

CONCENTRADOR CENTRÍFUGO: REVISÃO E APLICAÇÕES POTENCIAIS

55

*FERNANDO FREITAS LINS
LAURO S. NORBERT COSTA
OSCAR CUÉLLAR DELGADO
JORGE M. ALVARES GUTIERREZ*

CONCENTRADOR CENTRÍFUGO:
REVISÃO E APLICAÇÕES POTENCIAIS

PRESIDENTE DA REPÚBLICA
Fernando Collor de Melo

SECRETÁRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Hélio Jaguaribe de Mattos

PRESIDENTE DO CNPq
Marcos Luiz dos Mares Guia

DIRETOR DE UNIDADES DE PESQUISA
Lindolpho de Carvalho Dias

DIRETOR DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO
Jorge Almeida Guimarães

DIRETOR DE PROGRAMAS
Ivan Moura Campos

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

DIRETOR
Roberto C. Villas Bôas

VICE-DIRETOR
Peter Rudolf Seidl

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS - DTM
Adão Benvindo da Luz

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRATIVA - DME
Juliano Peres Barbosa

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE QUÍMICA INSTRUMENTAL - DQI
Roberto Rodrigues Coelho

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ESTUDOS E DESENVOLVIMENTO - DES
Ana Maria B. M. da Cunha

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO - DAD
Clarice Dora Gandelman

Fernando Freitas Lins (1)
Lauro S. Norbert Costa (2)
Oscar Cuéllar Delgado (3)
Jorge M. Alvares Gutierrez (4)

- (1) Eng^o Metalúrgico, M.Sc., Doutorando da COPPE/UFRJ, Pesquisador do CETEM/CNPq
- (2) Eng^o Metalúrgico, Mestrando da COPPE/UFRJ, CETEM/CNPq
- (3) Eng^o Metalúrgico, D.Sc., Prof. da COPPE/UFRJ
- (4) Eng^o Metalúrgico, CETEM/CNPq



CONCENTRADOR CENTRÍFUGO:
REVISÃO E APLICAÇÕES POTENCIAIS CETEM/CNPq
SÉRIE TECOLOGIA MINERAL

FICHA TÉCNICA

COORDENAÇÃO EDITORIAL
Francisco R. C. Fernandes

REVISÃO
Dayse Lúcia M. Lima

EDITORACÃO ELETRÔNICA

Fátima Mello

ILUSTRAÇÃO
Jacinto Frangella

Pedidos ao:
CETEM - Centro de Tecnologia Mineral
Departamento de Estudos e Desenvolvimento - DES
Rua 4 - Quadra D - Cidade Universitária - Ilha do Fundão
21949 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil
Fone: (021) 260-7222 - Ramal: 218 (BIBLIOTECA)

Solicita-se permuta.
We ask for change.

Concentrador centrífugo: revisão e aplicações potenciais /
Por Fernando Antonio Freitas Lins [et al.]. - Rio de Janeiro:
CETEM/CNPq, 1992.

32p. - (Série Tecnologia Mineral;55)

1. Concentradores (Beneficiamento de minério). 2. Concentração gravimétrica. I. Lins, Fernando Antonio Freitas. II. Centro de Tecnologia Mineral. III. Série.

ISBN 857227-026-4
ISSN 0103-7382

CDD 622.751

**TECNOLOGIA
MINERAL**

CONCENTRADOR CENTRÍFUGO: REVISÃO E APLICAÇÕES POTENCIAIS

55

**FERNANDO FREITAS LINS
LAURO S. NORBERT COSTA
OSCAR CUÉLLAR DELGADO
JORGE M. ALVARES GUTIERREZ**



CETEM

APRESENTAÇÃO

O Boletim Avulso nº 1, do Departamento Nacional de Produção Mineral, impresso em 1936, ainda quando este Departamento pertencia ao Ministério da Agricultura, intitula-se “Informações sobre Aparelhos e Dispositivos para Extração de Ouro de Aluvião”. Seu autor, nada mais, nada menos que Djalma Guimarães, ilustre e emérito professor e pesquisador da minero-metalurgia brasileira, andou percorrendo sobre todos os dispositivos conhecidos, até então, para a retirada do ouro contido em jazidas secundárias. Interessante é reproduzir seu primeiro parágrafo:

“Grande número de dispositivos e pequenas instalações têm sido patenteados e construídos para extração de ouro de cascalhos e outros materiais alluvionários e eluviaes. Só nos Estados Unidos foram concedidas mais de oito mil patentes para este fim. Como, entre nós, a impressão dominante é que se pode conseguir a construção de aparelhos por assim dizer ‘universaes’ ou melhor, que retirem o ouro contido em qualquer material alluvionário, convém apontar as dificuldades que podem surgir na aplicação de tais maravilhas.”

As centrífugas, para a concentração de ouro, não existiam naquela época; entretanto, se encaixam nas ‘taes maravilhas’ apontadas pelo Prof. Djalma Guimarães.

É, pois, para que possamos conhecer melhor as “especificações de uso”, bem como suas aplicações e linhas, que o CETEM vem abordando o emprego de centrífugas na concentração de minérios aluvionares.

Rio de Janeiro, 31 de maio de 1992

ROBERTO C. VILLAS BÔAS

RESUMO

O tratamento gravítico de minerais finos teve um avanço promissor com o surgimento de concentradores centrífugos, particularmente para a recuperação de ouro fino. Este trabalho faz uma revisão do desenvolvimento dos concentradores centrífugos, os tipos comercializados e as aplicações potenciais desses equipamentos.

ABSTRACT

The gravity treatment of fine minerals has experienced a promising advance with the introduction of centrifugal concentrators in the market, particularly to recover fine gold. This paper is concerned with a review of the centrifugal concentrators and their potential applications.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Recuperação de Finos e Superfinos	2
2.2 Critério e Eficiência de Concentração Gravítica	4
2.3 Ação da Força Centrífuga na Concentração	6
2.4 Revisão dos Equipamentos de Concentração Centrífuga e sua Evolução	12
3. APLICAÇÕES ATUAIS E POTENCIAIS	26
4. ESTUDOS EM ANDAMENTO	29
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

A utilização de concentradores centrífugos para o beneficiamento de minérios auríferos foi uma novidade tecnológica introduzida na década de 80 no Ocidente. Empregados inicialmente com minérios aluvionares, posteriormente tiveram sua aplicação estendida a minérios primários. A versatilidade desses concentradores centrífugos inclui:

- (i) capacidade variável - modelos de uma a quarenta toneladas por hora de sólidos;
- (ii) percentagem de sólidos em peso da alimentação - de vinte a quarenta;
- (iii) alta razão de concentração ou enriquecimento - mais de mil vezes;
- (iv) maior possibilidade de recuperação de finos, se comparados com equipamentos convencionais de concentração gravítica.

Tais características, associadas ao custo relativamente baixo de operação e de manutenção, podem explicar a larga disseminação desse tipo de concentrador na indústria mineral, no Brasil (inclusive em alguns garimpos) e no exterior.

Este trabalho objetiva mostrar os princípios de operação e os tipos de concentradores centrífugos e sua aplicação, ressaltando suas vantagens frente a outros equipamentos de concentração gravítica e colocando em perspectiva outras aplicações potenciais, como a recuperação de mercúrio em áreas contaminadas e a recuperação de finos de minerais de alta densidade (cassiterita, scheelita etc.) de rejeitos de usinas de beneficiamento. Apresenta-se também a programação dirigida ao estudo do concentrador centrífugo, considerado pelos autores como o mais promissor equipamento gravítico para a recuperação de finos desenvolvido nos últimos anos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Recuperação de Finos e Superfinos

O tratamento das frações finas de minérios apresenta-se, geralmente, como um desafio aos técnicos e pesquisadores que lidam na área de beneficiamento de minérios (1, 2). Em revisão recente, Sivamohan (1) expôs os problemas relevantes para o processamento de minerais finos e superfinos, com ênfase nos processos baseados em fenômenos superficiais. A Figura 1, mostra os processos aplicáveis a essas frações finas. Na opinião do autor (1), a concentração gravítica e a concentração magnética – em particular sistemas supercondutores e de alta intensidade/gradiente de campo magnético – podem ser processos tão adequados à recuperação seletiva de superfinos quanto aqueles baseados em fenômenos superficiais, podendo inclusive, em certas circunstâncias, serem melhores ou mais convenientes. Vale mencionar também as experiências bem sucedidas (3) de aumentar a eficiência de separação gravítica pelo emprego da força magnética, ou seja, a utilização de um equipamento gravítico convencional com magnetos.

Observam-se na Figura 1, no vértice direito, os métodos de concentração gravítica aplicáveis à recuperação seletiva de superfinos. O hidrociclone concentrador tem como desvantagem sua baixa razão de concentração ou enriquecimento, geralmente menos de 5, limitando sua aplicação a etapas de pré-concentração. Nos equipamentos Mozley a concentração ocorre em películas finas de polpa, implicando em equipamentos de capacidade baixa; além disso são relativamente caros, o que explica sua pouca disseminação no mundo e aplicação restrita a poucos empreendimentos mineiros, principalmente na Inglaterra, país onde foi desenvolvido e é fabricado. O terceiro método gravítico é a concentração em campo centrífugo, objeto da revisão do presente trabalho.

MÉTODOS BASEADOS NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS

Flotação por espuma

Agregação por agitação ("shear flocculation")

Flotação por transportador ("carrier flotation")

Flotação em coluna

Floculação com polímeros

Métodos empregando óleos

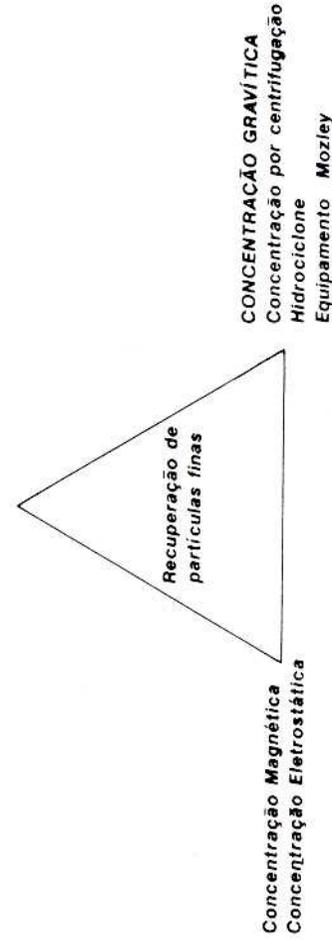


FIG.1 - FORMAS POSSÍVEIS DE RECUPERAR PARTÍCULAS FINAS
(Fuerstenau, 1986; ref.1)

Neste método, a aceleração da gravidade é substancialmente aumentada pela ação da aceleração centrífuga, possibilitando ampliar o campo de aplicação da concentração de minerais baseada na diferença de densidade.

2.2 - Critério e Eficiência de Concentração Gravítica

O critério de concentração (CC) é usado em uma primeira aproximação e fornece uma idéia da facilidade de se obter uma separação entre minerais através de processos gravíticos, desconsiderando o fator de forma das partículas minerais. O critério de concentração – originalmente sugerido por Taggart (4), com base na experiência industrial – aplicado à separação de dois minerais em água é definido como segue:

$$CC = (\rho_p - 1)/(\rho_\ell - 1)$$

onde ρ_p é a densidade do mineral pesado e ρ_ℓ a do mineral leve, considerando-se a densidade da água igual a 1,0.

Para o par wolframita e quartzo, por exemplo, a relação acima assume os valores:

$$CC = (7,5 - 1)/(2,65 - 1) = 3,94$$

A Tabela 1 mostra a relação entre o critério de concentração e a facilidade de se fazer uma separação gravítica (4).

Tabela 1 - Significado do critério de concentração (CC)

CC	Significado
> 2,5	Separação eficiente até 200 malhas
2,5 - 1,75	Separação eficiente até 100 malhas
1,75 - 1,50	Separação possível até 10 malhas, porém difícil
1,50 - 1,20	Separação possível até 1/4", porém difícil

Segundo Burt (5), para incluir o efeito das formas das partículas a serem separadas, o critério de concentração deve ser multiplicado por um fator de razão de forma (FRF). Este fator é o quociente entre os fatores de sedimentação (FS) dos minerais pesados (p) e leves (ℓ). O fator de sedimentação para um mineral é definido como a razão das velocidades terminais (v) de duas partículas do mesmo mineral, de mesmo tamanho, mas de formas diferentes; a primeira partícula sendo aquela para a qual se deseja calcular o fator de sedimentação (FS), e a segunda partícula uma esfera. De acordo com Burt, o critério de concentração (CC) pode ser muito útil se a forma das partículas for considerada; caso contrário, surpresas desagradáveis quanto à eficiência do processo podem se verificar na prática. As equações abaixo redefinem o critério de concentração, segundo a sugestão de Burt (5):

$$CC = [(\rho_p - 1)/(\rho_\ell - 1)] \cdot FRF$$

$$FRF = FS_p / FS_\ell$$

$$FS_p = v_p / v_{p(esf.)} \quad FS_\ell = v_\ell / v_{\ell(esf.)}$$

De qualquer modo, a Tabela 1 indica a dificuldade de se alcançar uma separação eficiente quando tratando frações abaixo de 200 malhas ($74 \mu\text{m}$). Aquele critério de concentração, no entanto, foi sugerido com base em equipamentos que operam sob a gravidade; a introdução da força centrífuga amplia a possibilidade de uma separação eficiente com materiais finos e superfinos. A Figura 2 ilustra as faixas granulométricas nas quais os equipamentos gravíticos são geralmente empregados (5), indicando a maior adequação do concentrador centrífugo para o tratamento de frações mais finas.

2.3 - Ação da Força Centrífuga na Concentração

O uso da força centrífuga para aumentar a velocidade de sedimentação de partículas tem sido aplicado com sucesso, há muitos anos, para a classificação (centrífuga de sedimentação e hidrociclone) e filtragem (centrífuga de filtração). O uso da força centrífuga para melhorar a eficiência da concentração gravítica de finos seria, de modo análogo, teoricamente possível, e foi naturalmente motivado pela perda elevada de valores minerais associados às frações finas. Separadores centrífugos foram desenvolvidos na União Soviética nos anos 50 e também foram empregados comercialmente na China por vinte anos (5) para tratamento de rejeitos de minérios de estanho e tungstênio. Só depois foi dada maior atenção ao potencial desses equipamento no Ocidente (5).

Do ponto de vista de pesquisa mais fundamental, Burt (5) faz referência ao trabalho de Ferrara (6), nos anos 60, que, segundo Burt, deve ter servido de base para as unidades comerciais posteriormente desenvolvidas. Um trabalho mais recente de Han e Say (2) fez uso de pequena centrífuga de laboratório, na qual, utilizando misturas sintéticas de cassiterita e quartzo entre 5 e $1 \mu\text{m}$, obtiveram separação praticamente completa entre os dois minerais.

De modo geral, são mais freqüentes publicações que descrevem o *modus operandi* dos equipamentos e seus desempenhos (5,7-10), não raro de autoria dos próprios fabricantes.

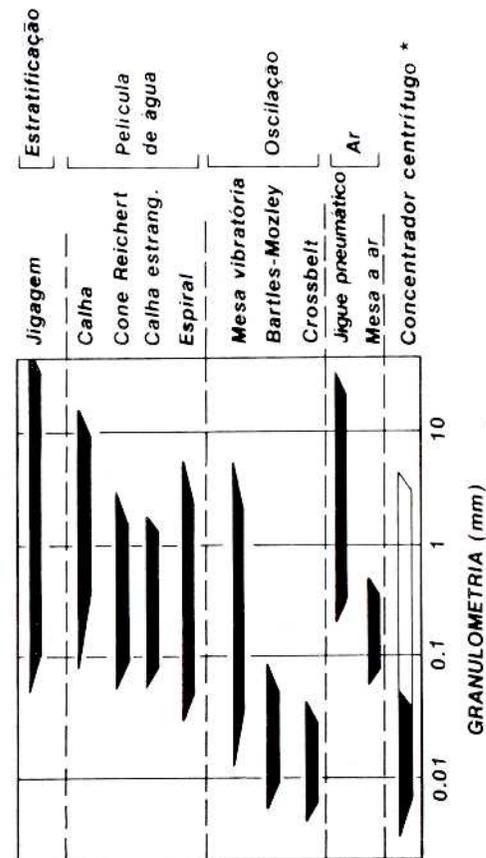


FIG.2 - FAIXA OPERACIONAL DOS EQUIPAMENTOS DE CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA (ref.5)

* O limite superior de alimentação pode ser até 6 mm

A ação da força centrífuga sobre as partículas minerais inicia-se quando a polpa é alimentada no equipamento e é levada à velocidade rotacional da centrífuga, formando-se, em consequência, um campo centrífugo que age sobre as partículas minerais constituintes da polpa. A força centrífuga (F_c) atuante sobre uma partícula na parede do cone ou cesta é dada por:

$$F_c = M \omega^2 R = M a_c$$

onde M é a massa da partícula, ω a velocidade angular da centrífuga e R é o raio do cone (no Sistema Internacional de Unidades, M em kg, ω em rad/s e R em m). Vê-se que na equação anterior o termo $\omega^2 R$ corresponde à aceleração centrífuga (a_c). Relacionando com a força de gravidade, $F_g = Mg$, onde g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), temos:

$$F_c/F_g = Ma_c/Mg = a_c/g = \omega^2 R/g$$

Portanto, quando uma partícula é acelerada em uma centrífuga, a razão entre a força centrífuga e a força normal de gravidade (ou suas acelerações) pode ser aumentada inúmeras vezes, em dependência da velocidade de rotação e do raio da centrífuga.

A título de exemplo, um concentrador centrífugo com uma cesta de 12" de diâmetro operando a 600rpm apresentaria uma força centrífuga de :

$$F_c = M \left(\frac{600}{60} \cdot 2\pi \right)^2 0,152 = 600 M = 60 (10M) \simeq 60 F_g$$

ou seja, equivalente a 60 vezes a força de gravidade normal (F_g)

A Figura 3 ilustra a força que age sobre partículas de diferentes densidades sob a influência de forças de aceleração variável (7). O gráfico mostra claramente a relação entre as diferentes forças agindo

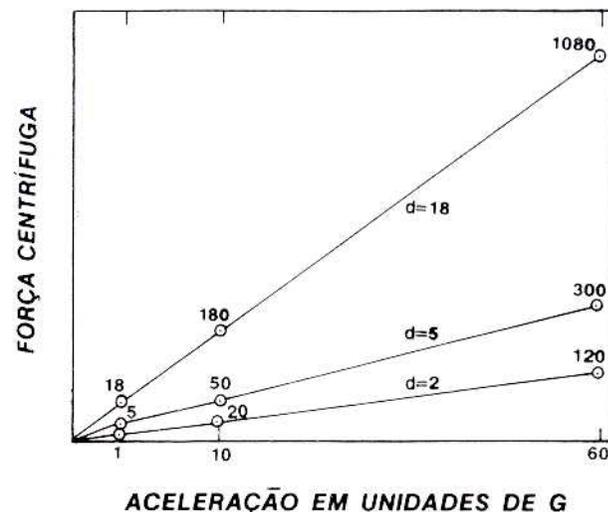


FIG.3 - FORÇA CENTRÍFUGA X ACELERAÇÃO PARA TRÊS MINERAIS DIFERENTES

(G =aceleração gravidade; d =densidade: ouro~18, "black sands"~5, ganga~2; para cada mineral a massa é cte; os três tipos de minerais com o mesmo tamanho).

sobre partículas de iguais tamanhos e densidades diferentes (i.e., iguais volumes e massas diversas) com o aumento da aceleração.

Por exemplo, a diferença de força centrífuga atuante sobre uma partícula de ouro com o mesmo tamanho de uma partícula de ganga é determinada pela diferença (fixa) entre as densidades dos minerais e pela aceleração. Assim, de uma aceleração de 10g para 60g, o diferencial entre as forças centrífugas do par de partículas é incrementado 6 vezes. (Esse diferencial deve se manifestar tanto nas velocidades radiais das partículas a caminho da parede do cone, como nos movimentos intersticiais através do leito dos anéis.).

Por um raciocínio análogo, a mesma força age sobre partículas de diferentes densidades e diferentes volumes, mas de idênticas massas. Para o caso de ouro e uma ganga quartzosa, a relação de volume para uma mesma massa, i.e., mesma força centrífuga, é dada pela relação inversa entre as densidades:

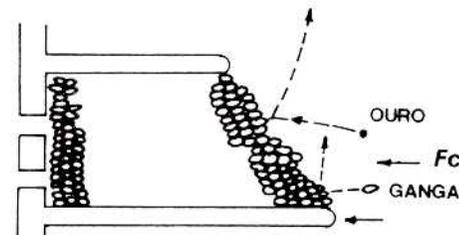
$$V_{Au}/V_{Quartzo} = 2,65/19,3 = 0,137$$

o que equivale a dizer que a mesma força que age sobre uma determinada partícula de quartzo atua sobre uma partícula de ouro com 13,7% do volume da partícula de ganga.

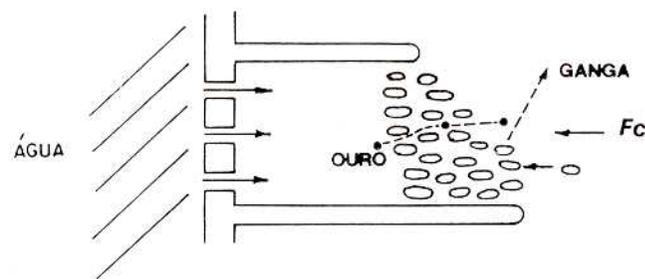
Em razão da água de contrapressão que fluidiza o leito (os anéis) da centrífuga tipo Knelson (a mais usada e descrita com mais detalhes adiante), a pequena partícula de ouro pode penetrar nos espaços intersticiais do leito formado, enquanto a partícula de ganga grosseira, não encontrando espaço para se fixar, é levada pelo fluxo de polpa ascendente até sair no rejeito (Figura 4).

(A) LEITO NÃO FLUIDIZADO

AUSÊNCIA DE ÁGUA DE CONTRAPRESSÃO



B) LEITO FLUIDIZADO



Fc = FORÇA CENTRÍFUGA

FIG.4 - REPRESENTAÇÃO DO LEITO DE CONCENTRADO (CONCENTRADORES CENTRÍFUGOS TIPO KNELSON)

2.4 -Revisão dos Equipamentos de Concentração Centrífuga e sua Evolução

Concentrador Centrífugo tipo Knelson

A década passada presenciou o aparecimento de uma série de equipamentos de beneficiamento mineral utilizando a força centrífuga para efetuar a separação dos minerais valiosos.

O mais conhecido deles foi a centrífuga Knelson (desenvolvida em 1982 pelo engenheiro Byron Knelson), que em pouco tempo obteve larga aceitação na indústria mineral, embora como desvantagem apresente o fato de trabalhar em regime descontínuo. Os equipamentos Metquip, australiano, e Famag, Hidro Jet e Mineraltec, brasileiros, são semelhantes à centrífuga Knelson e atendem basicamente aos respectivos mercados locais (a centrífuga Knelson tem representação e fabricação no Brasil).

Os equipamentos acima diferenciam-se pelos materiais utilizados na sua fabricação, associados à conseqüente vida útil dos componentes e naturalmente aos preços e por detalhes de confecção. O princípio operacional deles é, no entanto, idêntico.

O equipamento consiste de uma cesta cônica perfurada com anéis ou ripas internas e que gira em alta velocidade. A alimentação, que deve ser preferencialmente bitolada a menos 1/4" ,é introduzida sob forma de polpa (20-40% de sólidos em peso) por um conduto localizado na parte central da base da cesta. As partículas, ao atingirem a base do cone, são impulsionadas para as paredes laterais pela ação da força centrífuga gerada pela rotação do cone. Forma-se um leito de volume constante nos anéis, os quais retêm as partículas mais pesadas à medida que as mais leves são expulsas do leito e arrastadas por cima dos anéis para a área de descarga de rejeitos no topo do cone.

Há uma variação do campo centrífugo com a altura da cesta. Assim, nos anéis inferiores, há uma tendência a se recuperar as

partículas maiores do mineral de maior densidade, enquanto nos anéis superiores, onde o raio da cesta é maior (i.e., maior força centrífuga), os minerais mais finos ainda podem ser recuperados.

Consegue-se evitar a compactação do material do leito pela injeção de água através de furos nos anéis. A água é alimentada a partir de uma camisa d'água fixa externa à cesta. Esta água fluidiza o leito de concentrado permitindo que as partículas mais densas, mesmo finas, penetrem no leito sob a ação da força centrífuga, várias vezes superior à força da gravidade.

A Figura 5 ilustra o funcionamento básico desses concentradores, enquanto a já mencionada Figura 4 apresenta o efeito da água de fluidização.

No final de um período de operação (em torno de 8-10 horas) o concentrado que fica entre os anéis é coletado, após desligar-se o concentrador, e pode ser retirado por um dreno no fundo do cone.

Os parâmetros operacionais usualmente mais manipulados são a percentagem de sólidos na alimentação e a pressão de água de fluidização. O tempo de operação contínua é um parâmetro a ser estudado, considerando-se o tempo ótimo aquele que antecede uma elevação do teor do metal/mineral valioso nos rejeitos. A granulometria do minério também é um fator importante a ser considerado; o limite superior é de 6mm, não havendo limite inferior especificado (de acordo com os fabricantes). A vazão mássica obviamente também deve ser levada em conta.

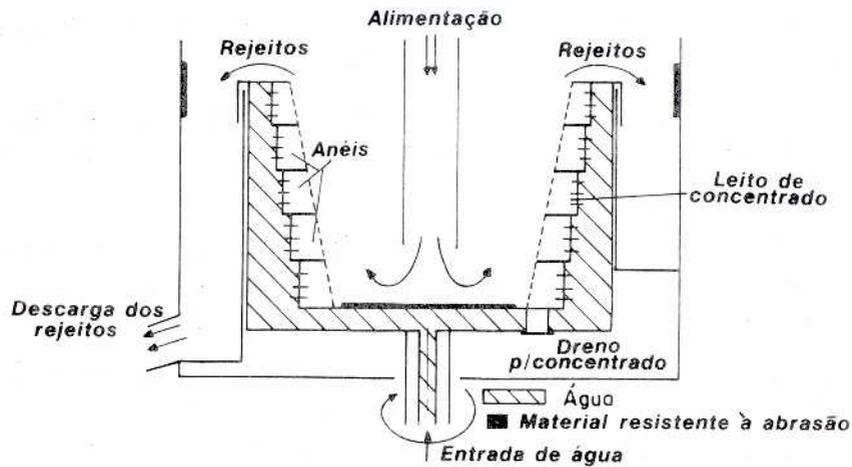


FIG.5 - SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM CONCENTRADOR KNELSON

É interessante agora fazer um retrospecto da evolução do concentrador Knelson, segundo seu próprio inventor (8). A centrífuga Knelson sofreu várias alterações até atingir o estágio de desenvolvimento atual. Pode ser visto que a parte do equipamento que mais foi aprimorada com o passar dos anos foi a cesta giratória. O modelo Knelson original, como é mostrado na Figura 6, apresentava uma cesta interna com inclinação de 30° em relação à vertical, anéis (ripas) de 50 mm de profundidade espaçados de 50mm, furos de água para fluidização radiais em relação aos anéis e camisa de água de formato cilíndrico. Em razão da variação na espessura de material em cada anel (ver detalhe da Figura 6), era muito difícil obter fluidização uniforme em todos eles.

O segundo modelo, com vistas a eliminar os problemas acima mencionados, tinha cesta interna cilíndrica e a profundidade dos anéis aumentava do topo para o fundo. Também esse modelo apresentou problemas para fluidização homogênea, em especial nos anéis no fundo da cesta. A Figura 7 ilustra esta solução intermediária, que logo foi descartada.

O terceiro modelo, apresentado na Figura 8, já apresentou diversos avanços em relação aos modelos precedentes. Pode-se ver claramente a cesta interna com os anéis em degraus, e com a mesma profundidade, a camisa de água em forma cônica e os furos para a água de fluidização são tangenciais, não mais radiais em relação aos anéis. Além disso, a água de fluidização é injetada em sentido oposto ao da rotação da cesta. Com esse modelo obtinha-se fluidização uniforme das partículas entre os anéis, mais capacidade de capturar partículas densas e limpeza mais fácil do concentrado ao término da operação. No entanto, foi verificada, com esse perfil quadrado dos anéis, a ocorrência de zonas mortas (estáticas) devido a áreas de não turbulência no interior dos anéis (Figura 9).

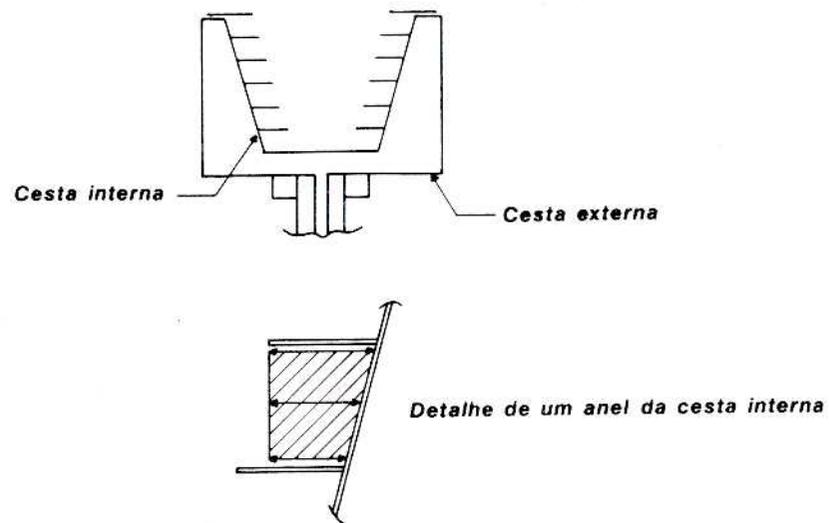


FIG.6 - PRIMEIRO PROJETO DA CESTA (CONCENTRADOR KNELSON)

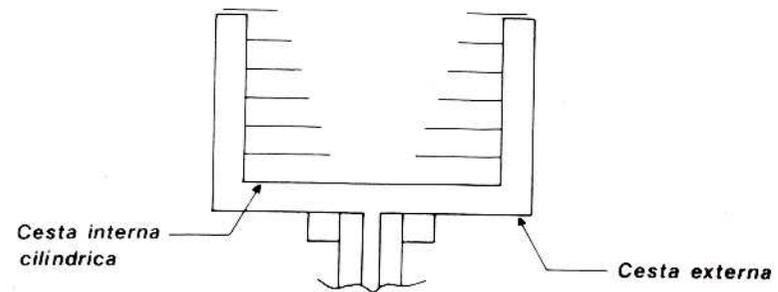


FIG.7 - SEGUNDO PROJETO DA CESTA (CONCENTRADOR KNELSON)

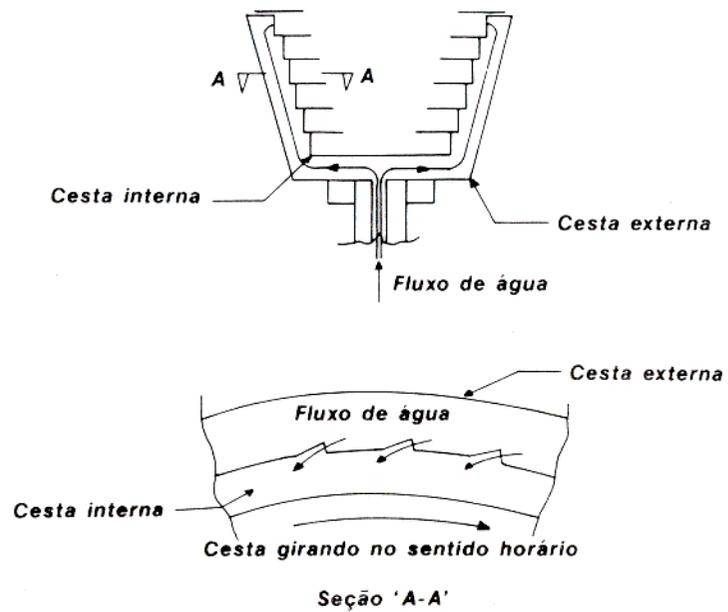


FIG.8 - TERCEIRO PROJETO DA CESTA (CONCENTRADOR KNELSON)

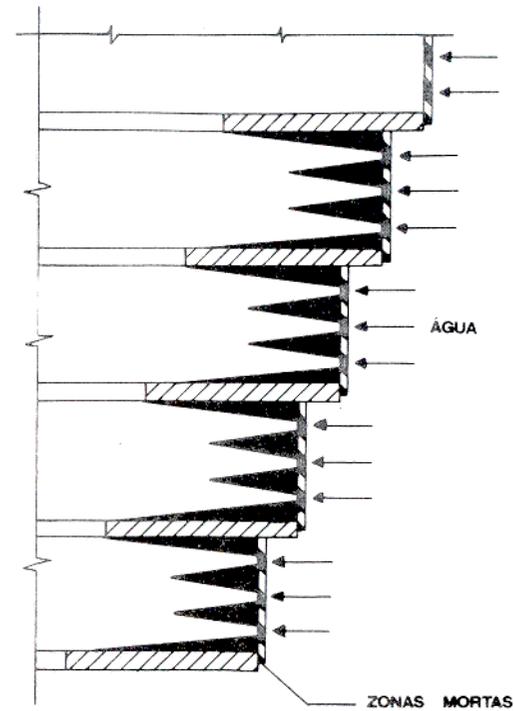


FIG.9 - PERFIL DA CESTA DO TERCEIRO PROJETO COM AS ZONAS DE NÃO TURBULÊNCIA (CONC. KNELSON)

Os últimos refinamentos consistiram de um novo desenho do perfil dos anéis, de modo a eliminar as zonas mortas, e o uso de poliuretano moldado na confecção da cesta interna, com a obtenção de melhores resultados na concentração, melhor fluidização e maior durabilidade do equipamento. (Vale dizer que a camisa de água é feita de aço inoxidável.) A Figura 10 ilustra o quarto e atual desenho do perfil da cesta.

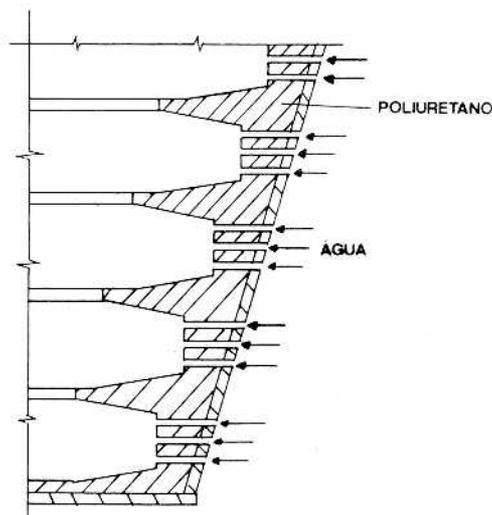


FIG.10 - PERFIL DA CESTA DO QUARTO PROJETO (CONC. KNELSON)

Falcon

Este equipamento, também de origem canadense, apresenta diferença em relação ao sistema Knelson, principalmente no que diz respeito à velocidade de rotação e à ausência de leito fluidizado. Nesse concentrador, o campo centrífugo é cerca de 5 vezes maior que o do concentrador Knelson (i.e., $\sim 300F_g$) e não há água de contrapressão, ou seja, o leito na parede não é mantido fluidizado. Esse equipamento já está sendo fabricado com modelos de capacidade industrial (9,10).

O Falcon consiste de uma cesta cilindro-cônica sem anéis e sem furos (pois não emprega água de contrapressão) que gira a alta velocidade no interior de uma camisa fixa externa cuja função é coletar o rejeito. A Figura 11 ilustra seu funcionamento. A polpa é alimentada no fundo do cone. O detalhe na figura apresenta a forma de separação: a polpa é acelerada e vai se estratificando à medida em que ascende no rotor; o mineral denso migra para a saída e é retido contra a parede do rotor; os minerais leves passam por sobre o mineral denso retido e são descarregados como rejeitos. A retirada do concentrado é obtida por lavagem do material acumulado nas paredes, que é descarregado pelo fundo após a parada do aparelho, caracterizando também uma operação intermitente. O limite superior de tamanho de alimentação é de 10 malhas.

No caso do concentrador Falcon, os parâmetros operacionais são a percentagem de sólidos na alimentação, granulometria do minério e o tempo de operação. A geometria do rotor é um fator crítico no desempenho do equipamento; dependendo do tipo de minério (com maior ou menor densidade, por exemplo), haveria um rotor com geometria apropriada (10).

Ourocone

Este concentrador centrífugo, desenvolvido e fabricado no Brasil (pela Fabrimaq), caracteriza-se por obter uma fluidização nos anéis por meio mecânico, através de aletas que revolvem continuamente o leito de minerais depositado. Como a velocidade de rotação da centrífuga é baixa (~ 50 rpm), sua aptidão para recuperar finos deve ser menor que a dos concentradores descritos anteriormente. Sua operação também é semicontínua. Esse equipamento é empregado na recuperação de ouro dos rejeitos da concentração magnética do minério de itabirito da CVRD, em Itabira-MG.

Na Tabela 2 são apresentadas as características principais dos equipamentos de concentração centrífuga, com base nas informações contidas nos catálogos e prospectos de divulgação dos fabricantes. Os dados calculados ou estimados são indicados entre parênteses.

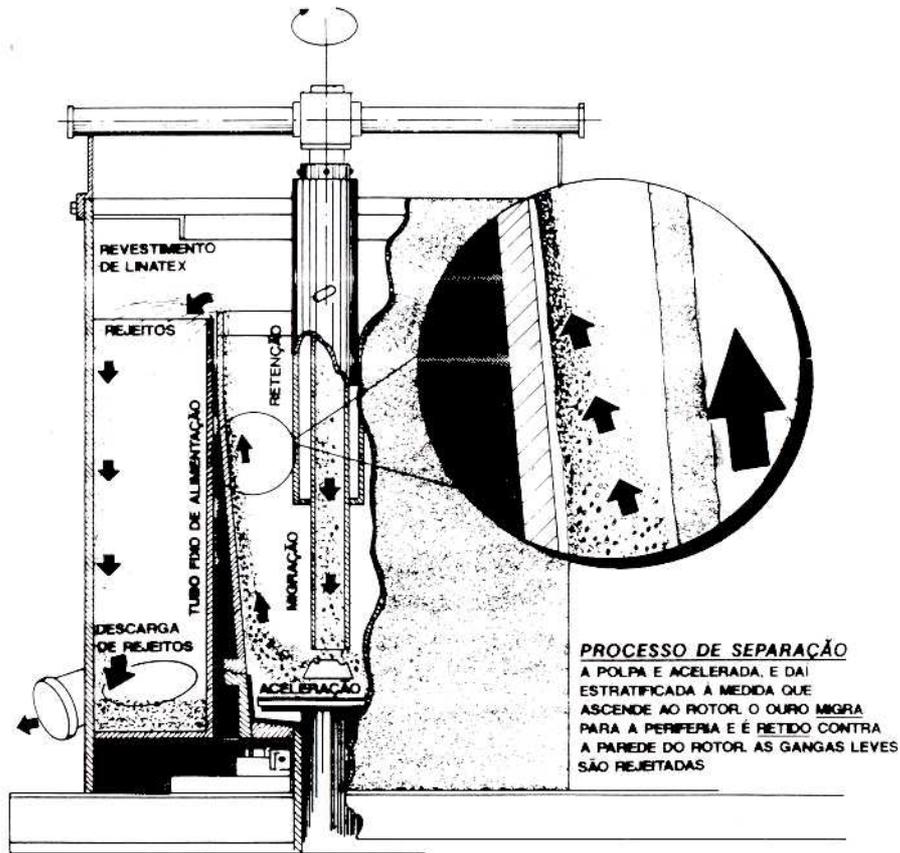


FIG.11 - ESQUEMA DE SEPARAÇÃO DO CONCENTRADOR FALCON

Tabela 2 - Características dos Concentradores Centrifugos

MODELO	Knelson (SP)			Mineraltec (SP)			Hidro Jet (RS)			
	KC30	KC20	KC12	KC6	900	600	350	200	HJC3	HJC1
Peso (kg)	840	460	141	67	900	500	150	60	350	165
Capacidade (t/h)	32	12	(4)	1,0	35	15	5	1,5	(30)	(18)
Água empolpa- mento (m ³ /h)	(72)	(24)	(7,2)	(1,2)	(81)	(35)	(12)	(3,5)	(115)	(51)
Água contra- pressão (m ³ /h)	34	12	6,0	4,0	34	12	6	4	7	3
Diâmetro maior da cesta (m)	0,76	0,51	0,31	0,19	0,90	0,60	0,35	0,20	1,1	0,80
Rotação (rpm)	400	460	600	800	366	444	564	748	240	400
Aceleração [$\omega^2 R$] (m/s ²)	(670)	(590)	(600)	(670)	(661)	(648)	(610)	(613)	(350)	(700)
F _c /F _g (aproxim.)	(67)	(59)	(60)	(67)	(66)	(65)	(61)	(61)	(35)	(70)
Peso concen- trado (kg)	65	35	15	3	70	35	10	5	15L	6L
Potência motor (hp)	10	5	1	0,5	10	5	1	0,5	5	2,5

() calculado/estimado

F_c = força centrífuga; F_g = força de gravidade

Tabela 2 - Características dos Concentradores Centrifugos (cont.)

MODELO	Famag (MT)			Metquip (Austrália)			Falcon (Canadá)			Ourocone (MG)	
	FM4	FM2	M30	M20	M12	M7	B20	B12	B6	M30	M20
Peso (kg)	500	250	850	600	160	100	1800	770	90	1500	1000
Capacidade (t/h)	30	13	30	15	4	0,5	25	6	0,5	44	20
Água empolpa- mento (m ³ /h)	(70)	(27)	(60)	(24)	(9)	(4,5)	(60)	(18)	(12)	(103)	(43)
Água contra- pressão (m ³ /h)	5	2	42	18	6	4,5	zero	zero	zero	zero	zero
Diâmetro maior da cesta (m)	0,9	0,4	0,76	0,51	0,31	0,18	0,51	0,31	0,15	(2,0)	(0,8)
Rotação (rpm)	326	430	(379)	(463)	(594)	(779)	1040	1330	1900	85	135
Aceleração [$\omega^2 R$] (m/s ²)	(524)	(405)	(600)	(600)	(600)	(600)	(3034)	(3006)	(2980)	80	80
F _c /F _g (aproxim.)	(52)	(41)	60	60	60	60	303	301	298	8	8
Peso concen- trado (kg)	35 L	15L	55	35	5	2	10	5	1	250*	100*
Potência motor (hp)	4	3	10	5	1	0,5	30	7,5	1	13	8

* período de 24 horas

3. APLICAÇÕES ATUAIS E POTENCIAIS

Minérios de Ouro

Devido a sua elevada densidade, altamente diferenciada da ganga à qual está normalmente associado, e também a, não raro, se encontrar sob a forma liberada, o ouro é o metal que mais tem sido beneficiado por centrifugação nesta última década. Com efeito, a maioria dos exemplos práticos reportados, em escalas de laboratório e industrial, dizem respeito ao beneficiamento de minérios auríferos.

Deve ser dito que, em escala industrial, as centrífugas tipo Knelson têm tido alta aceitação, deslocando equipamentos tradicionais como calhas, mesas e jigues, tanto em grandes empresas auríferas como, por exemplo, a Rio Paracatu Mineração, em Paracatu-MG, onde a centrífuga é empregada na limpeza do concentrado final de flotação, sendo o rejeito da centrífuga conduzido à cianetização, como em pequenas e médias empresas auríferas e em alguns garimpos do Centro-Oeste. Nestes últimos casos, as centrífugas nem sempre vêm sendo operadas na forma mais adequada em termos da granulometria e homogeneidade de condições de alimentação. Sua implantação nessas instalações garimpeiras permitiu, no entanto, sensível aumento na recuperação de ouro em relação àquelas obtidas mediante o uso de equipamentos tradicionais (11).

Descontaminação de Mercúrio

A disseminação dos garimpos de ouro no Brasil foi acompanhada de problemas ambientais causados pela utilização incorreta de mercúrio, provocando em algumas áreas a contaminação de grandes volumes de material.

O CETEM, através do Projeto Poconé (11), realizou um estudo de diagnóstico e correção dos problemas ambientais causados pelo mercúrio como consequência das atividades garimpeiras do município de Poconé-MT. Uma das soluções estudadas, e que mostrou bons resultados, foi a recuperação do mercúrio metálico dos re-

bons resultados, foi a recuperação do mercúrio metálico dos rejeitos depositados na área através de concentrador centrífugo. Recuperações de 70-80% de Hg foram obtidas em ensaios preliminares de concentração, sendo esses os melhores resultados. A concentração do mercúrio em pequenas massas (razão de concentração 4000/1; o teor elevou-se de 5-10ppm a 1-2% de mercúrio) abre a possibilidade de confinar os concentrados em áreas restritas ou mesmo tratá-los por outros métodos para recuperação do mercúrio e descontaminação dos sedimentos. Adicionalmente, há ainda a possibilidade de recuperar alguma quantidade de ouro, normalmente existente nos rejeitos de garimpo.

Tratamento de Rejeitos Gravíticos

A literatura especializada, mormente a produzida na última década, é pródiga em reportar os resultados do beneficiamento gravítico por meios centrífugos de minérios auríferos, tanto aluvionares como primários, sendo o concentrador tipo Knelson o mais difundido internacionalmente. É evidente que além que das indiscutíveis vantagens técnicas proporcionadas pela centrifugação, os preços atrativos do ouro no mercado internacional no período contribuíram para esta focalização praticamente exclusiva das técnicas de centrifugação para o beneficiamento de minérios auríferos.

Han e Say (2) mostraram que a centrifugação poderia ser utilizada com sucesso na separação de minerais de alta densidade (além do ouro) de gangas leves, o que permite pensar nas grandes quantidades de rejeitos de beneficiamento de minérios de minerais densos que vêm sendo descartadas ao longo dos anos pela não disponibilidade de equipamentos de beneficiamento baseados em técnicas gravíticas capazes de tratar com eficiência as frações finas. Não raro ocorre que os teores de minerais valiosos contidos nesses "rejeitos" são próximos aos teores da alimentação. O rebeneficiamento por uma técnica relativamente barata e eficiente como a centrifugação, quando comparada com, por exemplo, a flotação, deve ser considerado.

Nessa categoria de minérios poderíamos colocar os de scheelita do Nordeste brasileiro, os de cassiterita e os minérios de terras raras, no processamento dos quais as técnicas gravíticas convencionais só tratam com eficiência as frações médias e grosseiras.

Em relação a esses minérios, como a operação do concentrador centrífugo é semicontínua, é mais conveniente tratar os rejeitos de equipamentos gravíticos tradicionais. Esses rejeitos, supostamente contendo os minerais valiosos em menor quantidade e com menor granulometria (comparando-se com a alimentação fresca do minério), permitiriam um tempo maior de operação contínua da centrífuga, até que o leito dos anéis fosse preenchido com os minerais valiosos (i.e., densos).

4. ESTUDOS EM ANDAMENTO

Foi desenhada e construída no CETEM uma minicentrífuga com velocidade de rotação da cesta variável. Este modelo tem capacidade para tratar quantidades de até 30 kg/h, o que viabiliza sua utilização em laboratório, permitindo a utilização de pequenas massas de material e em condições mais controladas que aquelas em operações piloto. A aceleração da minicentrífuga, variável, poderá alcançar o valor de 120 vezes o valor da gravidade normal.

Embora, como antes afirmado, o método de concentração centrífuga tenha tido significativa *momentum* na década de 80, não se pode dizer que o mesmo tenha sido estudado em profundidade. Os manuais de operação fornecem informações notoriamente empíricas, na maioria das vezes baseadas em práticas anteriores.

À medida que diferentes minerais densos forem processados, pode-se pensar em responder a certas indagações comuns no meio dos usuários de equipamentos centrífugos. Além de fatores mais óbvios que afetam o desempenho do equipamento, como o tempo de operação, a pressão da água de fluidização, a percentagem de sólidos de alimentação e a taxa de alimentação, outros parâmetros serão objeto de estudo: distribuição granulométrica do minério, distribuição granulométrica e percentual de minerais pesados, estudo de dispersão da polpa (importante para materiais superfinos), velocidade de rotação da cesta (i.e., intensidade do campo centrífugo). Serão analisadas também as condições mais adequadas a etapas de concentração primária ou de limpeza.

Através da obtenção de dados operacionais em condições planejadas e controladas para diversos minerais/minérios, pode-se pensar em formular um modelo matemático, ainda que empírico, para os concentradores centrífugos. Talvez cada modelo se aplique a uma categoria de minério, mas talvez se possa obter um modelo geral.

Para esses estudos uma estreita colaboração entre o CETEM e o Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da

COPPE/UFRJ está em andamento, através da qual se espera contribuir para a melhor compreensão dos fundamentos e conseqüentemente, o melhor desempenho dos concentradores centrífugos. Os fabricantes também poderão se beneficiar, incorporando melhorias em seus equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SIVAMOHAN, R. The problem of recovering very fine particles in mineral processing: A review. *Int. J. Miner Process.* v. 28, 1990, p. 247-288.
- (2) HAN, K.N. e SAY, W.C. The separation of fine particles by centrifugation. *Int. J. Miner. Process*, v. 14, 1985, p. 265-273.
- (3) MARTINEZ, E. The gravity - magnetic separation: A new development for recovery of weakly-magnetic minerals. *In: SOMASUNDARAN, P. (Ed.), Advances in Mineral Processing.* New York: SME, 1986, Chap.32.
- (4) TAGGART, A.F. *Handbook of Mineral Dressing.* New York: John Wiley and Sons, 1945. Sect. 11, pt.1
- (5) BURT, R.O. *Gravity Concentration Methods.* New York: Elsevier, 1984. Chap. 3 and 7.
- (6) FERRARA, G.A. Process of centrifugal separation using a rotating tube. *In: INTER. MINER. PROC. CONG.*, 5, 1960, London. *Proceedings.* IMM, p.173-184.
- (7) HARRIS, D. The Knelson Concentrator: aplicações in Australia. *In: AUS IMM. Perth and Kalgoorlie Branches, REGIONAL CONFERENCE ON GOLD-MINING, METALLURGY AND GEOLOGY*, Oct. 1984, p.101-106.
- (8) KNELSON, B. Development and economic application of Knelson concentrator in low grade alluvial gold deposits. *In: The AUS IMM ANNUAL CONFERENCE.* March, 1990. Rorotua, New Zealand, *Proceedings.* p.123-128.
- (9) ANON. Falcon concentrator: spinning for gold. *BC Discovery*, p.23, May/June 1989.
- (10) LINS, F. F. e VEIGA, M. Performance of a new centrifuge (Falcon) in concentrating a gold ore from Texada Island, BC-Canada (a ser apresentado no "Minerals Engineering'92", Vancouver, Canadá).

- (11) FARID, L.H.; MACHADO, J.E.B. e SILVA, A.O. Controle de emissão e recuperação de mercúrio em rejeitos de garimpo. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1991. (Tecnologia Ambiental, 1). Cap. 2.

NÚMEROS PUBLICADOS NA SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

- 01 - Flotação de carvão estudos em escala de bancada; - Antonio R. de Campos, Salvador L. M. de Almeida e Amilcar T. dos Santos, 1979. (esgotado)
- 02 - Beneficiamento de talco estudos em escala de bancada; - Nelson Takessi Shimabukuro, Carlos Adolpho Magalhães Baltar e Francisco Wilson Hollanda Vidal, 1979. (esgotado)
- 03 - Beneficiamento de talco estudos em usina piloto; - Nelson Takessi Shimabukuro, Carlos Adolpho Magalhães Baltar e Francisco Wilson Hollanda Vidal, 1979. (esgotado)
- 04 - Flotação de cianita da localidade de Boa Esperança (MG) - Ivan O. de Carvalho Masson e Tulio Herman Araya Luco, 1979.
- 05 - Beneficiamento de diatomita do Ceará - José A. C. Sobrinho e Adão B. da Luz, 1979. (esgotado)
- 06 - Eletrorecuperação de zinco uma revisão das variáveis influentes - Roberto C. Villas Bôas, 1979. (esgotado)
- 07 - Redução da gipsita com carvão vegetal; - Ivan O. de Carvalho Masson, 1980. (esgotado)
- 08 - Beneficiamento do diatomito de Canavieira do Estado do Ceará - Franz Xaver Horn Filho e Marcello Mariz da Veiga, 1980. (esgotado)
- 09 - Moagem autógena de Itabirito em escala piloto - Hedda Vargas Figueira e João Alves Sampaio, 1980. (esgotado)
- 10 - Flotação de minério oxidado de zinco de baixo teor - Carlos Adolpho M. Baltar e Roberto C. Villas Bôas, 1980. (esgotado)
- 11 - Estudo dos efeitos de corrente de pulso sobre o eletrorefino de prata - Luiz Gonzaga Santos Sobral, Ronaldo Luiz Correia dos Santos e Delfin da Costa Laureano, 1980. (esgotado)
- 12 - Lixiviação bacteriana do sulfeto de cobre de baixo teor Caraíba - Vicente Paulo de Souza, 1980. (esgotado)
- 13 - Flotação de minérios oxidados de zinco uma revisão de literatura - Carlos Adolpho Magalhães Baltar, 1980. (esgotado)
- 14 - Efeito de alguns parâmetros operacionais no eletrorefino do ouro - Marcus Granato e Roberto C. Villas Bôas, 1980. (esgotado)

- 15 - Flotação de carvão de Santa Catarina em escala de bancada e piloto - Antonio Rodrigues de Campos e Salvador L. Matos de Almeida, 1981. (esgotado)
- 16 - Aglomeração seletiva de finos de carvão de Santa Catarina estudos preliminares - Lauro Santos N. da Costa, 1981.
- 17 - Briquetagem e a sua importância para a indústria (em revisão) - Walter Shinzel e Regina Célia M. da Silva, 1981. (esgotado)
- 18 - Aplicação de petrografia no beneficiamento de carvão por flotação - Ney Hamilton Porphírio, 1981.
- 19 - Recuperação do cobre do minério oxidado de Caraíba por extração por solventes em escala semipiloto - Ivan O. C. Masson e Paulo Sergio M. Soares, 1981. (esgotado)
- 20 - Dynawhirpool (DWP) e sua aplicação na indústria mineral - Hedda Vargas Figueira e José Aury de Aquino, 1981. (esgotado)
- 21 - Flotação de rejeitos finos de scheelita em planta piloto - José Farias de Oliveira, Ronaldo Moreira Horta e João Alves Sampaio, 1982. (esgotado)
- 22 - Coque de turfa e suas aplicações - Regina Célia Monteiro da Silva e Walter Schinzel, 1982.
- 23 - Refino eletrolítico de ouro, processo Wohlwill - Juliano Peres Barbosa e Roberto C. Villas Bôas, 1982. (esgotado)
- 24 - Flotação de oxidatos de zinco estudos em escala piloto - Adão Benvido da Luz e Carlos Adolpho M. Baltar, 1982.
- 25 - Dosagem de ouro - Luiz Gonzaga S. Sobral e Marcus Granato, 1983.
- 26 - Beneficiamento e extração de ouro e prata de minério sulfetado - Márcio Torres M. Penna e Marcus Granato, 1983.
- 27 - Extração por solventes de cobre do minério oxidado de Caraíba - Paulo Sérgio Moreira Soares e Ivan O. de Carvalho Masson, 1983.
- 28 - Preparo eletrolítico de solução de ouro - Marcus Granato, Luiz Gonzaga S. Sobral, Ronaldo Luiz C. Santos e Delfin da Costa Laureano, 1983.
- 29 - Recuperação de prata de fixadores fotográficos - Luiz Gonzaga Santos Sobral e Marcus Granato, 1984. (esgotado)
- 30 - Amostragem para processamento mineral - Mário Valente Possa e Adão Benvido da Luz, 1984. (esgotado)
- 31 - Indicador de bibliotecas e centros de documentação em tecnologia mineral e geociências do Rio de Janeiro - Subcomissão Brasileira de Documentação em Geociências - SBDG, 1984.
- 32 - Alternativa para o beneficiamento do minério de manganês de Urucum, Corumbá-MS - Lúcia Maria Cabral de Góes e Silva e Lélío Fellows Filho, 1984.
- 33 - Lixiviação bacteriana de cobre de baixo teor em escala de bancada - Teresinha Rodrigues de Andrade e Francisca Pessoa de França, 1984.
- 34 - Beneficiamento do calcário da região de Cantagalo - RJ. - Vanilda Rocha Barros, Hedda Vargas Figueira e Rupen Adamian, 1984.
- 35 - Aplicação da simulação de hidrociclones em circuitos de moagem - José Ignácio de Andrade Gomes e Regina C. C. Carriso, 1985.
- 36 - Estudo de um método simplificado para determinação do "Índice de Trabalho" e sua aplicação à remoagem - Hedda Vargas Figueira, Luiz Antonio Pretti e Luiz Roberto Moura Valle, 1985.
- 37 - Metalurgia extrativa do ouro - Marcus Granato, 1986.
- 38 - Estudos de flotação do minério oxidado de zinco de Minas Gerais - Francisco Wilson Hollanda Vidal, Carlos Adolfo Magalhães Baltar, José Ignácio de Andrade Gomes, Leonardo Apparício da Silva, Hedda Vargas Figueira, Adão Benvido da Luz e Roberto C. Villas Bôas, 1987.
- 39 - Lista de termos para indexação em tecnologia mineral - Vera Lucia Vianna de Carvalho, 1987.
- 40 - Distribuição de germânio em frações densimétricas de carvões - Luiz Fernando de Carvalho e Valéria Conde Alves Moraes, 1986.
- 41 - Aspectos do beneficiamento de ouro aluvionar - Fernando Antonio Freitas Lins e Leonardo Apparício da Silva, 1987.
- 42 - Estudos tecnológicos para aproveitamento da atapulgita de Guadalupe-PI - Adão Benvido da Luz, Salvador Luiz M. de Almeida e Luciano Tadeu Silva Ramos, 1988.
- 43 - Tratamento de efluentes de carvão através de espessador de lamelas - Francisco Wilson Hollanda Vidal e Franz Xaver Horn Filho, 1988.
- 44 - Recuperação do ouro por amalgamação e cianetação: problemas ambientais e possíveis alternativas - Vicente Paulo de Souza e Fernando Antonio Freitas Lins, 1989.
- 45 - Geopolítica dos novos materiais - Roberto C. Villas Bôas, 1989. (esgotado)

- 46 - Beneficiamento de calcário para as indústrias de tintas e plásticos - Vanilda da Rocha Barros e Antonio Rodrigues de Campos, 1990.
- 47 - Influência de algumas variáveis físicas na flotação de partículas de ouro - Fernando Antonio Freitas Lins e Rupen Adamian, 1991.
- 48 - Caracterização tecnológica de caulim para a indústria de papel - Rosa Malena Fernandes Lima e Adão Benvindo da Luz, 1991.
- 49 - Amostragem de Minérios - Maria Alice Cabral Goes, Mario Valente Possa e Adão Benvindo da Luz, 1991.
- 50 - Design of Experiments in Planning Metallurgical Tests - Roberto C. Villas Bôas, 1991.
- 51- Eletrorrecuperação de ouro a partir de soluções diluídas de seu cianeto - Roberto C. Villas Bôas, 1991.
- 52- Talco do Paraná - Flotação em usina piloto - Salvador Luiz M. de Almeida, Adão Benvindo da Luz e Ivan Falcão Fontes, 1991.
- 53- Os novos materiais e a corrosão - Roberto C. Villas Bôas, 1991.
- 54- Aspectos diversos da garimpagem de ouro - Fernando Freitas Lins (coord.), José Cunha Cotta, Adão Benvindo da Luz, Marcelo Mariz da Veiga, Luiz Henrique Farid, Márcia Machado Gonçalves, Ronaldo Luiz C. dos Santos, Maria Laura Barreto e Irene C. M. H. Medeiros Portela, 1992.

ISBN - 85-7227- 026-4