

Mecanismos Atuantes na Concentração Gravítica e Principais Equipamentos Utilizados na Concentração Centrífuga

**Regina Coeli Casseres Carrisso
Arthur Pinto Chaves**

Presidência da República

FERNANDO HENRIQUE CARDOSO

MARCO ANTÔNIO MACIEL

Vice-presidente

Ministério da Ciência e Tecnologia

RONALDO MOTA SARDENBERG

CARLOS AMÉRICO PACHECO

Secretário Executivo

JOÃO E. STEINER

Secretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

FERNANDO A. FREITAS LINS

Diretor

JULIANO PERES BARBOSA

Coordenação de Projetos Especiais (CPE)

ADÃO BENVINDO DA LUZ

Coordenação de Tratamento de Minérios (CTM)

RONALDO LUIZ C. DOS SANTOS

Coordenação de Metalurgia Extrativa (CME)

MARIA ALICE C. DE GÓES

Coordenação de Química Analítica (CQA)

CARLOS CÉSAR PEITER

Coordenação de Estudos e Desenvolvimento (CES)

COSME ANTÔNIO MORAES REGLY

Coordenação de Administração (CAD)

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

ISSN 0103-7382

**Mecanismos atuantes na
concentração gravítica e principais
equipamentos utilizados na
concentração centrífuga**

REGINA COELI CASSERES CARRISSO

Eng. Metalurgista – UFRJ.

Doutora em Engenharia Mineral – USP.

Pesquisador Titular do CETEM/MCT.

ARTHUR PINTO CHAVES

Eng. Metalurgista – EPUSP.

Doutor em Engenharia Mineral – USP.

Professor titular da Universidade de São
Paulo – USP.

CETEM / MCT

2002

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

MARIO VALENTE POSSA

Editor

ROBERTO DE BARROS EMERY TRINDADE

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Arnaldo Alcover Neto, Fernando Freitas Lins, João Alves Sampaio, Reiner Neumann, Ronaldo Luiz Correia dos Santos, Achilles Junqueira Bourdot Dutra (UFRJ), Antonio E. Clark Peres (UFMG), Cláudio Schneider (University of Utah), José Aury de Aquino (CDTN), José Farias de Oliveira (UFRJ), Lino Rodrigues de Freitas (CVRD), Luciano Tadeu da Silva Ramos (CVRD), Mário Rui Machado Leite (IGM-Portugal), Maurício Leonardo Torem (PUC-Rio)

A Série Tecnologia Mineral publica trabalhos na área minero-metalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es)

Jackson de Figueiredo Neto **COORDENAÇÃO EDITORIAL**
Dayse Lúcia Moraes Lima **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA**
Vera Lúcia Souza **CAPA**

Carrisso, Regina Coeli Casseres

Mecanismos autantes na concentração gravítica e principais equipamentos utilizados na concentração centrífuga/Regina Coeli Casseres Carrisso; Arthur Pinto Chaves. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.

36 p. (Série Tecnologia Mineral, 79)

1. Concentração gravítica. 2. Concentração centrífuga. I. Chaves, Arthur Pinto. II. Título. III. Centro de Tecnologia Mineral. IV. Série

ISBN 85.7227.158-9

ISSN 0103-7382

CDD 622.7

Sumário

Resumo.....	3
Abstract	4
1. Introdução	5
2. Movimento de partículas em um fluido	6
3. Mecanismos atuantes na concentração gravítica	12
4. Principais equipamentos de concentração centrífuga	21
4.1 Jigue Kelsey	21
4.2 Concentrador centrífugo Falcon	22
4.3 Concentrador centrífugo Knelson	24
4.4 Multi-Gravity Separator (MGS)	26
5. Considerações Gerais	28
6. Referências Bibliográficas	29

Lista de símbolos e unidades

As unidades podem ser apresentadas como múltiplo ou submúltiplo.

a	aceleração da partícula (m/s^2)
A	área projetada da partícula normal ao seu movimento (m^2)
CC	critério de concentração
d	diâmetro da partícula (m)
d_s	diâmetro de uma esfera com a mesma área da partícula (m)
d_v	diâmetro de uma esfera com o mesmo volume da partícula (m)
DE	variação de energia entre os dois sistemas (N.m)
F	força resultante (N)
F_B	força de Bagnold (N)
F_g	força da gravidade (N)
F_R	força de resistência do fluido (N)
F_{RV}	força de resistência viscosa (N)
F_{RF}	força de resistência de forma (N)
FS	fator de sedimentação
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
G	peso das partículas (N)
h	altura total do leito (m)
k	constante
m	massa da partícula (kg)
m'	massa de fluido deslocada (kg)
n	índice de comportamento do fluido
Q	coeficiente de resistência do fluido (adimensional)
r	raio da órbita na qual a partícula se encontra (m)
r_p	raio da partícula (m)
Re_p	número de Reynolds (adimensional)
RS_{QL}	razão de sedimentação em queda livre
RS_{QR}	razão de sedimentação em queda retardada
v	velocidade da partícula (m/s)
v_r	velocidade relativa partícula-fluido (m/s)
v_t	velocidade terminal (m/s)
\bar{d}	densidade absoluta da partícula (t/m^3)
\bar{d}_l	densidade absoluta do mineral leve (t/m^3)
\bar{d}_p	densidade absoluta do mineral pesado (t/m^3)
m	viscosidade absoluta ou dinâmica do fluido (kg/ms)
r	densidade absoluta do fluido (t/m^3)
r_p	densidade absoluta da polpa (t/m^3)
y	fator de esfericidade (adimensional)
w	velocidade angular (rad/s)
n_s	coeficiente de atrito estático (adimensional)
n_b	coeficiente de atrito dinâmico (adimensional)

Resumo

Neste trabalho são apresentados os conceitos que envolvem a concentração gravítica e os principais equipamentos de concentração centrífuga. Da concentração gravítica são abordados o movimento de partículas em um fluido e os mecanismos que nelas atuam.

Palavras-chave: concentração gravítica, concentração centrífuga, equipamentos de concentração centrífuga, jigge centrífugo, concentrador Knelson, concentrador Falcon, Multi-Gravity Separator.

Abstract

In this work, we present the concepts of gravity concentration and the main centrifugal concentration equipments. In the gravity concentration we analyse the movement of the particles in the fluid and the mechanisms of the particulate separation in these concentration process.

Keywords: gravity concentration, centrifugal concentration, centrifugal concentration equipments, Kelsey jig, concentrator Knelson, concentrator Falcon, Multi-Gravity Separator.

1. Introdução

Uma característica comum encontrada em algumas jazidas brasileiras é a de apresentar uma grande quantidade de lama, constituída principalmente de argilo-minerais ou de outros minerais advindos de processos genéticos de alteração, apresentando tamanhos finos, ultrafinos e coloidais.

Minerais com esses tamanhos também estão presentes em rejeitos de beneficiamento de minérios. Muitas vezes tais rejeitos contêm ainda grandes quantidades de minerais úteis, que devido à dificuldade de separá-los dos minerais de ganga, por causa de seus tamanhos, estão à espera de uma tecnologia que proporcione o seu beneficiamento de forma econômica.

Para superar as dificuldades encontradas na concentração de minérios com granulometria fina e com pequenas diferenças de densidade entre os minerais útil e os de ganga, vêm sendo desenvolvidos equipamentos de concentração gravítica que operam com a utilização da força centrífuga e da fluidização do leito de partículas. Esses concentradores centrífugos baseiam-se na geração de grandes campos gravitacionais, que permitem uma melhor seletividade na separação de partículas "leves" das "pesadas" e entre partículas minerais com pequenas diferenças de densidade. São eles: os concentradores *Knelson* e o *Falcon*, que utilizam somente a força centrífuga como principal agente para a concentração de minerais pesados: o *Multi-Gravity Separator* que combina a força centrífuga com movimentos longitudinais semelhantes aos das mesas vibratórias, e o jigue *Kelsey*, a centrifugação com a pulsação de um leito semelhante ao movimento de um jigue convencional.

2. Movimento de partículas em um fluido

O movimento de partículas em um fluido é de extrema importância teórica e prática em muitos processos de beneficiamento de minérios, dentre eles o de concentração gravítica. Esse movimento é quantificado considerando a velocidade com que as partículas atravessam o meio fluido, sendo a água o meio mais utilizado.

Os estudos iniciais de sólidos se deslocando em um meio fluido foram desenvolvidos tendo-se por base o movimento de partículas esféricas em queda livre. O movimento em queda livre refere-se ao movimento da partícula imersa em um fluido que, sob a ação da gravidade, tende a percorrer uma distância teoricamente infinita.

As partículas ao se deslocarem imersas num fluido ficam sujeitas a uma resistência deste, função da velocidade com a qual a partícula se desloca. A força de resistência não é dependente somente da velocidade da partícula, mas também do tamanho, forma, densidade e interação com outras partículas ou com as paredes do equipamento.

Quando a força de resistência oferecida pelo fluido ao movimento de uma partícula tiver um valor igual e de sentido oposto à resultante de todas as forças atuantes na mesma, a velocidade será constante e é denominada de velocidade terminal.

No caso em que a força externa atuante sobre a partícula for somente a gravitacional tem-se como força resultante (F)

$$F = mg - m'g - F_R = m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

onde:

F = força resultante que atua na partícula (N);

m' = massa de fluido deslocada (kg);

v = velocidade da partícula (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2); e

F_R = força de resistência do fluido (N).

No caso de estar atuando uma força centrífuga, a resultante é dada, de forma similar à da equação 1, por

$$F = (m - m')w^2r - F_R = m \frac{dv}{dt}, \quad (2)$$

onde:

w = velocidade angular (rad/s); e

r = raio da órbita na qual a partícula se encontra (m).

A equação geral para a força de resistência é dada por

$$F_R = \frac{1}{2} Q \rho v_r^2 A', \quad (3)$$

onde:

F_R = força de resistência do fluido (N);

Q = coeficiente de resistência (adimensional);

A = área projetada da partícula, normal ao seu movimento (m^2);

v_r = velocidade relativa partícula-fluido (m/s); e

ρ = densidade absoluta do fluido (t/m^3).

A força de resistência é constituída por duas componentes: a resistência de forma, que é do tipo inercial, e a resistência à fricção, do tipo viscosa.

A resistência de forma tem origem na assimetria da distribuição de pressão do fluido sobre as duas faces opostas da partícula, criando uma componente na direção do fluxo, com sentido contrário ao movimento da partícula.

A resistência à fricção é função da viscosidade do fluido. No movimento relativo entre a partícula e o fluido é gerada uma força de cisalhamento na superfície da partícula, resultando também numa componente na direção do fluxo, mas com sentido contrário.

A predominância de uma das componentes da força de resistência depende do tipo de regime de escoamento ao qual a partícula está submetida (CONCHA; ALMENDRA (1979)).

Os tipos de regime de escoamento podem ser classificados, em função do número de Reynolds, em regimes laminar, turbulento e intermediário. O número de Reynolds pode ser calculado por

$$Re_p = \frac{\rho v_r d}{\mu} , \quad (4)$$

onde:

Re_p = número de Reynolds da partícula;

ρ = densidade absoluta do fluido (t/m^3);

v_r = velocidade relativa partícula-fluido (m/s);

d = diâmetro da partícula (m); e

μ = viscosidade absoluta ou dinâmica do fluido (kg/ms).

Quando a partícula possui uma forma irregular, o que ocorre em tratamento de minérios, torna-se necessário realizar uma correção do número de Reynolds através do fator de esfericidade da partícula, ψ , que foi proposto por WADELL (1934) apud GAUDIN (1939) e dado pela equação

$$\psi = \left(\frac{d_v}{d_s} \right)^2 , \quad (5)$$

onde:

d_v = diâmetro de uma esfera que tenha o mesmo volume da

partícula (m); e

d_s = diâmetro de uma esfera que tenha a mesma área da partícula (m).

Na sedimentação de partículas esféricas a baixas velocidades ou sob regime laminar, a força de resistência viscosa é dada pela equação 6, a velocidade terminal pela equação 7 e o coeficiente de resistência pela equação 8.

$$F_{RV} = 3\pi d\mu v_r \quad (6)$$

$$Q = \frac{24}{Re_p} \quad (7)$$

$$v_r v_t = \frac{gd^2(d - r)}{18m} \quad (8)$$

onde:

F_{RV} = força de resistência viscosa (N);

d = diâmetro da partícula (m);

m = viscosidade absoluta do fluido (kg/ms);

v_r = velocidade relativa partícula-fluido (m/s);

v_t = velocidade terminal (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

ρ = densidade absoluta da partícula (t/m³);

r = densidade absoluta do fluido (t/m³);

Re_p = número de Reynolds da partícula (adimensional); e

Q = coeficiente de resistência do fluido (adimensional).

Já na sedimentação para partículas esféricas a altas velocidades ou sob regime turbulento, a força de resistência de forma é dada pela equação 9 e a velocidade terminal da partícula pela equação 10.

$$F_{RF} = \frac{\rho}{20} d^2 v_r^2 \rho^2, \quad e \quad (9)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{4}{3} \left(\frac{\delta - \rho}{\rho} \right) g d} \quad (10)$$

onde:

F_{RF} = força de resistência de forma (N);

d = diâmetro da partícula (m);

v_r = velocidade relativa partícula-fluido (m/s);

ρ = densidade absoluta do fluido (t/m³);

v_t = velocidade terminal (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

δ = densidade absoluta da partícula (t/m³) e

Q = coeficiente de resistência (adimensional).

De acordo com NAPIER-MUNN (1990), sob essas condições, o coeficiente de resistência é constante e igual a 0,44.

Considerando duas partículas minerais de densidades δ_a e δ_b e diâmetros d_a e d_b , respectivamente, movimentando-se em um meio fluido de densidade ρ , a uma mesma velocidade de sedimentação, ou seja, suas velocidades terminais sendo as mesmas, obtém-se pela aplicação direta das Leis de Newton e Stokes, a razão de sedimentação de partículas esféricas em queda livre.

$$RS_{QL} = \frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{\delta_b - \rho}{\delta_a - \rho} \right)^n \quad (11)$$

onde:

RS_{QL} = razão de sedimentação em queda livre; e

$n = 1$ para a Lei de Newton (regime turbulento) e $n = 0,5$ para a Lei de Stokes (regime laminar).

Esta expressão fornece a razão de diâmetros de partículas esféricas de dois minerais diferentes, para que eles tenham a mesma velocidade terminal de sedimentação (partículas equitombantes).

3. Mecanismos atuantes na concentração gravítica

Os mecanismos que são identificados como responsáveis no processo de concentração gravítica são a aceleração diferencial, sedimentação retardada, consolidação intersticial, velocidade diferencial em escoamento laminar, potencial de energia e ação das forças cisalhantes (KELLY; SPOTTISWOOD (1982)).

3.1. Aceleração diferencial

Em grande parte dos concentradores gravíticos, a distância percorrida por uma partícula, sem que o seu percurso seja alterado ou interrompido por outras partículas ou por uma superfície, é muito pequena.

Assim, as partículas estão sujeitas a constantes acelerações/desacelerações e esses períodos de aceleração/desaceleração podem representar uma fração significativa do tempo total de deslocamento dessas partículas.

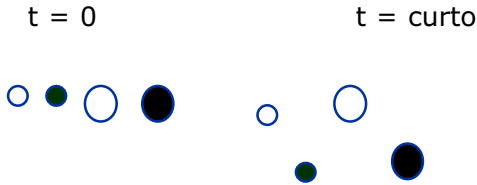
O equilíbrio das forças que atuam sobre a partícula é dado por

$$m \frac{dv}{dt} = mg \left(\frac{\delta - \rho}{\delta} \right) - \frac{1}{2} Q A v^2 \rho \quad (12)$$

Considerando o instante em que a partícula é colocada no fluido a sua velocidade é zero, a equação 12 torna-se

$$a_i = \frac{dv}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\delta} \right) \quad (13)$$

A equação mostra que a aceleração inicial é função apenas das densidades do sólido e do fluido, sendo independente do tamanho da partícula.



3.2. Sedimentação impedida

O movimento em queda impedida é caracterizado pelo movimento de uma partícula numa polpa. Com o aumento da concentração de partículas na polpa, aumenta o número de colisões entre elas, sendo suas trajetórias influenciadas pelas das demais e pelo deslocamento da água através dos espaços entre estas, tendo como resultado uma velocidade terminal de sedimentação menor do que aquela observada em queda livre (equação 11).

Similarmente à razão de sedimentação em queda livre, pode-se definir uma razão de sedimentação em queda retardada por

$$RS_{QR} = \frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{\delta_b - \rho_p}{\delta_a - \rho_p} \right), \quad (14)$$

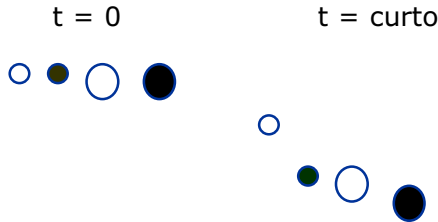
para $d_b > d_a$,

onde:

ρ_p = densidade absoluta da polpa (t/m^3).

Esta razão de sedimentação é sempre maior do que a de queda livre e quanto mais densa for a polpa, maior será a razão do diâmetro de partículas com velocidades terminais iguais.

Por este mecanismo, as partículas maiores e as mais pesadas irão se depositar primeiro, com as menores e as mais leves acima delas.



Seguindo este raciocínio, estabelece-se o critério de concentração (CC) que pode ser utilizado como uma primeira aproximação para se ter uma idéia do grau de dificuldade da separação entre dois minerais através de processo de concentração gravítica, desconsiderando-se a forma das partículas. Esse critério de concentração foi originalmente sugerido por TAGGART (1945) com base na experiência industrial e quando aplicado à separação de dois minerais em água é definido por

$$CC = \frac{(\delta_p - \rho_p)}{(\delta_l - \rho_p)}, \quad (15)$$

onde:

δ_p = densidade absoluta do mineral pesado (t/m^3);

δ_l = densidade absoluta do mineral leve (t/m^3); e

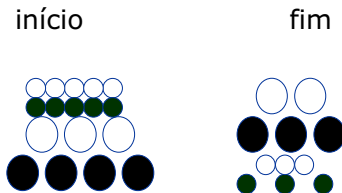
ρ_p = densidade absoluta da polpa (t/m^3).

Para que o critério de concentração possa ser utilizado para partículas com diferentes formas, ele deve ser multiplicado pelo fator razão de forma (FRF). Este fator é definido pelo quociente entre os fatores de sedimentação (FS) dos minerais pesados e dos minerais leves. O fator de sedimentação para um mineral é dado pela razão das velocidades terminais (v_t) entre duas partículas do mineral para o qual se quer calcular o fator de sedimentação, de

mesmo volume, sendo uma delas uma esfera (BURT(1984)).

3.3. Consolidação intersticial

Desde que partículas de diferentes tamanhos ou densidades não percorrem a mesma distância num período curto de tempo, elas irão se depositar num substrato em diferentes instantes. As partículas grosseiras, ao se depositarem primeiramente, deixam entre si espaços vazios (interstícios) que serão percorridos por partículas menores até que fiquem retidas nestes interstícios. Este fenômeno é denominado consolidação intersticial.



3.4. Velocidade diferencial em escoamento laminar

O movimento de partículas dentro de um fluido em escoamento livre e laminar é afetado pela inclinação da superfície onde ocorre o movimento, pela espessura da camada de fluido, pelo coeficiente de atrito entre as partículas e a superfície de escoamento, pela densidade e forma das partículas e pela rugosidade da superfície. Durante o escoamento, as partículas ficam sujeitas a um gradiente de velocidades que varia de zero na superfície até um valor máximo próximo à interface fluido/ar. As partículas pesadas maiores chegam à superfície mais rapidamente do que as leves menores.

Se a superfície for horizontal, a força da gravidade manterá a partícula estática sobre a mesma. Caso seja inclinada, a força da gravidade irá auxiliar no movimento da partícula sobre a superfície.

A força de atrito entre a partícula e a superfície varia de zero até um valor limite do coeficiente de atrito estático (n_s), a partir do qual ela entra em movimento, com o coeficiente de atrito estático sendo substituído pelo coeficiente de atrito dinâmico (n_D), que é função da velocidade com a qual a partícula se desloca sobre a superfície.

A força que o fluido exerce sobre a partícula é composta na realidade por duas forças opostas: uma que o fluxo de água exerce, no sentido do fluxo, sobre a seção transversal da partícula a ele exposta e outra, de resistência do fluido ao movimento da partícula, no sentido oposto ao do fluxo. A força resultante foi inicialmente calculada para partículas esféricas, assumindo-se que cada uma delas, em todo o seu perímetro, estivesse submetida a um mesmo tipo de escoamento (condições do regime laminar - Lei de Stokes). Como as partículas minerais apresentam diferentes formas, tornou-se necessário levar em consideração o fator de esfericidade, γ (equação 5).

No caso de partículas irregulares e placóides, não compactadas, irem repousar sobre uma superfície lisa, elas ficarão nas suas posições de maior estabilidade, implicando que a menor seção transversal fique exposta ao movimento do fluido. Isso faz com que a força resultante exercida pelo fluido sobre a partícula seja menor, resultando numa probabilidade menor destas partículas se deslocarem dando voltas sobre si mesmas (movimento de rolamento). Se o atrito entre as partículas e a superfície sobre a qual elas estão repousando for grande, elas também apresentarão uma grande resistência ao deslizamento. A partícula estando aderida à superfície, o fluxo de água ao passar sobre ela exercerá uma pressão que irá mantê-la ainda mais fixa à superfície. Portanto, fica evidenciado que a forma da partícula é um fator muito importante para os processos de separação realizados em superfícies sobre as quais há o escoamento de um fluido.

O tipo de movimento, deslizamento ou rolamento, que a partícula irá executar sobre uma superfície lisa e inclinada dependerá de vários fatores. Um deles é o ângulo de inclinação da superfície. Existe um valor, denominado ângulo crítico, abaixo do qual não ocorre o movimento de deslizamento.

Dependendo da forma da partícula em questão, embora não haja deslize, poderá ocorrer o movimento de rolamento. Considerando-se partículas com a forma de prismas, quanto maior o seu número de lados, menor será o seu coeficiente de atrito, o que implicará numa maior tendência ao rolamento. O tipo de movimento que partículas de mesma massa e diferentes formas irão executar dependerá do coeficiente de atrito e do ponto onde a força exercida pelo fluido está sendo aplicada sobre a partícula.

O valor do ângulo crítico é função da densidade e do tamanho da partícula, da espessura do filme de fluido e do coeficiente de atrito entre a partícula e a superfície.

O efeito combinado do plano inclinado com o da velocidade do fluxo será suficiente para manter todas as partículas movimentando-se sobre a superfície. O rearranjo entre elas, em resposta a este efeito combinado, no sentido do fluxo, será de partículas finas e pesadas, seguindo-se partículas grosseiras e pesadas com finas e leves e, por fim, partículas grosseiras e leves. Comparando-se partículas de mesma massa e de diferentes formas, o arranjo final, no sentido do fluxo, será dado por partículas placóides, seguidas das partículas cúbicas e, por último, estariam as arredondadas que por rolarem irão parar mais distante do ponto de descarga (LINS(1998)).



Na prática, quase todas as partículas estão em contato entre si, formando o leito de material. O ângulo de repouso de cada partícula sobre o leito vai depender dos espaços gerados entre as partículas, em relação aos seus tamanhos, que varia a cada momento em função do movimento que elas possuem. Também na prática, raramente são utilizadas superfícies lisas. Os vários obstáculos que são colocados na superfície variam desde texturas

rugosas até barras (*riffles*) que atravessam a direção do fluxo. Estes obstáculos tendem a imobilizar primeiramente as partículas mais pesadas, seguindo-se um misto com pesadas e leves e, por fim, as leves.

3.5. Teoria da energia potencial

A importância da energia potencial instantânea de uma polpa foi primeiramente estudada por Mayer, quando da sua aplicação ao processo de jigagem.

Considerando-se duas situações hipotéticas: a primeira sendo uma mistura binária perfeita, antes da estratificação, composta de partículas leves com peso G_1 e partículas pesadas com peso G_2 , com um único centro de gravidade, o da mistura, a uma altura que corresponde à metade da altura total do leito (h) e a segunda considerando uma estratificação perfeita, onde passarão a existir dois centros de gravidade (h_1 e h_2) correspondentes a cada um dos componentes da mistura. A energia gasta para a estratificação (ΔE) é dada por

$$\Delta E = \frac{1}{2} (G_2 h_1 - G_1 h_2) \quad (16)$$

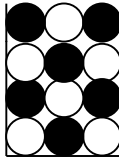
onde:

h_1 = altura total do leito constituído de partículas de peso G_1 (m); e

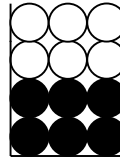
h_2 = altura total do leito constituído de partículas de peso G_2 (m).

Esta variação de energia é sempre positiva e resulta no rebaixamento do centro de gravidade do sistema. Mostra que o sistema de uma mistura binária homogênea é instável e que ele busca um estado mais estável ou seja, com menor energia potencial. A estratificação está por isso relacionada a uma redução de energia, sendo essa redução a causa física para que o processo ocorra.

Situação hipotética 1



Situação hipotética 2



3.6. Forças de cisalhamento

Quando uma polpa concentrada está sujeita a esforços de cisalhamento, uma força de dispersão atua entre as partículas como resultado da colisão entre elas, gerando pressões no plano de cisalhamento e no plano perpendicular a ele.

Esse fenômeno foi estudado primeiramente por BAGNOLD (1954) apud BURT (1984). O esforço de cisalhamento pode surgir de uma polpa fluindo sobre uma superfície inclinada ou ser produzido pelo movimento da superfície ou, ainda, pela combinação dos dois. A força (F_B), originada deste efeito, que atua na partícula é proporcional ao quadrado do seu raio. Assim, ela pode ser representada por

$$F_B = k r_p^2, \quad (17)$$

onde:

F_B = força de Bagnold (N);

k = constante; e

r_p = raio da partícula (m).

Considerando o plano de cisalhamento como sendo horizontal, no equilíbrio teremos que a força de Bagnold será igual à força gravitacional. Assim,

$$F_B = F_g = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \delta g, \quad (18)$$

onde:

F_g = força da gravidade (N);

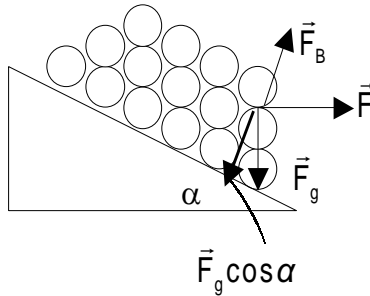
g = aceleração da gravidade (m/s^2); e

\bar{d} = densidade absoluta da partícula (t/m^3).

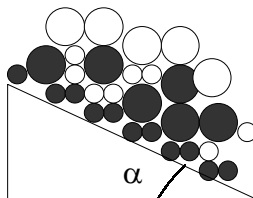
Quando a força de Bagnold exceder a força da gravidade, a partícula estará sujeita a uma força resultante (F_R) dada por

$$F_R = k_1 r_p^2 (1 - k_2 r_p \delta) , \quad (19)$$

onde k_1 e k_2 = constantes.



Para partículas de mesmo raio, quanto maior a densidade da partícula, menor a força resultante. Assim, teremos partículas grosseiras leves mais próximas da interface fluido/ar, seguindo-se as finas leves e as grosseiras pesadas e, na região próxima à superfície, as partículas finas pesadas, segundo a ilustração a seguir.



4. Principais equipamentos de concentração centrífuga

Os principais equipamentos de concentração centrífuga são os concentradores centrífugos Knelson e Falcon, ambos desenvolvidos no Canadá, que utilizam somente a força centrífuga como principal agente para a concentração de minerais pesados e outros dois, que combinam a força centrífuga com outras forças geradoras de movimentos: jigue Kelsey, desenvolvido na Austrália, que combina a centrifugação com o movimento de pulsação e o *Multi-Gravity Separator* (MGS) da Mozley, desenvolvido na Inglaterra, que combina a centrifugação com movimentos longitudinais semelhantes aos da mesa vibratória.

Esses equipamentos, segundo seus fabricantes, além de permitirem que se trabalhe numa faixa granulométrica mais fina, apresentam várias outras vantagens tais como circuito de concentração simplificado, alta capacidade unitária quando comparados com outros equipamentos para finos, custos operacionais e de manutenção relativamente baixos e facilidade no controle operacional.

4.1. Jigue Kelsey

O princípio de funcionamento do jigue centrífugo Kelsey baseia-se na combinação dos movimentos de pulsação dos jigues convencionais e na utilização da força centrífuga. O equipamento é composto de um jigue tipo Harz colocado sobre uma base giratória. Esta base, girando a alta velocidade, produz uma força centrífuga que atua sobre as partículas, permitindo a recuperação de partículas pesadas de menor diâmetro que nos jigues convencionais.

Simplificadamente, esse equipamento consiste de uma câmara onde é colocada, na sua parte superior, uma tela, e, em cima desta, um leito de material. A abertura da tela deverá ser

inferior ao menor tamanho de partícula que forma o leito. Este deve ser composto por um material com densidade intermediária à dos minerais leves e pesados que compõem o minério que está sendo beneficiado e com uma granulometria em torno de 1 mm (SANDVIK; REIN (1997)). Em relação à alimentação, o tamanho máximo das partículas deve ser de 200 mm, menor que a abertura da tela.

A polpa (20 a 60% de sólidos em peso) é alimentada sobre o leito. Com a câmara girando a velocidades de 30 a 45rpm é criado um campo centrífugo da ordem de 80 **g**, sendo **g** a aceleração da gravidade, forçando a distribuição da polpa de forma homogênea. Simultaneamente, um outro mecanismo realiza a pulsação do leito pela injeção de água na câmara mais interna. Esta pulsação permite que o leito se dilate e contraia segundo um ciclo pré-estabelecido, permitindo que as partículas pesadas, sob a ação da força centrífuga, atravessem o leito e possam ser então coletadas na parte lateral da câmara (Figura 1).

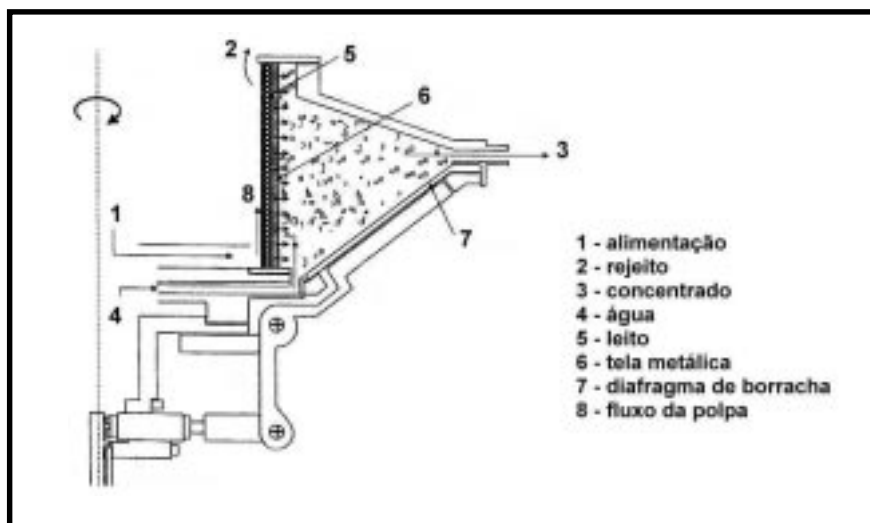


Figura 1: Desenho esquemático do jigge centrífugo Kelsey.

Fonte: BENIUK, V.G.; VADEIKIS, C.A.; ENRAGHT, J.N. (1994) Centrifugal Jigging of Gravity Concentrate and Tailing at Renison Limited.

Segundo SANDVIK; REIN (1997), um ponto importante no desempenho dos jigues, incluindo o jigue centrífugo, é a seleção das partículas que compõem o seu leito. Para separações onde a diferença de densidades entre o mineral de interesse e os de ganga é acentuada, a variedade de tipos de minerais que podem ser utilizados no leito é grande em função da maior faixa de densidades intermediárias. A capacidade do jigue é limitada pela quantidade de material pesado que atravessa a peneira do leito. De acordo com SANDVIK; REIN (1997), o modelo com maior capacidade pode operar com 2,2 t/h de alimentação para uma peneira com abertura de 300 mm, 2,8 t/h para 425 mm e 3,5t/h para 600 mm, podendo esses valores serem alterados em função do grau de dificuldade que o minério apresente para a sua concentração.

4.2. Concentrador centrífugo Falcon

O concentrador centrífugo Falcon é composto de um cone que gira a velocidades próximas de 450rpm, gerando uma intensidade do campo gravitacional de 300 **g**. Este concentrador consegue separar e recuperar partículas pesadas finas e ultrafinas e realiza uma concentração eficiente para faixas granulométricas entre 1,651 e 0,020mm (10 e 600malhas Tyler).

A polpa é alimentada pela parte central do fundo do cone (Figura 2). As partículas ficam sujeitas a uma aceleração devida ao movimento do rotor, formando a zona de dispersão. Imediatamente, a força centrífuga separa a polpa em dois componentes – água e sólidos. Estes são ejetados para a parede do cone onde formam uma camada de material. Devido à configuração do cone, os sólidos movem-se progressivamente para a sua parte superior. Durante este movimento, a camada vai diminuindo de espessura, com as partículas leves se soltando da camada, pelo movimento rápido do fluxo de água. As partículas leves retornam à polpa e constituem o rejeito. As partículas pesadas ficam retidas na parede interna do cone, sendo descarregadas na parte inferior de um cilindro que envolve o cone. O concentrador centrífugo Falcon é particularmente interessante nos casos em que se deseja obter uma pequena fração de material fino e pesado e um descarte expressivo da massa alimentada (SILVA et al.(1998)). Os parâmetros operacionais desse concentrador são a taxa de alimentação, percentagem de sólidos na alimentação e a granulometria do minério. A geometria do rotor é um fator crítico no desempenho do equipamento, devendo ser escolhida de acordo com as características do minério.

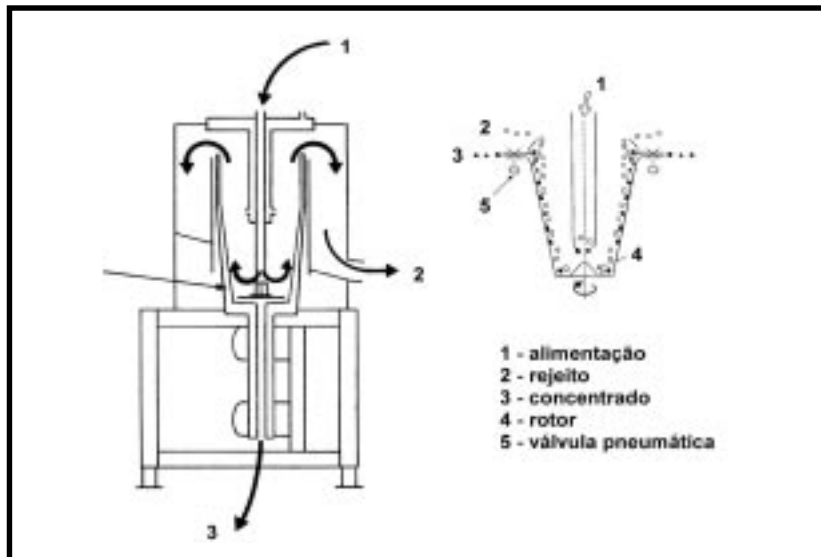


Figura 2: Desenho esquemático do concentrador centrífugo Falcon.

Fonte: Falcon Concentrators Incorporation (catálogo de equipamento).

4.3. Concentrador centrífugo Knelson

O concentrador centrífugo Knelson (Figura 3) também baseia-se no princípio da ação da força centrífuga, gerando um campo gravitacional da ordem de 60g.

Esse concentrador consiste de uma cesta cônica perfurada com anéis internos. A alimentação é introduzida sob a forma de polpa (20 a 30% de sólidos em peso) por um duto localizado na parte central da base da cesta. As partículas, ao atingirem a base do cone, são impulsionadas para a parede lateral pela ação da força centrífuga gerada pela rotação do cone. Forma-se um leito de volume constante nos anéis, os quais retêm as partículas pesadas, enquanto as partículas leves são expulsas do leito e arrastadas por cima dos anéis para a área de descarga de rejeitos, no topo do cone. A compactação do material do leito é evitada pela injeção de água através de furos nos anéis, sendo denominada

água de fluidização. Esta é alimentada a partir de uma camisa fixa externa ao cesto, fluidizando o leito de concentrado e permitindo assim que as partículas mais densas, mesmo finas, penetrem no leito sob a ação da força centrífuga.

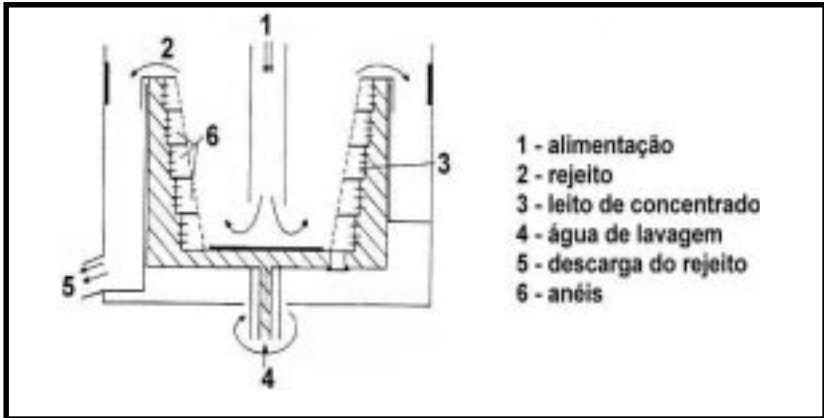


Figura 3: Desenho esquemático do concentrador centrífugo Knelson.

Fonte: Lins, F.F.; Costa, L.S.N.; Delgado, O.C., Gutierrez, J. M. A.(1992) Concentrador Centrífugo: Revisão e Aplicações Potenciais.

O concentrador Knelson é oferecido com sistema de descarga descontínua, sendo empregado, preferencialmente, para minérios com baixos teores de minerais úteis (da ordem de ppm). No caso de minérios com altos teores, a maior frequência de limpeza do cone compromete a capacidade de produção do equipamento.

Mais recentemente, a Knelson Concentrators desenvolveu um concentrador com descarga contínua denominado "*Centre Discharge*" ou "*CD model*", que pode ser encontrado em três diferentes tamanhos: 12" (30cm), 20" (50cm) e 30" (75cm).

Os parâmetros operacionais são a percentagem de sólidos na alimentação e a pressão de água de fluidização. A granulometria também é um parâmetro importante a ser considerado e o limite superior de tamanho de partículas é de 6mm, não havendo limite inferior especificado, de acordo com o fabricante.

4.4. Multi Gravity Separator - MGS

O MGS consiste de um tambor levemente afunilado na extremidade fechada, próxima à saída do rejeito, medindo 0,6m de comprimento e com diâmetro médio de 0,5m; gira no sentido horário com velocidades que variam entre 140 e 300 rpm, produzindo uma força centrífuga variando de 6 a 24 **g**. O tambor também é submetido a uma oscilação senoidal na direção axial com amplitude variável entre 12 e 25 mm e frequência entre 4 e 6cps (ciclos por segundo). Apresenta um conjunto de raspadores fixos dentro do tambor, que giram no mesmo sentido deste, porém com uma velocidade levemente mais alta.

A polpa é alimentada de forma contínua na parte central longitudinal do tambor e distribuída internamente através de um anel acelerador. A água de lavagem é adicionada próximo à extremidade aberta do tambor.

A Figura 4 apresenta um desenho esquemático do concentrador centrífugo Multi-Gravity Separator.

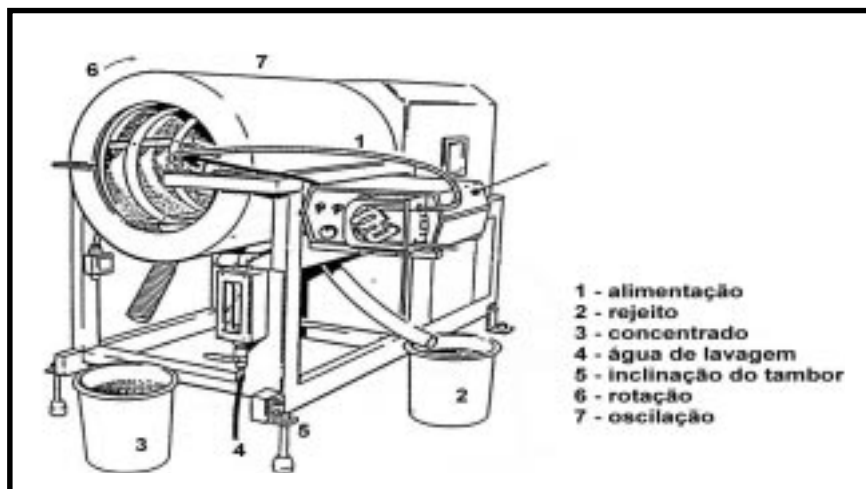


Figura 4: Desenho Esquemático do MGS (Mozley).

Fonte: Richard Mozley Limited (catálogo de equipamento).

A separação das partículas pesadas das leves ocorre pela ação da força centrífuga juntamente com o efeito de cisalhamento provocado pelo efeito oscilatório. As partículas pesadas afundam no campo centrífugo, formando uma camada compacta junto às paredes do tambor. Esta camada é transportada pelos raspadores até a extremidade aberta do tambor, sendo então descarregada na calha de concentrado. As partículas leves flutuam no campo centrífugo e são transportadas em contra-corrente pelo fluxo da água de lavagem até a outra extremidade do tambor e, então, descarregadas na calha de rejeito.

Os modelos disponíveis no mercado são o C-900 de um tambor e o C-902 de dois tambores. O C-900 é apresentado em dois tamanhos, um com capacidade para beneficiar 200kg/h de sólidos para uma percentagem de sólidos entre 20 e 50% em peso e outro, capaz de beneficiar 550kg/h para uma percentagem entre 30 e 50%. Já o C-902 possui capacidade para beneficiar até 5t/h de sólidos para uma percentagem de sólidos entre 30 e 50% em peso.

De acordo com TUCKER et al. (1991) as variáveis mais importantes que governam a operação são: velocidade de rotação; oscilação; ângulo de inclinação do tambor e água de lavagem.

5. Considerações gerais

A exceção do concentrador centrífugo Knelson, que é tipicamente um concentrador para minério de ouro (LINS, F.F.; COSTA et al. (1992)), os demais concentradores apresentados podem ser utilizados para concentrar diferentes tipos de finos de minérios. Algumas dessas aplicações são para finos de minério de estanho (SILVA, E.C.; TORRES, V.M.; SANTOS, N, A. (1998), CHAN et al. (1991)), de tântalo (BURT et al. (1995)), de cromo (BELARDI et al. (1995)), de ferro (CHAN et al. (1991)), de estrôncio (CHAN et al. (1991)), tungstênio (CLEMENTE, D. et al. (1993)), entre outros, e para carvão, visando a concentração de pirita (HONAKER, R.Q. et al. (1996)).

As aplicações desses concentradores centrífugos podem ser tanto em substituição a equipamentos tradicionais de concentração gravítica tais como mesas para finos, espirais e ciclones de meio denso, quanto como equipamentos complementares de algumas destas operações nos circuitos já existentes. Em ambas as alternativas apresentadas, os ganhos alcançados são bastante expressivos tanto em recuperação quanto em teor do mineral de interesse.

Cabe também mencionar que na literatura são apresentados alguns estudos comparativos entre os processos de concentração centrífuga e de flotação. Entre estes estudos, os resultados alcançados por SILVA, E.C.; TORRES, V.M.; SANTOS, N, A. (1998), com minério de Pitinga-AM visando a concentração de cassiterita, justificaram a indicação do processo de concentração centrífuga como uma alternativa à flotação e, em outros estudos, como um processo complementar.

6. Referências bibliográficas

- BAKSHI, A.K.; KAWATRA, S.K. (1996) Rapid determination of non-Newtonian flow behaviour in mineral suspensions. **Minerals and Metallurgical Processing**, v. 13, nº 4, p. 165-9, November.
- BENIUK, V. G.; VADEIKIS, C.A.; ENRAGHT, J.N. (1994) Centrifugal jiggling of gravity concentrate and tailing at Renison Limited, **Minerals Engineering** v. 7, nº 5-6, p. 577-89.
- BURT, R.O. (1984) Gravity concentration technology. Amsterdam: Elsevier.
- CHAVES, A.P. (1998) Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Editora Signus, v. 1, 235p.
- CLEMENTE, D.; NEWLING, P.; BOTELHO de SOUSA, A.; LeJEUNE, G.; BARBER, S.P.; TUCKER, P. (1993) Reprocessing Slimes Tailings from a Tungsten Mine, **Minerals Engineering** v. 7, nº 5-6, p. 831-89.
- CONCHA, F.; ALMENDRA, E.R. (1979) Settling velocities of particulate systems: 1. Settling velocities of individual spherical particles. **International Journal of Mineral Processing**, nº 5, p. 349-67.
- FIGUEIREDO, P.C.; CHAVES, A.P. (1998) Recuperação de partículas minerais finas e ultrafinas no âmbito da concentração gravítica. In: XVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, São Paulo, Brasil, p. 483-93, Agosto.
- GAUDIN, A. M. (1939) **Principles of Mineral Dressing**, McGraw-Hill Publishing Company Limited, várias paginações, 554 p.
- HONAKER, R. Q.; WANG, D.; HO, K. (1996) Application of the Falcon Concentrator for Fine Coal Cleaning, **Minerals Engineering** v.9, nº 11, p. 1143-1156.

- KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J. (1982) **Introduction to Mineral Processing**, John Wiley & Sons Limited, (várias paginações), 491p.
- LINS, F.F.; (1998) Concentração Gravítica. In: **Tratamento de Minérios**, CETEM/CNPq, capítulo 6, p. 261-94.
- LINS, F.F.; COSTA, L.S.N.; DELGADO, O.C.; GUTIERREZ, J.M.A. (1992) Concentrador Centrífugo: Revisão e Aplicações Potenciais. Série Tecnologia Mineral, nº 55, p. 32.
- NAPIER-MUNN, T.J. (1990) The effect of dense medium viscosity on separation efficiency. **Coal preparation**, v. 8, p. 145-65.
- PLITT, L.R. (1991) A mathematical model of the gravity classifier. In: XVII International Mineral Processing Congress, Dresden, v. 1, p. 123-35.
- SANDVIK, K.; REIN, A. (1997) Gravity separation of bulk products in centrifugal fields. In: Proceedings of the XX IMPC, Aachen, Alemanha, p. 599-610, September.
- SHI, F. N.; NAPIER-MUNN, T.J. (1996) A model for slurry rheology. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, nº 1-2, p. 103-23.
- SILVA, E.C.; TORRES, V.M.; SANTOS, N. A . (1998) Concentradores centrífugos – Uma nova era na concentração gravítica. In: XVII Encontro de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, São Paulo, v. 1, p. 533-51.
- SIVAMOHAN, R. (1990) The problem of recovering very fine particles in mineral processing - a review. **International Journal of Mineral Processing**, v. 28, nº 3-4, p. 247-88.
- SZTABA, K. (1994) The problems of flow classification of very fine grained material. In: IV Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology, Concepción, Chile, p. 135-45.
- SZTABA, K. (1997) The problems of flow classification of very fine grained material. In: 5th Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology, Buenos Aires, Argentina, p. 13-6.

TAGGART, A . F. (1945) **Handbook of mineral dressing**.
New York: John Wiley, 1982.

TUCKER, P.; CHAN, S.K.; MOZLEY, R.H.; CHILDS, G.J.C.
(1991) Modelling the multi-gravity separator. In:
XVII International Mineral Processing Congress,
Dresden, Alemanha, p. 77-90.