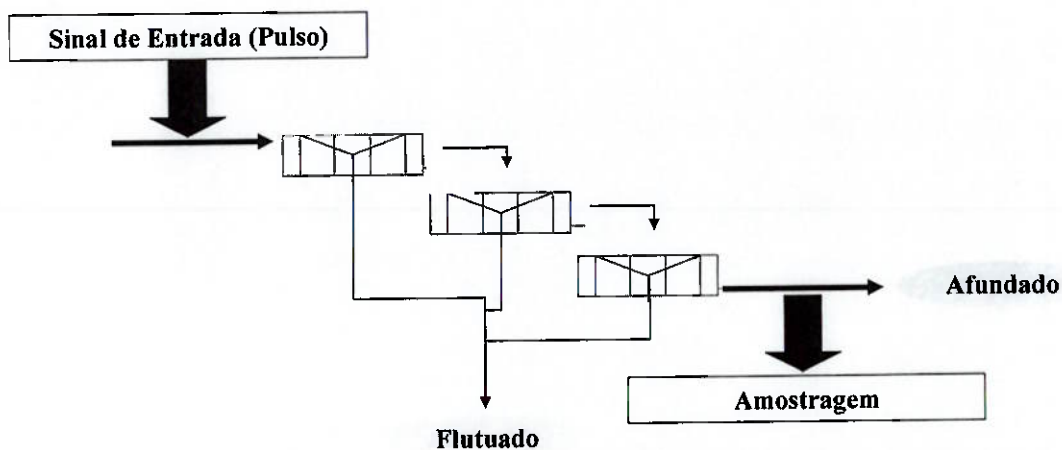


Figura 8 - Esquema ilustrativo do procedimento experimental da DTR

Inicialmente foi coletada uma amostra no tempo zero, imediatamente após a adição do traçador, para servir de referência, e em seguida foram coletadas amostras de 30 em 30 segundos até os 3 minutos do início do experimento. Completado este tempo, as demais foram colhidas de 1 em 1 minuto até completar 60 minutos de ensaio, totalizando 64 amostras.

Todo o material coletado foi devidamente armazenado e encaminhado para análise química - método de análise por absorção atômica - para medição da concentração de sódio (Na^+) em solução.

5.2. Dispersão dos Sólidos.

Para medir a dispersão dos sólidos ao longo da altura da célula utilizou-se uma sonda graduada e uma bomba de polpa rotativa, conforme ilustrado na Figura 9.

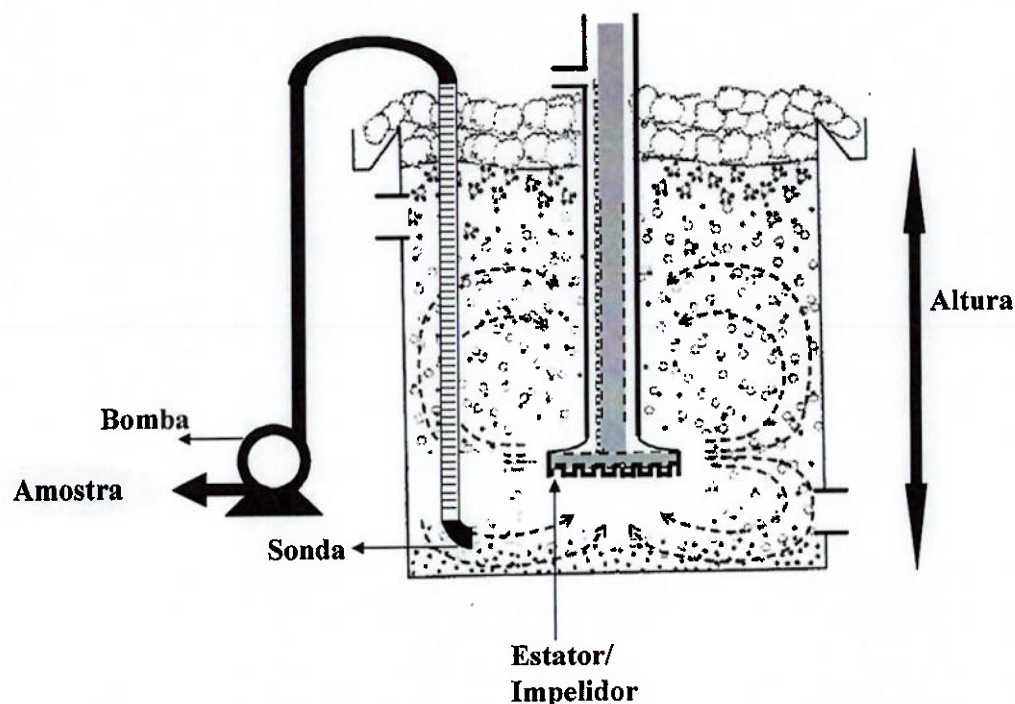


Figura 9 - Esquema ilustrativo da sondagem para determinação do perfil de porcentagem de sólidos dentro da célula.

A sonda era introduzida na parte de traz da célula onde foram coletadas amostras em diversas alturas (cotas), contendo entre 300ml e 400ml de polpa. Em seguida, estas foram pesadas, peneiradas – de forma a se observar a granulometria do material nas diferentes alturas - e encaminhadas para a secagem, determinando-se a porcentagem de sólidos na polpa. A Tabela 6 apresenta alguns dados importantes das células *rougher* Nova e Velha configuração, que foram importantes para os experimentos de sondagem realizados.

Tabela 6 - Dados adicionais das células de flotação utilizados nos experimentos de sondagem para levantamento do perfil de porcentagem de sólidos das células.

	Circuito Velho	Circuito Novo
Nível de poupa nas células	41,0 cm	42,5 cm
Altura aproximada da camada de espuma	6,0 cm	7,0 cm

6. Resultados e Discussões.

Inicialmente, pôde-se observar que as células de flotação da planta piloto da Fundação Gorceix operavam com número de Froude (Fr) bastante elevado ($3,2 \leq Fr \leq 5,1$), conforme apresentado nas Tabelas 4 e 5, enquanto deveriam operar numa faixa bem menor ($0,5 \leq Fr \leq 1,0$).

Estas informações sugerem que os impelidores das células *rougher* e *scavenger* operavam com rotações muito elevadas, como se estivessem atuando em condicionadores, prejudicando o desempenho da flotação no que se refere à destruição do agregado partícula-bolha, além de intensificar o arraste hidrodinâmico de partículas da polpa para o flutuado.

Esta análise inicial foi complementada com os resultados da DTR e com o levantamento do perfil de porcentagem de sólidos ao longo da altura das células, os quais serão apresentados a seguir.

6.1. Resultados DTR.

Os parâmetros relevantes desta etapa foram calculados a partir das curvas de DTR – $C(t) \times t$, $E(t) \times t$ e $F(t) \times t$ -, os quais são:

- a) Tempo de residência médio(t_m);
- b) Desvio padrão (σ);
- c) Número de tanques ideais em série (n).

As Figuras 10 a 13 ilustram as curvas $C(t) \times t$, $E(t) \times t$ e $F(t) \times t$, obtidas a partir da DTR das etapas *rougher* configuração velha, *rougher* configuração nova, *scavenger* configuração velha e *scavenger* configuração nova, respectivamente.

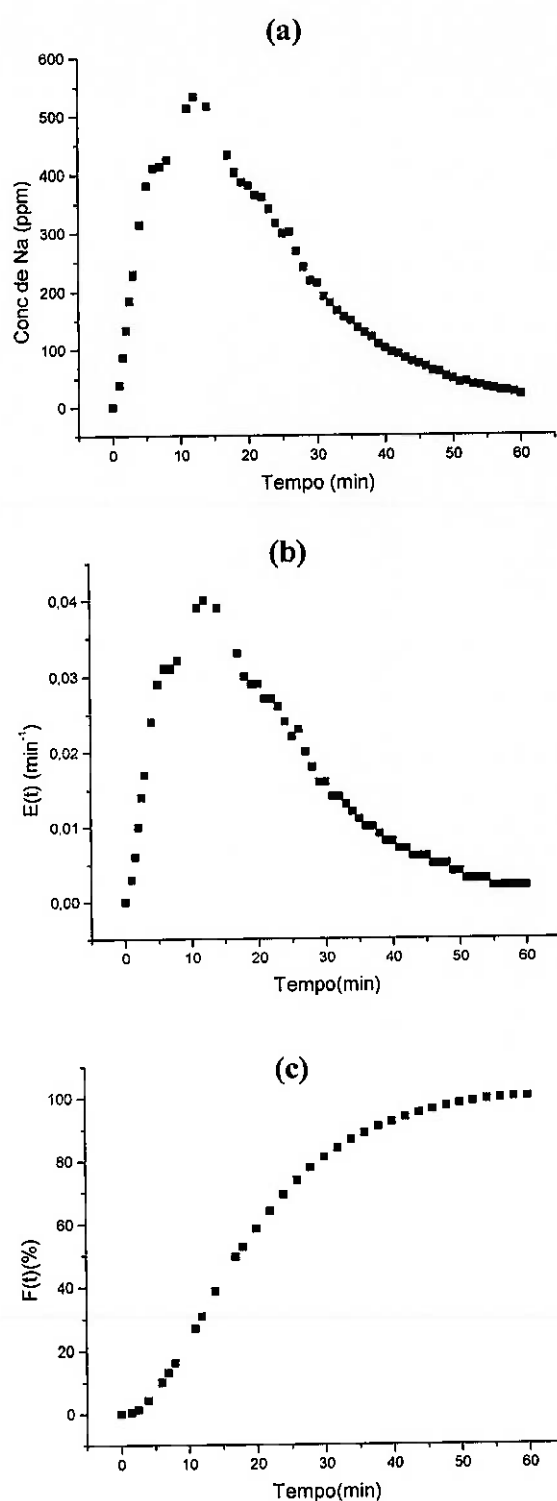


Figura 10 – Curvas DTR do circuito *rougher* configuração velha: (a) $C(t) \times t$; (b) $E(t) \times t$; (c) $F(t) \times t$.

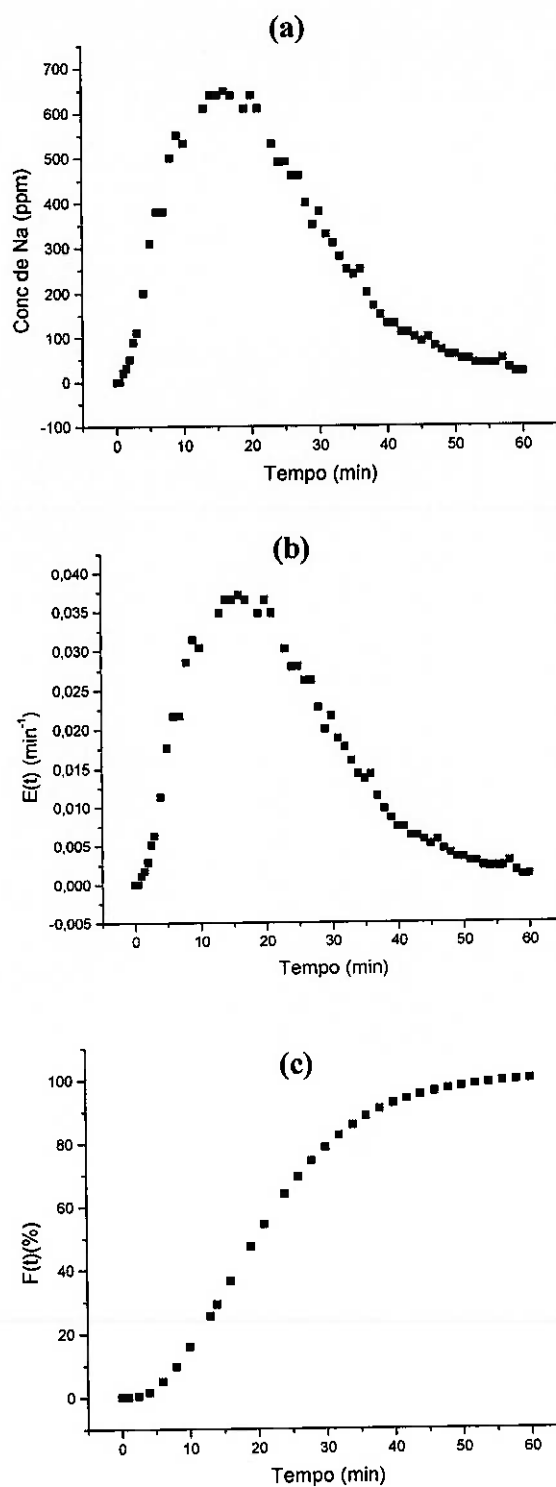


Figura 11 – Curvas DTR do circuito *rougher* configuração nova: (a) $C(t) \times t$; (b) $E(t) \times t$; (c) $F(t) \times t$.

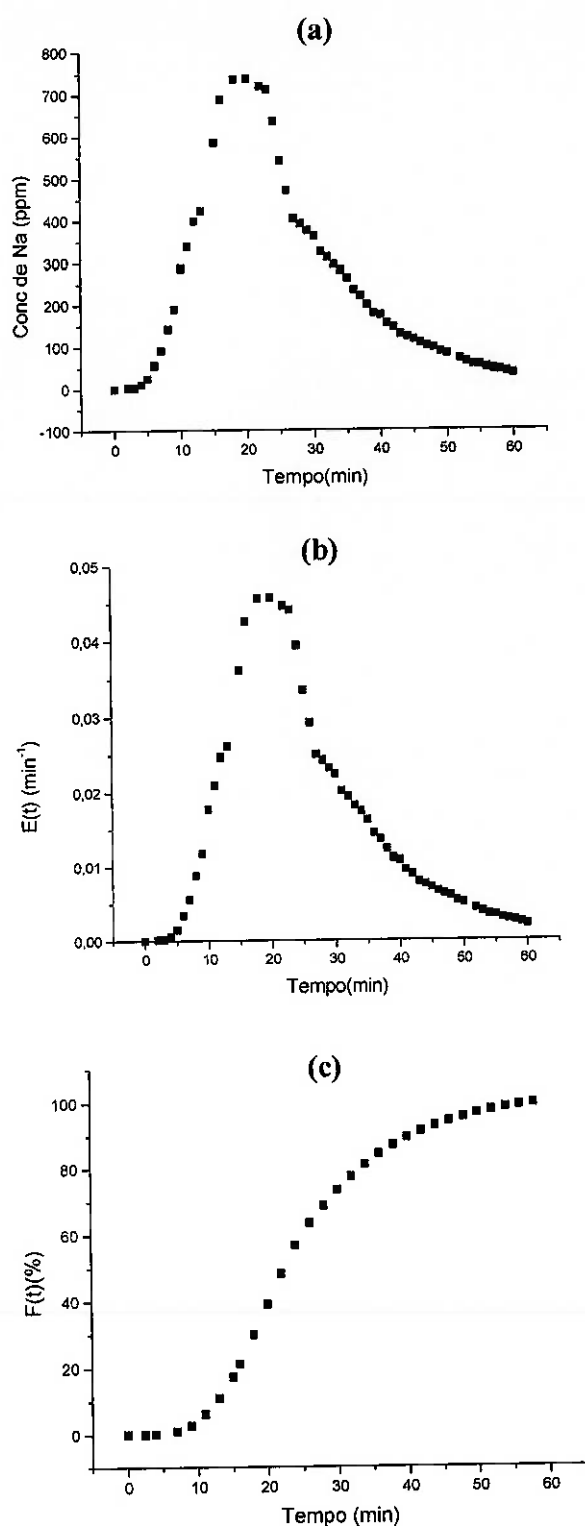


Figura 12 – Curvas DTR do circuito scavenger configuração velha: (a) $C(t) \times t$; (b) $E(t) \times t$; (c) $F(t) \times t$.

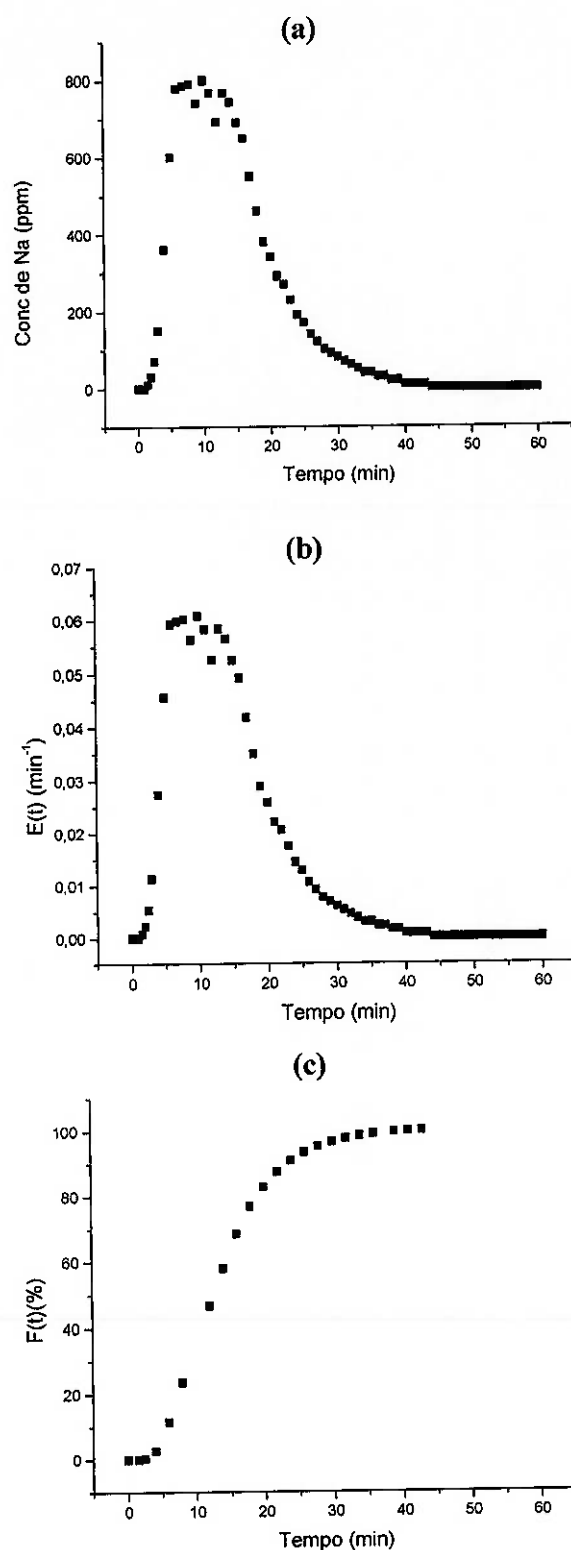


Figura 13 – Curvas DTR do circuito scavenger configuração nova: (a) $C(t) \times t$; (b) $E(t) \times t$; (c) $F(t) \times t$.

Para a obtenção das curvas acima e dos parâmetros da DTR de cada etapa, utilizou-se o programa MicrocalTM OriginTM. Essa ferramenta foi muito útil para o ajuste de curvas sobre os dados experimentais e integração do intervalo contínuo formado por estas, o que, conseqüentemente, facilitou muito os cálculos matemáticos associados a DTR.

Os resultados da DTR são apresentados na Tabela 7, de onde se podem extrair informações que permitem discutir a hidrodinâmica do sistema;

Tabela 7 - Parâmetros de DTR dos Circuitos de Flotação *Rougher* e *Scavenger*.

Parâmetros	Etapa <i>Rougher</i>		Etapa <i>Scavenger</i>	
	Circuito Velho	Circuito Novo	Circuito Velho	Circuito Novo
t_m (min)	19,9	21,6	24,8	13,8
σ (min)	12,3	11,3	11,0	7,2
n	3,97	2,49	4,89	2,75
τ (min)	24,5	18,2	24,2	11,9
τ / t_m	1,2	0,8	1,0	0,9

- Segundo o manual Denver Sala (1995), para células de flotação operando em série dentro de condições ótimas de DTR, a relação τ/t_m é da ordem de 1,7 (Obs: utilizou-se como base o fator de *scale-up* para células em escala de laboratório, tendo em vista o pequeno volume e a baixa vazão de alimentação das células em operação; o fator de *scale-up* para células em escala piloto é utilizado para células com vazões da ordem de 400m³/h). De acordo com os dados da Tabela 7, tal valor é bastante inferior a 1,7, variando de 0,8 a 1,2. Isto significa que as células de flotação estão operando com vazão acima da sua capacidade, ou seja, para a vazão de polpa operacional adotada, as células deveriam ser muito maiores;
- Todas as células de flotação apresentaram curvas de DTR com significativa dispersão, apontada por desvios-padrão (σ) muito altos – e conseqüentemente altas variâncias –, relativamente próximos a meio tempo médio (t_m). Juntado este fator ao formato das curvas de DTR, têm-se sinais de problemas na hidrodinâmica do sistema, como a ocorrência de curto-circuito e/ ou aterramento das células.
- O número de tanques ideais (n), para todos os circuitos, deveria ser muito maior que o número de tanques reais. Tal situação foi verificada somente para a etapa *rougher* circuito velho (3,97>2). Todavia, quanto mais alto o valor de n , melhores as condições de mistura do sistema. Assim sendo, o circuito *rougher* velho e *scavenger* velho apresentaram configurações de DTR mais favoráveis.

6.2. Perfil de Porcentagem de Sólidos - Etapa Rougher.

Para complementar a diagnose sobre a hidrodinâmica das células de flotação, foram executadas amostragens dentro das células de flotação *rougher* em várias alturas (H). Tais alturas foram de H=0,7cm, H=8cm, H=14cm, H=22cm, H=29cm, H=35cm. A % de sólidos em massa (X) de cada amostra foi determinada. Após determinação de X, construiu-se o gráfico *Altura versus % Sólidos*. Os resultados são apresentados na Figura 14, onde RGN designa as células *rougher* nova configuração e RGV as células *rougher* velha configuração, com o índice numérico indicando a posição da célula no banco.

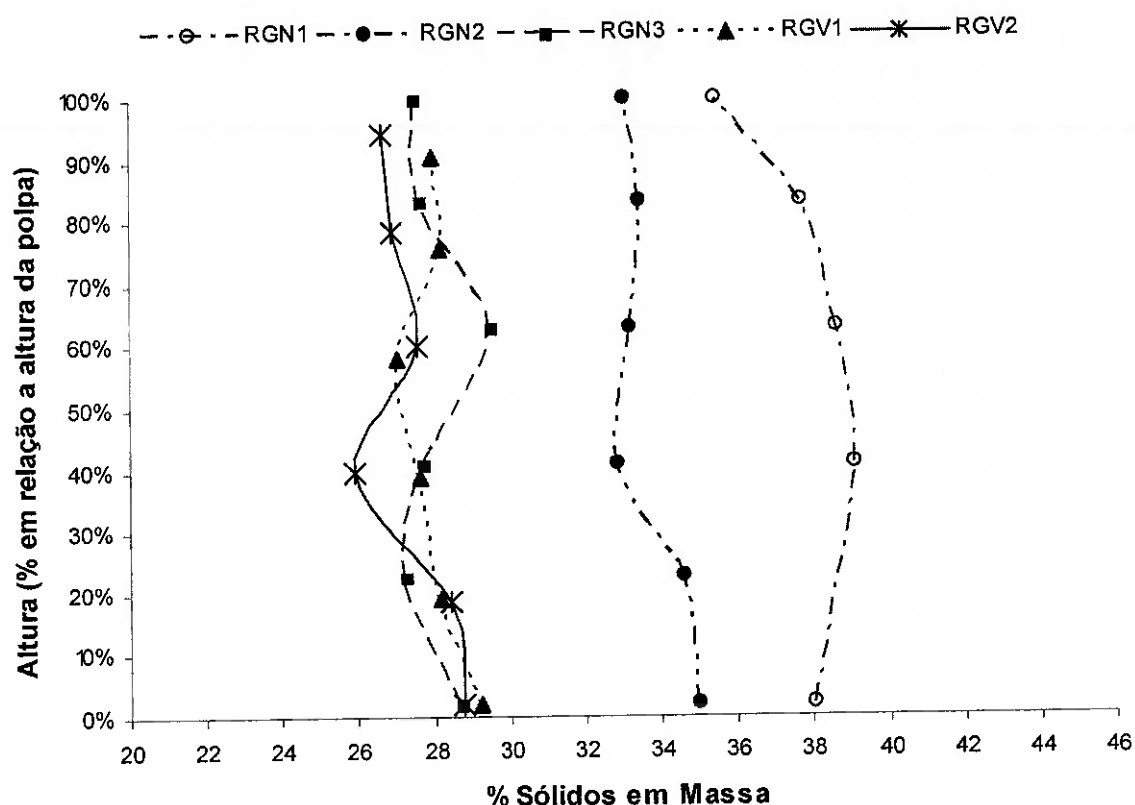


Figura 14 – *Altura versus % de Sólidos da Polpa.*

As curvas de distribuição da Figura 14 mostraram que a %sólidos variou muito pouco ao longo de todo o perfil vertical das células, indicando que o impelidor foi capaz dispersar as partículas de maneira muito eficiente. Tal fato seria muito positivo se as células fossem atuar como condicionadores de polpa, todavia, o objetivo do sistema é promover um perfil de distribuição de sólidos bastante diferente, onde existam duas regiões bem distinta, zona de coleta e zona de separação, conforme apresentado na seção 4.3.

Com base nas informações e conceitos apresentados, podemos inferir que a turbulência dentro das células mecânicas de flotação dos circuitos *rougher* e *scavenger*, tanto velho quanto novo, está bastante pronunciada, haja vista que não se verificou significativa diferença na % de sólidos medida nas alturas inferiores e superiores da célula. Esta mais alta turbulência poderia causar:

- a) Destruição do agregado partícula/bolha, comprometendo a flotação de partículas de *pentilândita* mais grosseiras;
- b) Intenso arraste hidrodinâmico de partículas finas da polpa para a camada de espuma, o que poderia diminuir muito o teor de níquel no produto flutuado.

7. Conclusões e Sugestões de Melhoria.

Com base nos resultados obtidos, pôde-se concluir que os circuitos *rougher* e *scavenger*, tanto velho quanto novo, operavam em condições hidrodinâmicas desfavoráveis à flotação do minério de níquel de Niquelândia. Nesse sentido, puderam-se destacar os seguintes aspectos:

- a) Dentre os dois arranjos de células utilizados no circuito piloto de flotação (“arranjo novo” versus “arranjo velho”), o “arranjo velho” apresentou melhor distribuição de tempos de residência (DTR) do que “arranjo novo”. Isto foi evidenciado por maiores números de tanques ideais apresentados nas etapas *rougher* Velho ($n=3,97$) e *scavenger* Velho ($n=4,98$).
- b) Utilizando o Número de Froude como parâmetro de avaliação da hidrodinâmica das células de flotação, constata-se que estas estão trabalhando com rotações muito altas, operando com $3,2 \leq Fr \leq 5,1$, enquanto, pela literatura, estas deviam operar com $0,5 < Fr < 1$.
- c) A vazão de polpa adotada nos ensaios de flotação piloto está muito acima da capacidade das células, visto que a relação τ/t_m (fator de *scale-up*) calculada a partir das curvas de DTR é da ordem de 0,8-1,2, enquanto que, pelo manual do fabricante, tal relação deveria ser da ordem de 1,7;
- d) Todas as células de flotação apresentaram DTR com altos valores de dispersão, observados pelos formatos das curvas de DTR e pelos valores significativamente altos de desvio padrão ($\sigma \approx 1/2 t_m$), o que sinaliza problemas na hidrodinâmica do sistema ;
- e) O número de tanques ideais (n) em todas as etapas e configurações deveria ser maior que o número de tanques reais. Isto foi verificado apenas na etapa *rougher* com a configuração velha;

- f) O perfil vertical de porcentagem de sólidos apresentado pelas células de flotação indica uma grande homogeneidade de distribuição de partículas ao longo de todo o volume das mesmas. Uma vez que tal homogeneidade é devida a um alto coeficiente de difusão turbulenta, pode-se inferir que a polpa está submetida a altos níveis de turbulência.
- g) Em virtude dos altos níveis de turbulência presentes no sistema, espera-se que esteja ocorrendo a destruição do agregado partícula/bolha, bem como o arraste hidrodinâmico de partículas da polpa para o flutuado.

Dessa forma, para melhorar a hidrodinâmica do sistema, sugere-se que os circuitos operem com os princípios de vazões de polpa (Q) que permitam uma relação $\tau/t_m \sim 1,7$ (fator de *scale-up* Denver) e impelidores que operem com Número de Froude de no máximo $Fr=1$.

Tais princípios se traduzem nos parâmetros apresentados na Tabela 8. Não obstante alguns cuidados e limitações merecem destaque:

- a) Adotar o circuito velho para as etapas *rougher* e *scavenger*;
- b) Caso sejam feitas modificações, deve-se em primeiro lugar diminuir a vazão de alimentação e, posteriormente, executar novas determinações de DTR, verificando se as condições ótimas de DTR foram atingidas, isto é, $\tau/t_m \sim 1,7$ e $n \gg$ número de tanques reais;
- c) Após otimização da DTR, diminuir a rotação dos impelidores para se obter número de Froude mais favorável. Uma vez que as células Denver são sub-aeradas, verificar o *hold-up* do ar antes e depois de reduzir a rotação. Caso ocorra diminuição significativa do *hold-up*, achar um compromisso entre mínima rotação e adequada aeração.

Tabela 8 – Arranjo e Condições Operacionais a serem adotados para os Circuitos de Flotação

Variáveis	<i>Rougher</i> Circuito Velho	<i>Scavenger</i> Circuito Velho
Layout do circuito	2 tanques de 80 litros em série	6 tanques de 31 litros em série
Volume total do sistema (V)	V=160 litros	V=186 litros
Número de Tanques Reais	2	6
Número de Tanques Ideais	3,97	4,89
Vazão de Polpa na Alimentação (Q)	4 l/min < Q < 5 l/min	4 l/min < Q < 5 l/min
Diâmetro do impelidor (D)	D=150mm	D=100mm
Rotação do impelidor (N)	470rpm < N < 614rpm	580rpm < N < 750rpm
Número de Froude (Fr)	0,95 < Fr < 1,6	0,95 < Fr < 1,6

8. Referências Bibliográficas.

- DENVER SALA. **Basic selection guide for process equipment**. Colorado Springs, 1995.
- FUERSTENAU, M.C.; MILLER, J.D.; KUHN, M.C. **Chemistry of flotation**. New York: AIME, 1985.
- FOGLER, H.S. Residence Time Distributions. In: FOGLER, H.S. **Elements of chemical reaction engineering**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1992.
- LEAL FILHO, L. S. **Flotação de oximinerais: teoria e prática voltada à solução de problemas brasileiros**. 2000. 191 p. Resenha (Concurso Professor Titular) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- LEAL FILHO, L. S.; RODRIGUES, W. J.; RALSTON, J. Importance of hydrodynamics in coarse particle flotation. In: RALSTON, J.; MILLER, J.; RUBIO, J. D. **Flotation and flocculation - from fundamentals to applications**. Adelaide: Ian Wark Research Institute, 2002. p. 165-174.
- LIMA, O. A.; LEAL FILHO, L. S.; SILVA, A. L.; MOURA, A. J. Distribuição de tempos de residência da polpa em células mecânicas de flotação. **Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 58, p. 213-218, 2005.
- LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas: cálculo das reações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.
- PERES, ANTÔNIO E. C.; ARAÚJO, A.C. A Flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In: CHAVES, A.P. et al. **Teoria e prática do tratamento de minérios – flotação**. São Paulo: Signus, 2006. p. 1-29.
- RODRIGUES, W. J. **Aspectos hidrodinâmicos na flotação de partículas grossas**. 2001. 150 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
- RODRIGUES, W. J.; LEAL FILHO, L. S.; MASINI, E. A. Dimensionless hydrodynamic parameters and their influence on flotation performance of coarse particles. **Minerals Engineering**, Oxford, v. 14, n. 9, p. 1047-1054, 2001.
- SCHULZE, H. J. **Physico-chemical elementary processes in flotation - an analysis from the point of view of colloid science including process engineering considerations**. Amsterdam; New York : Elsevier, 1984.
- SILVEIRA, G. M. Flotação de níquel na votorantim metais. In: CHAVES, A.P. et al. **Teoria e prática do tratamento de minérios – flotação**. São Paulo: Signus, 2006. p. 1-29.
- VERA, M. A. **A Touch of froth: how bubble-particle aggregates take the strain**. 2002. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Queensland. Queensland, 2002.

WESTHUIZEN, ANDRIES P. P. **The evaluation of solids suspension in a pilot scale mechanical flotation cell.** 2004. Thesis (Master of Science) - University of Cape Town. Cape Town, 2004.

YIANATOS, J.; BERGH, L.; CONDORI, P.; AGUILERA, J. Hydrodynamic and metallurgical characterization of industrial flotation banks for control purposes. **Minerals Engineering**, Oxford, v.14, n. 9 , p. 1033-1046, 2001.

SCHUBERT, H. On the turbulence – controlled microprocesses in flotation machines. **International Journal of Mineral Processing**, v. 56, n. 1–4, p. 257–76, 1999.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). São Paulo. 20/10/2006. **Notícias do setor mineral brasileiro.** Disponível em: <[http:// www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br)>. Acesso em: 20/10/2006.

Anexo A

As Tabelas A1 a A4 apresentam os resultados da análise de concentração de sódio (Na^+) das amostras colhidas na DTR. Todas as análises foram fornecidas pela Companhia Mineira de Metais (CMM) da Votorantim Metais.

Tabela A1 – Resultados da análise da concentração de sódio das amostras de DTR colhidas nas células *rougher* na configuração velha.

Amostra	Tempo (min)	Conc Na (ppm)	Conc Na _{corrigido} (ppm)
R - 1	0	11,12	0
R - 2	0,5	10,81	-0,31
R - 3	1	50,41	39,29
R - 4	1,5	97,32	86,2
R - 5	2	144,59	133,47
R - 6	2,5	195,29	184,17
R - 7	3	239,9	228,78
R - 8	4	325,54	314,42
R - 9	5	392	380,88
R - 10	6	421,31	410,19
R - 11	7	423,5	412,38
R - 12	8	435,24	424,12
R - 13	9	578,48	567,36
R - 14	10	648,29	637,17
R - 15	11	524,46	513,34
R - 16	12	544,88	533,76
R - 17	13	480,46	469,34
R - 18	14	528,14	517,02
R - 19	15	557,71	546,59
R - 20	16	533,5	522,38
R - 21	17	443,81	432,69
R - 22	18	414,09	402,97
R - 23	19	398,24	387,12
R - 24	20	392,75	381,63
R - 25	21	375,93	364,81
R - 26	22	372,74	361,62
R - 27	23	351,52	340,4
R - 28	24	327,39	316,27
R - 29	25	309,79	298,67
R - 30	26	312,76	301,64
R - 31	27	279,36	268,24
R - 32	28	251,73	240,61
R - 33	29	229,95	218,83
R - 34	30	226,18	215,06
R - 35	31	202,39	191,27
R - 36	32	191,23	180,11
R - 37	33	177,76	166,64
R - 38	34	166,38	155,26
R - 39	35	160,35	149,23
R - 40	36	147,61	136,49
R - 41	37	139,91	128,79
R - 42	38	131,87	120,75
R - 43	39	119	107,88
R - 44	40	112	100,88
R - 45	41	105,36	94,24
R - 46	42	102,15	91,03
R - 47	43	94,53	83,41
R - 48	44	88,96	77,84
R - 49	45	85,45	74,33
R - 50	46	80,28	69,16
R - 51	47	72,69	61,57
R - 52	48	71,15	60,03
R - 53	49	62,91	51,79
R - 54	50	58,77	47,65

Tabela A1 – Continuação

Amostra	Tempo (min)	Conc Na (ppm)	Conc Na _{corrigido} (ppm)
R - 55	51	53,08	41,96
R - 56	52	54,3	43,18
R - 57	53	48,92	37,8
R - 58	54	48,21	37,09
R - 59	55	43,7	32,58
R - 60	56	41,74	30,62
R - 61	57	38,6	27,48
R - 62	58	37,83	26,71
R - 63	59	35,69	24,57
R - 64	60	31,3	20,18

Tabela A2 – Resultados da análise da concentração de sódio das amostras de DTR colhidas nas células *rougher* na configuração nova.

Amostra	Tempo (min)	Conc Na (ppm)	Conc Na _{corrigido} (ppm)
RGN - 1	0	10,82	0
RGN - 2	0,5	10,96	0,14
RGN - 3	1	30,7	19,88
RGN - 4	1,5	40,95	30,13
RGN - 5	2	60,93	50,11
RGN - 6	2,5	100,74	89,92
RGN - 7	3	120,85	110,03
RGN - 8	4	210,49	199,67
RGN - 9	5	320,12	309,3
RGN - 10	6	390,66	379,84
RGN - 11	7	390,89	380,07
RGN - 12	8	510,45	499,63
RGN - 13	9	560,74	549,92
RGN - 14	10	542,6	531,78
RGN - 15	11	650,14	639,32
RGN - 16	12	660,18	649,36
RGN - 17	13	620,61	609,79
RGN - 18	14	650,79	639,97
RGN - 19	15	650,64	639,82
RGN - 20	16	660,97	650,15
RGN - 21	17	650,63	639,81
RGN - 22	18	600,43	589,61
RGN - 23	19	620,91	610,09
RGN - 24	20	650,78	639,96
RGN - 25	21	620,96	610,14
RGN - 26	22	630,61	619,79
RGN - 27	23	540,7	529,88
RGN - 28	24	500,34	489,52
RGN - 29	25	500,88	490,06
RGN - 30	26	470,61	459,79
RGN - 31	27	470,78	459,96
RGN - 32	28	410,2	399,38
RGN - 33	29	360,84	350,02
RGN - 34	30	390,32	379,5
RGN - 35	31	340,3	329,48
RGN - 36	32	320,28	309,46
RGN - 37	33	290,06	279,24
RGN - 38	34	260,62	249,8
RGN - 39	35	250,29	239,47
RGN - 40	36	260,07	249,25
RGN - 41	37	210,2	199,38
RGN - 42	38	180,99	170,17
RGN - 43	39	160,7	149,88
RGN - 44	40	140,34	129,52
RGN - 45	41	140,34	129,52
RGN - 46	42	120,72	109,9
RGN - 47	43	120,23	109,41
RGN - 48	44	110,78	99,96
RGN - 49	45	100,32	89,5

Tabela A2 – Continuação.

Amostra	Tempo (min)	Conc Na (ppm)	Conc Na _{corrigido} (ppm)
RGN - 50	46	110,06	99,24
RGN - 51	47	90,03	79,21
RGN - 52	48	80,11	69,29
RGN - 53	49	70,52	59,7
RGN - 54	50	70,17	59,35
RGN - 55	51	60,83	50,01
RGN - 56	52	60,23	49,41
RGN - 57	53	50,69	39,87
RGN - 58	54	50,34	39,52
RGN - 59	55	50,36	39,54
RGN - 60	56	50,18	39,36
RGN - 61	57	60,83	50,01
RGN - 62	58	40,17	29,35
RGN - 63	59	30,85	20,03
RGN - 64	60	30,99	20,17

Tabela A3 – Resultados da análise da concentração de sódio das amostras de DTR colhidas nas células *scavenger* na configuração velha.

Amostra	Tempo (min)	Conc Na (ppm)	Conc Na _{corrigido} (ppm)
S - 1	0	4,11	0
S - 2	0,5	3,92	-0,19
S - 3	1	3,9	-0,21
S - 4	1,5	4,09	-0,02
S - 5	2	6,54	2,43
S - 6	2,5	7,36	3,25
S - 7	3	6,91	2,8
S - 8	4	14,58	10,47
S - 9	5	28,37	24,26
S - 10	6	59,57	55,46
S - 11	7	94,39	90,28
S - 12	8	146,14	142,03
S - 13	9	194,22	190,11
S - 14	10	290,66	286,55
S - 15	11	342,05	337,94
S - 16	12	402,87	398,76
S - 17	13	425,94	421,83
S - 18	14	650,3	646,19
S - 19	15	588,42	584,31
S - 20	16	692,22	688,11
S - 21	17	636,45	632,34
S - 22	18	740,01	735,9
S - 23	19	717,01	712,9
S - 24	20	742,12	738,01
S - 25	21	771,28	767,17
S - 26	22	724,21	720,1
S - 27	23	715,89	711,78
S - 28	24	639,67	635,56
S - 29	25	545,72	541,61
S - 30	26	476,27	472,16
S - 31	27	407,94	403,83
S - 32	28	395,34	391,23
S - 33	29	379,5	375,39
S - 34	30	366,23	362,12
S - 35	31	329,1	324,99
S - 36	32	316,44	312,33
S - 37	33	297,24	293,13
S - 38	34	284,75	280,64
S - 39	35	265,85	261,74
S - 40	36	237,39	233,28
S - 41	37	224,02	219,91
S - 42	38	202,34	198,23
S - 43	39	183,18	179,07
S - 44	40	178,21	174,1

Tabela A3 – Continuação.

Amostra	Tempo (min)	Conc Na (ppm)	Conc Na _{corrigido} (ppm)
S - 45	41	157,96	153,85
S - 46	42	148,5	144,39
S - 47	43	132,07	127,96
S - 48	44	126,07	121,96
S - 49	45	119,67	115,56
S - 50	46	111,48	107,37
S - 51	47	104,67	100,56
S - 52	48	100,68	96,57
S - 53	49	90,33	86,22
S - 54	50	85,41	81,3
S - 55	51	5,04	0,93
S - 56	52	73,88	69,77
S - 57	53	65,95	61,84
S - 58	54	59,71	55,6
S - 59	55	59,31	55,2
S - 60	56	52,7	48,59
S - 61	57	49,37	45,26
S - 62	58	47,19	43,08
S - 63	59	42,64	38,53
S - 64	60	38,07	33,96

Tabela A4 – Resultados da análise da concentração de sódio das amostras de DTR colhidas nas células *scavenger* na configuração nova.

Amostra	Tempo (min)	Conc Na (ppm)	Conc Na _{corrigido} (ppm)
SCN - 1	0	10,03	0
SCN - 2	0,5	10	-0,03
SCN - 3	1	10,24	0,21
SCN - 4	1,5	20,07	10,04
SCN - 5	2	40,21	30,18
SCN - 6	2,5	80,62	70,59
SCN - 7	3	160,1	150,07
SCN - 8	4	370,25	360,22
SCN - 9	5	610,62	600,59
SCN - 10	6	789,35	779,32
SCN - 11	7	796,57	786,54
SCN - 12	8	801,18	791,15
SCN - 13	9	750,48	740,45
SCN - 14	10	809,92	799,89
SCN - 15	11	776,9	766,87
SCN - 16	12	700,97	690,94
SCN - 17	13	777,58	767,55
SCN - 18	14	753,4	743,37
SCN - 19	15	699,73	689,7
SCN - 20	16	658,47	648,44
SCN - 21	17	560,09	550,06
SCN - 22	18	470,38	460,35
SCN - 23	19	390,24	380,21
SCN - 24	20	350,07	340,04
SCN - 25	21	300,6	290,57
SCN - 26	22	280,9	270,87
SCN - 27	23	240,26	230,23
SCN - 28	24	200,24	190,21
SCN - 29	25	180,06	170,03
SCN - 30	26	150,26	140,23
SCN - 31	27	130,88	120,85
SCN - 32	28	110,89	100,86
SCN - 33	29	100,56	90,53
SCN - 34	30	90,33	80,3
SCN - 35	31	80,18	70,15
SCN - 36	32	70,14	60,11
SCN - 37	33	60,45	50,42
SCN - 38	34	50,62	40,59
SCN - 39	35	50,04	40,01

Tabela A4 – Continuação.

Amostra	Conc Na (ppm)	Amostra	Conc Na (ppm)
SCN - 40	36	40,57	30,54
SCN - 41	37	40,15	30,12
SCN - 42	38	30,53	20,5
SCN - 43	39	30,27	20,24
SCN - 44	40	20,89	10,86
SCN - 45	41	20,64	10,61
SCN - 46	42	20,33	10,3
SCN - 47	43	20,09	10,06
SCN - 48	44	10,95	0,92
SCN - 49	45	10,85	0,82
SCN - 50	46	10,7	0,67
SCN - 51	47	10,76	0,73
SCN - 52	48	10,63	0,6
SCN - 53	49	10,51	0,48
SCN - 54	50	10,43	0,4
SCN - 55	51	10,45	0,42
SCN - 56	52	10,4	0,37
SCN - 57	53	10,34	0,31
SCN - 58	54	10,27	0,24
SCN - 59	55	10,26	0,23
SCN - 60	56	10,27	0,24
SCN - 61	57	10,21	0,18
SCN - 62	58	10,13	0,1
SCN - 63	59	10,16	0,13
SCN - 64	60	10,16	0,13

Anexo B

‘As Tabelas B1 e B2 apresentam os resultados obtidos na sondagem das células de flotação com o objetivo de obter o perfil de porcentagem de sólidos ao longo da altura das células (axial ao eixo do impelidor).

Tabela B1 – Sondagem *rougher* nova configuração.

T (°C)	Amostra	Altura (cm)	%de sólidos	Partição		d ₅₀ mm
				d>25mm	d<25mm	
31	Célula 1 - 1	0,7	38,1	78,5	21,5	71,31
	Célula 1 - 2	7,9	32,0	86,1	13,9	78,56
	Célula 1 - 3	14,2	39,1	70,7	29,3	60,56
	Célula 1 - 4	21,7	38,7	70,8	29,2	60,22
	Célula 1 - 5	28,7	37,7	69,9	30,1	58,65
	Célula 1 - 6	35,2	35,4	67,4	32,6	53,94
31	Célula 2 - 1	0,7	35,0	67,6	32,4	55,89
	Célula 2 - 2	7,9	34,6	66,7	33,3	53,38
	Célula 2 - 3	14,2	32,9	63,0	37,0	49,20
	Célula 2 - 4	21,7	33,2	64,1	35,9	50,21
	Célula 2 - 5	28,7	33,5	65,7	34,3	52,34
	Célula 2 - 6	35,2	33,1	65,0	35,0	51,89
31	Célula 3 - 1	0,7	28,7	60,7	39,3	45,46
	Célula 3 - 2	7,9	27,2	59,2	40,8	42,55
	Célula 3 - 3	14,2	27,7	60,4	39,6	43,92
	Célula 3 - 4	21,7	29,5	60,2	39,8	44,17
	Célula 3 - 5	28,7	27,7	59,6	40,4	42,47
	Célula 3 - 6	35,2	27,5	58,9	41,1	42,60

Tabela B2 – Sondagem *rougher* velha configuração.

T (°C)	amostra	Altura (cm)	%de sólidos	Partição		d ₅₀ mm
				d>25mm	d<25mm	
31	Célula 1 - 1	0,7	29,3	71,2	28,8	67,60
	Célula 1 - 2	7,0	28,2	70,0	30,0	63,36
	Célula 1 - 3	14,5	27,6	70,5	29,5	64,54
	Célula 1 - 4	21,5	27,1	70,4	29,6	64,34
	Célula 1 - 5	28,0	28,2	70,3	29,7	64,41
	Célula 1 - 6	33,5	27,9	70,1	29,9	64,91
31	Célula 2 - 1	0,7	28,7	69,9	30,1	61,56
	Célula 2 - 2	6,5	28,4	69,0	31,0	60,74
	Célula 2 - 3	14,0	25,9	66,6	33,4	55,12
	Célula 2 - 4	21,0	27,5	69,2	30,8	60,15
	Célula 2 - 5	27,5	26,9	68,6	31,4	58,74
	Célula 2 - 6	33,0	26,6	68,1	31,9	57,38