



**ESCOLA POLITÉCNICA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**BALANÇO DE MASSAS E METALÚRGICO  
DA USINA DE CALAMINA – VAZANTE, MG**

**ALEX GUADALUPE MORENO**

**SÃO PAULO  
2000**

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**TRABALHO DE FORMATURA**

**BALANÇO DE MASSAS E METALÚRGICO  
DA USINA DE CALAMINA – VAZANTE, MG**

TRABALHO DE FORMATURA  
APRESENTADO  
À ESCOLA POLITÉCNICA  
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO,  
NA CONCLUSÃO DO CURSO  
DE GRADUAÇÃO  
DE ENGENHARIA DE MINAS.

**ENGENHEIRANDO: ALEX GUADALUPE MORENO**

**ORIENTADOR: PROF. DR. ARTHUR PINTO CHAVES**

**SÃO PAULO  
2000**

TF-2000  
M 8156

Syno 1445153

M2000A

**DEDALUS - Acervo - EPMI**



31700005468

## **AGRADECIMENTOS**

Quero manifestar os meus agradecimentos a todas as pessoas e empresas que me auxiliaram na construção deste trabalho, as quais cito a seguir:

Ao professor Dr. Arthur Pinto Chaves, orientador, por sua dedicação e sábios ensinamentos;

Ao Eng. de Minas Júlio César Bittencourt, que me propôs a realização deste trabalho;

À equipe da UGB Beneficiamento da CMM – Companhia Mineira de Metais, que não mediou esforços para fornecer auxílio;

À empresa VMM – Votorantim Mineração e Metalurgia, de vital importância, na cessão de dados e infra-estrutura para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

Sumário executivo .....	2
1. INTRODUÇÃO .....	3
2. DESCRIÇÃO DA MINA DE VAZANTE .....	4
3. BALANÇO DE MASSAS E METALÚRGICO.....	5
3.1. Metodologia .....	5
3.2. Fórmulas Utilizadas .....	5
3.3. Programa de Balanço de Massas e Metalúrgico .....	7
4. VARIABILIDADE DO MINÉRIO DE CALAMINA .....	15
5. SOFTWARE DE BALANÇO DE MASSAS .....	16
5.1. Aplicação do “Balmart” .....	19
6. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO .....	23
6.1. Classificador Espiral .....	23
6.2. Circuito de Moagem .....	24
6.3. Circuito de Deslamagem .....	28
6.4. Circuito de Flotação .....	36
7. RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE PROCESSO E A RECUPERAÇÃO .....	37
8. CONCLUSÃO .....	40
9. ANEXOS .....	43
9.1. Anexo 1 .....	44
9.2. Anexo 2 .....	45
9.3. Anexo 3 .....	46
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

## **SUMÁRIO EXECUTIVO**

Apresentamos um Balanço de Massas e Metalúrgico da Usina de Calamina da *CMM – Companhia Mineira de Metais*, localizada em Vazante, interior de Minas Gerais.

O Balanço de Massas e Metalúrgico foi construído em planilhas do Microsoft Excel, com a inserção de fórmulas da área de Tratamento de Minérios.

Aplicamos o mesmo balanço em um “software” para ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico denominado “*Balmart*”, confrontando os resultados obtidos.

Analisamos a variabilidade do fluxo de polpa do minério de calamina em sua usina de beneficiamento, através de um programa computadorizado de fácil visualização, o qual nos possibilitou a realização de um estudo sobre as variáveis de processo em cada operação unitária.

Discutimos também a relação entre algumas variáveis de processo e a sua respectiva recuperação.

## 1. INTRODUÇÃO

Em 26 de agosto de 1743 nasceu o químico francês Antoine Laurent de Lavoisier. Filho de uma família que pertencia à nobreza francesa, teve uma excelente educação, estudando nas melhores escolas francesas. Em 1764 graduou-se em direito, mas nunca exerceu a profissão. Lavoisier, conhecido como o introdutor da Química Moderna, lançou em 1789 uma publicação que é considerada o marco da Química Moderna, "Tratado Elementar da Química", que logo foi traduzido para várias línguas.

A freqüente utilização da balança pode ser considerada uma das principais características do trabalho de pesquisa de Lavoisier. Isso o levou à descoberta da importância fundamental da massa da matéria em estudos químicos, o que fez concluir que a soma das massas dos reagentes é igual à soma das massas dos produtos de uma reação, ou seja, a famosa *Lei da conservação das massas* ou *Lei de Lavoisier*.

É com base nas afirmações de Lavoisier e sua "Lei da conservação das massas" que podemos entender o funcionamento de um balanço de massas, metalúrgico e de água, utilizados em usinas de tratamento de minérios.

O presente trabalho trata justamente da aplicação de um balanço de massas em uma usina de tratamento de minérios, com fácil visualização das características da polpa de minério, em um determinado local em um determinado tempo.

Através de um balanço de massas computadorizado, o engenheiro tratamentista obtém um maior controle de suas ações, e, consequentemente, pode apresentar uma ampla flexibilidade na conduta do beneficiamento de um material que não apresenta um comportamento homogêneo, o qual exige constantemente estudos complementares para a sua compreensão.

O Trabalho de Formatura apresenta como tema, a elaboração de um Balanço de Massas e Metalúrgico completo de um circuito de beneficiamento do minério de calamina da Usina de Beneficiamento da CMM – Companhia Mineira de Metais, localizada em Vazante, MG.

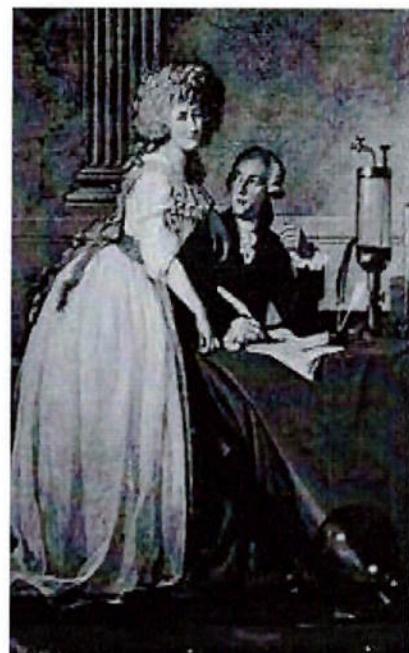


Fig. 1: Antoine Laurent de Lavoisier.

## 2. DESCRIÇÃO DA MINA DE VAZANTE

A mina de Vazante, propriedade da CMM, está situada no estado de Minas Gerais, no município de Vazante, distante 260 km ao norte da cidade de Três Marias e aproximadamente 550 km da cidade de Belo Horizonte.

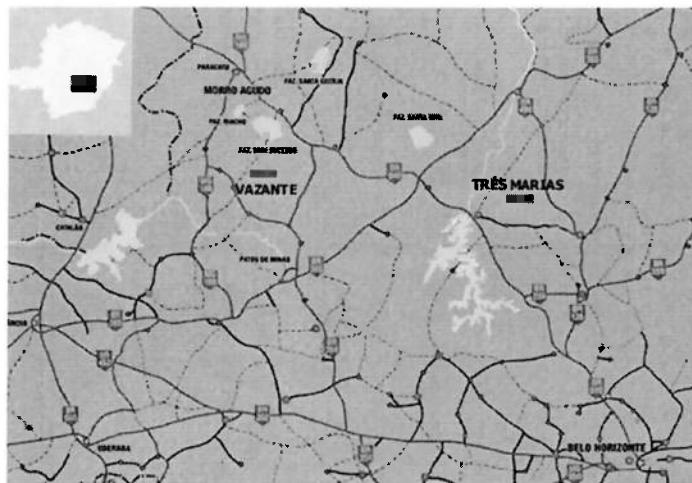


Fig. 2: Localização de Vazante, Minas Gerais.

A mineralização de zinco na mina de Vazante tem uma direção NE, com a exploração dos minérios silicatados de calamina, a céu aberto, e de willemita, em lavra subterrânea. O beneficiamento é realizado em estágios de britagem, deslamagem, moagem e flotação.

A operação de exploração da calamina é realizada a céu aberto, em cava com sistemas convencionais de 10m de altura. A relação estéril-minério atual é de 6:1. A reserva de minério calamínico, que está localizada nos níveis superiores, correspondem a aproximadamente dez anos de vida útil. A operação consiste em desmonte parcial do material (minério mais estéril) com explosivos, seguido de carregamento e transporte por caminhões fora-de-estrada, para o britador primário.

O beneficiamento do minério oxidado de zinco de Vazante é feito em duas unidades independentes, sendo uma para o tratamento do minério com predominância de calamina e a outra para aquele em que predomina a willemita.

O processo utilizado em ambas as unidades é praticamente o mesmo, sendo a única grande diferença, a existência de uma etapa de deslamagem do minério calamínico, previamente à sua alimentação na flotação.

Os concentrados finais de calamina e willemita são espessados com floculante, filtrados em filtros rotativos a vácuo e estocados ou alimentados no forno de calcinação sink.

### 3. BALANÇO DE MASSAS E METALÚRGICO

#### 3.1. Metodologia

O processo de construção das planilhas dos balanços de massa e metalúrgico pode ser dividido em etapas, como descritas a seguir:

- 1) Elaboração do “esqueleto” do circuito, estruturando-se os dutos e instalações de equipamentos principais, a fim de obtermos um fluxograma adequado para a visualização do circuito através do Microsoft Excel;
- 2) Inserção de fórmulas básicas de cálculo de balanço de massas, utilizadas e estudadas na área de Tratamento de Minérios;
- 3) Para uma maior flexibilidade no uso das planilhas, dividimos o programa em dois programas distintos: “BalançoUnitário” e “BalançoInterligado”. Este último é mais dinâmico, pois alterando os valores da sua primeira planilha, os valores das demais planilhas são alterados automaticamente. Já o programa Balanço Unitário trata de cada operação unitária independentemente, ou seja, uma planilha ou operação unitária não se modificará com a inserção de novos valores nas demais planilhas, permitindo um estudo local e não global.
- 4) Foram inseridos então alguns valores amostrados, como medidas de vazão para alimentação e produtos finais, além da porcentagem de sólidos e teores analisados. Os valores inseridos foram obtidos através do programa “Variabilidade23”, que veremos no capítulo 4, onde são calculados as médias e desvios padrões das amostragens realizadas diariamente. As vazões dos demais fluxos são calculadas, portanto, a partir de outras características medidas, tais como teores e porcentagem de sólidos. Logicamente, pelo princípio da conservação da massa, toda a massa de sólidos e água que entram no circuito deve ser igual à massa de sólidos e água que se retiram do mesmo;
- 5) As células que apresentam os seus valores em negrito e na coloração “marrom”, salientam que os seus valores são arbitrários, e foram adotados através da experiência de amostragens anteriores, como foi o caso do circuito de flotação, ou ainda foram estimados através dos resultados obtidos pelo software “Balmart”.

#### 3.2. Fórmulas Utilizadas

Foram analisados, nos fluxogramas do balanço de massas e metalúrgico, alguns parâmetros que ora foram inseridos, ora foram calculados através de fórmulas utilizadas em Tratamento de Minérios, as quais iremos estudar mais detalhadamente nos itens a seguir:

1) *Umidade base seca*: quantidade de água presente dividida pela massa de sólidos seca.

$$\text{Umidade} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \quad (1)$$

2) *Porcentagem de sólidos em peso*: massa de sólidos seca dividida pela massa de polpa (massa de sólidos + massa de água).

$$\% \text{ Sólidos} = \frac{\text{massa de sólidos}}{\text{massa de sólidos} + \text{massa de água}} \quad (2)$$

3) *Conservação da massa*: a soma das massas de alimentação deve ser equivalente à soma das massas dos produtos (Lei de Lavoisier).

$$m_a = m_c + m_r \quad (3)$$

$$m_a \times t_a = m_c \times t_c + m_r \times t_r \quad (4)$$

Onde,

$m_a$  = massa de alimentação;

$m_c$  = massa de concentrado;

$m_r$  = massa do rejeito;

$t_a$  = teor de alimentação;

$t_c$  = teor do concentrado;

$t_r$  = teor do rejeito.

4) *Recuperação*: principal índice para a quantificação de processos em Tratamento de Minérios, também é chamado conforme a situação específica, de rendimento, recuperação em massa ou de partição. Os dois primeiros são reservados para operações de concentração ou para a usina de beneficiamento como um todo. Partição é utilizado para operações de classificação ou de separação densitária e define a porcentagem em massa, referida à alimentação, que se dirige ao underflow. Portanto, para os circuitos de deslamagem e classificação, utilizamos as seguintes fórmulas:

$$\text{Partição} = \frac{(S_a - S_o) \times S_u}{(S_u - S_o) \times S_a} = \frac{m_u}{m_a} \quad (5)$$

$$m_u = \text{Rec}_{\text{mas}} \times m_a \quad (6)$$

Onde,

$S_a$  = porcentagem de sólidos na alimentação;

$S_o$  = porcentagem de sólidos no overflow;

$S_u$  = porcentagem de sólidos no underflow;

$m_u$  = massa de sólidos no underflow.

E para o circuito de flotação temos:

$$Rec_{mas} = \frac{t_a - t_r}{t_c - t_r} = \frac{m_c}{m_a} \quad (7)$$

$$m_c = Rec_{mas} \times m_a \quad (8)$$

5) *Recuperação metalúrgica*: termo muito importante quando tratamos do elemento ou substância de interesse contido no minério e objeto da operação de tratamento. Define a porcentagem em massa de elemento útil, referida à massa de elemento útil na alimentação, que se dirige ao concentrado.

$$Rec_{met} = \frac{t_a - t_r}{t_c - t_r} \times \frac{t_c}{t_a} = \frac{m_c}{m_a} \times \frac{t_c}{t_a} \quad (9)$$

### 3.3. Programa de Balanço de Massas e Metalúrgico

Foram construídos, como mencionado anteriormente, dois programas de balanço de massas e metalúrgico, denominados “Balanço Unitário” e “Balanço Interligado”. Muito semelhantes em seu conteúdo, apresentam apenas uma pequena diferença em seu procedimento de utilização.

Os valores conhecidos através das amostragens realizadas devem ser inseridos nas células de coloração amarela, sendo as demais células preenchidas automaticamente através das fórmulas que foram descritas no item anterior. Ao contrário do programa “Balanço Unitário”, as únicas células que devem ser preenchidas no programa “Balanço Interligado”, são aquelas de coloração amarela da sua primeira planilha, ou seja, da planilha “Balanço Interligado”.

Ambos apresentam seis planilhas, as quais representam as seguintes operações:

- ✓ Balanço dos Circuitos Interligados;
- ✓ Balanço Global da Calamina;
- ✓ Balanço da Linha I de Moagem;
- ✓ Balanço da Linha II de Moagem;
- ✓ Balanço do Circuito de Deslamagem;
- ✓ Balanço do Circuito de Flotação.

As características dos fluxos de cada ponto de operação da usina estão representadas através de “bandeiras”, onde cada janelinha da bandeira representa um parâmetro específico do processo que está sendo acompanhado.

Os parâmetros estudados no programa podem ser resumidos através do índice utilizado, ilustrado a seguir:

LEGENDA	
$Q_s$ (t/h)	%Massa
(%) Sól.	$Q_{ág}$ ( $m^3/h$ )
Zn (%)	Distr. (%)

Fig. 3: Legenda utilizada no programa

Onde:

$Q_s$  = vazão de sólidos em t/h;

$Q_{ág}$  = vazão de água em  $m^3/h$ ;

Zn (%) = porcentagem de zinco;

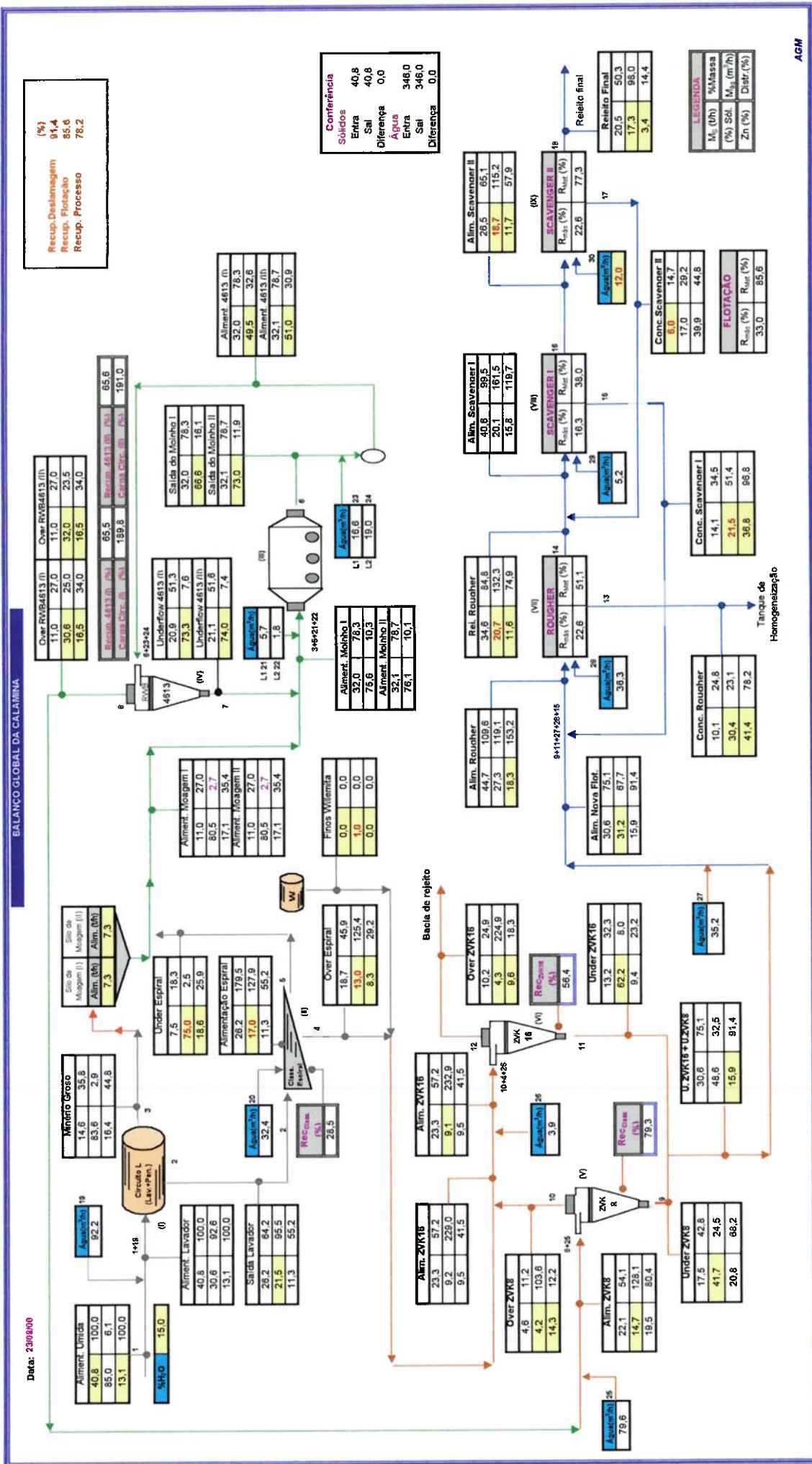
% Sol. = porcentagem de sólidos;

% Massa = porcentagem de sólidos, referente à alimentação do circuito;

Distr. (%) = porcentagem de elemento útil, referente à alimentação do circuito.

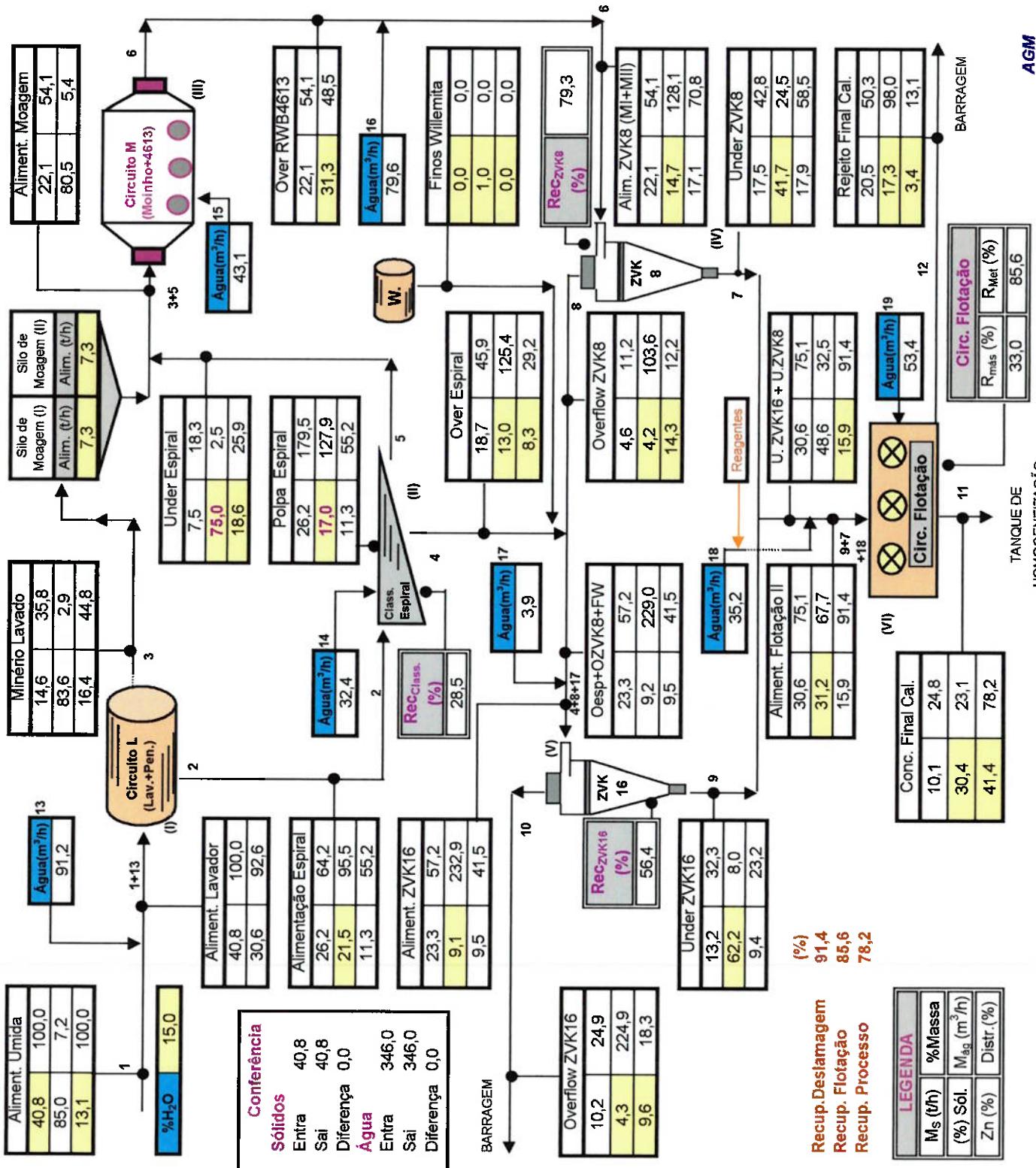
Por fim, encontramos em cada planilha um quadro de conferência, onde é calculada a somatória das vazões de sólido e de água que entram e saem do circuito. Podemos observar, portanto, a aplicação da *Lei de Lavoisier*: todas as massas que entram numa operação de tratamento têm que sair em seus produtos.

Observe agora a saída do programa, que segue nas páginas seguintes, lembrando que os valores inseridos são reais, resultados de uma série de amostragens realizadas no dia vinte e três de agosto de dois mil, por uma equipe de operadores da *CMM - Companhia Mineração de Metais*.



BALANÇO GLOBAL DA CALAMINA (III)

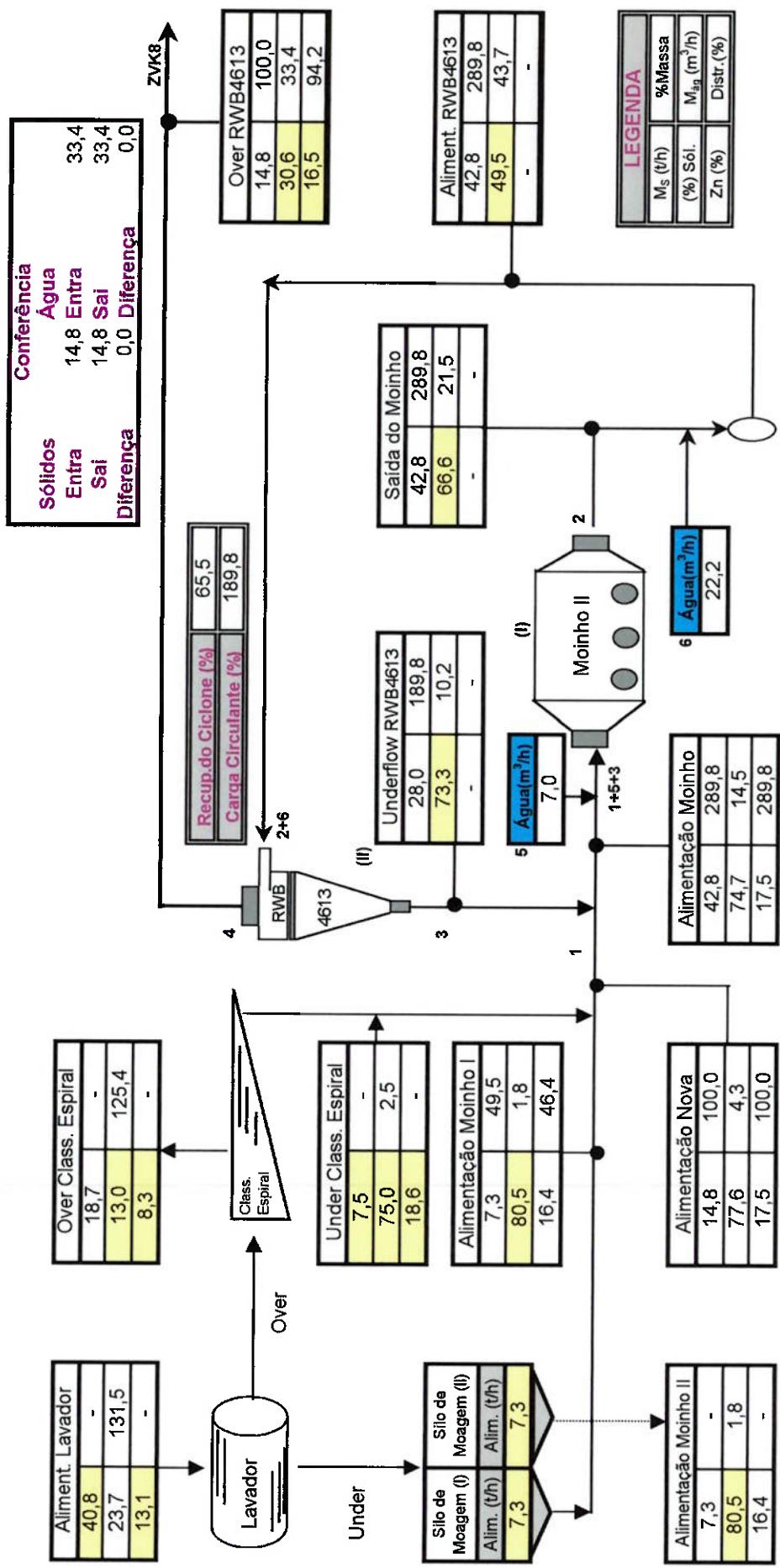
Data: 23/08/00



*Balanço de Massas e Metalúrgico da Usina de Calamina - Vazante, MG*

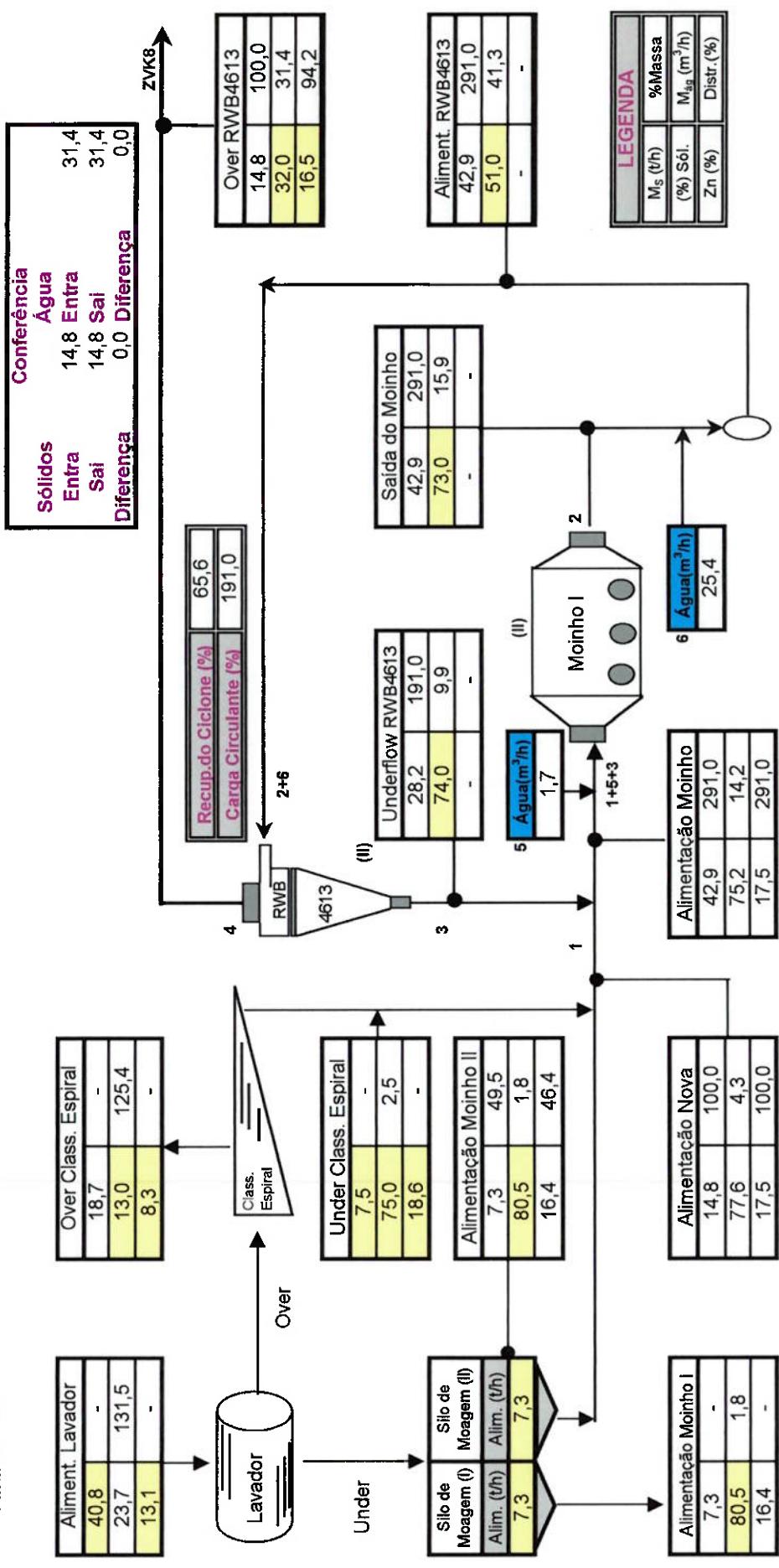
Data: 23/08/00

CIRCUITO I DE MOAGEM DA CALAMINA



Data: 23/08/00

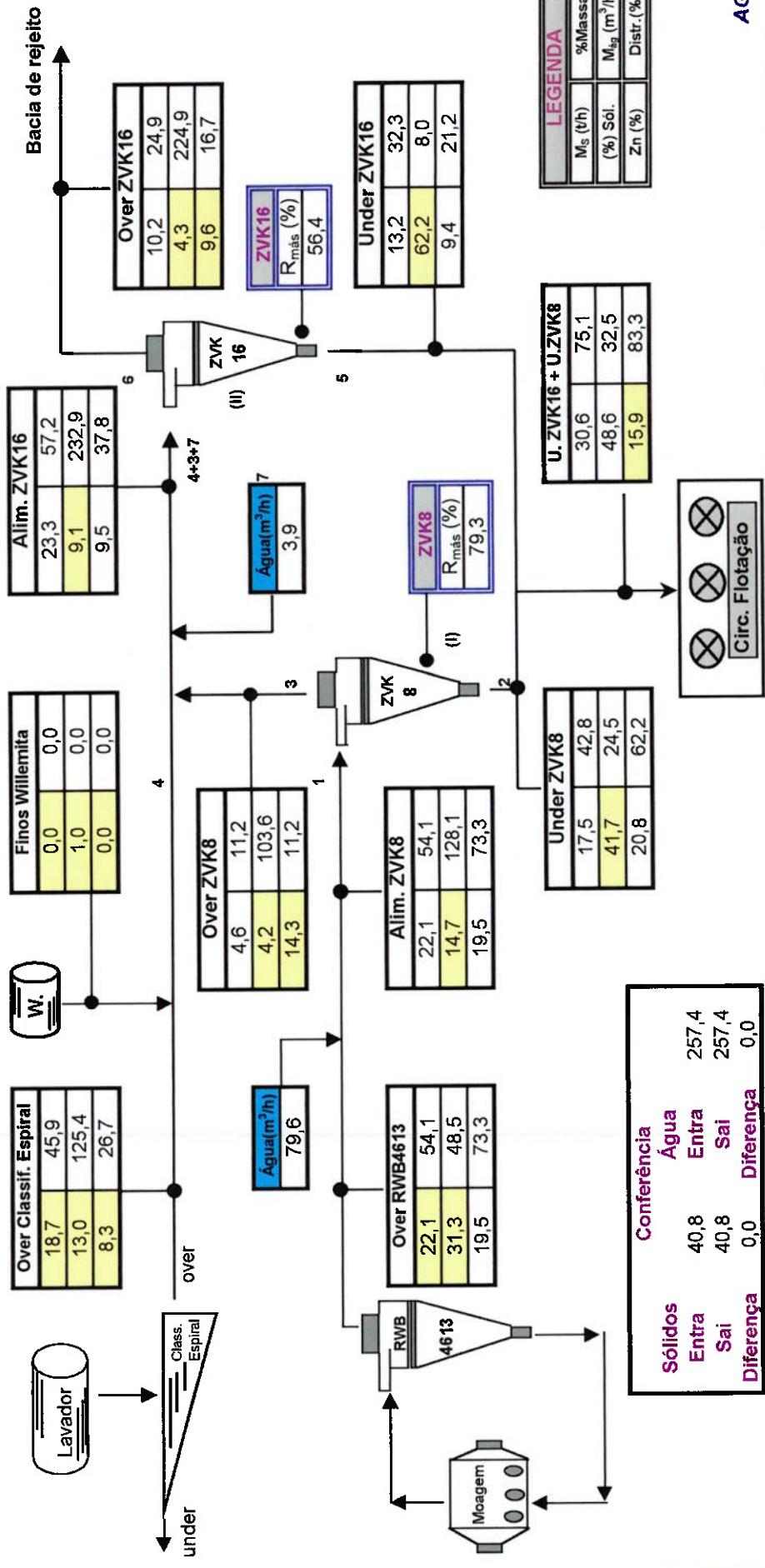
CIRCUITO II DE MOAGEM DA CALAMINA



AGM

DESLAMAGEM DA CALAMINA

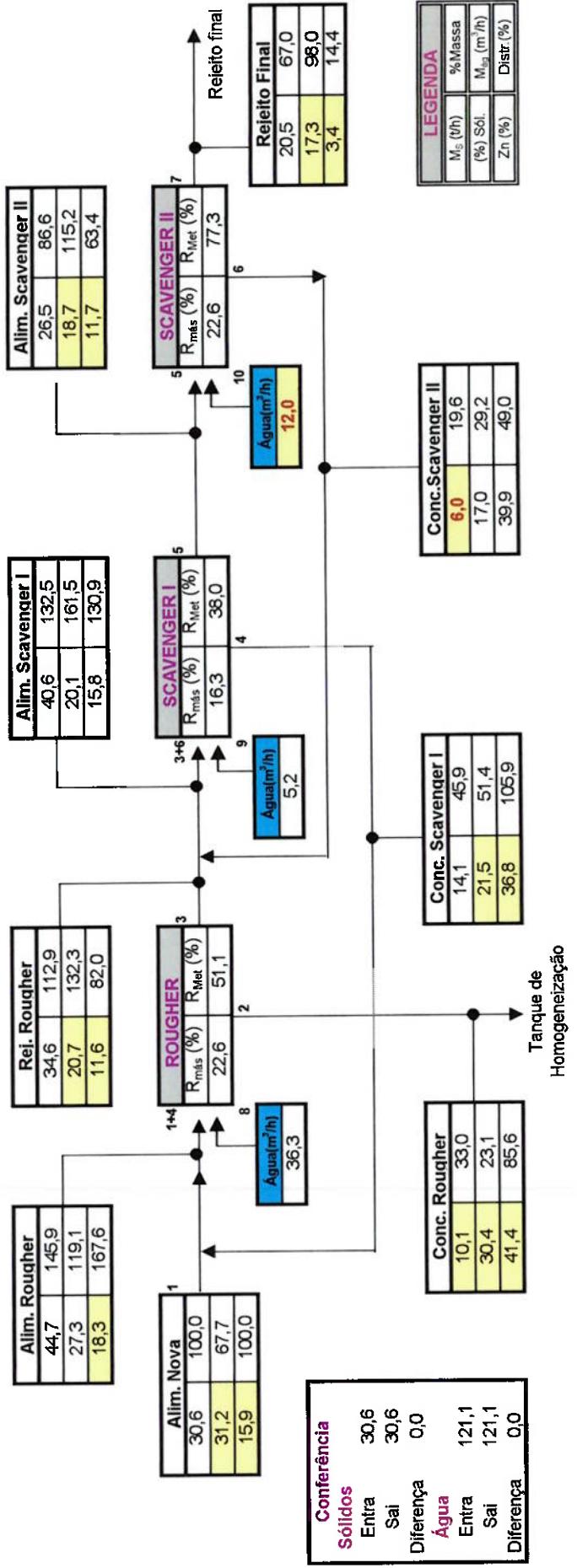
Date: 23/08/00



Balanço de Massas e Metalúrgico da Usina de Calamina - Vazante, MG

Data: 23/08/00

CIRCUITO DE FLOTACÃO DA CALAMINA



AGM

#### 4. VARIABILIDADE DO MINÉRIO DE CALAMINA

O minério provindo da lavra a céu-aberto não é totalmente homogêneo, alternando propriedades como teores de zinco e de impurezas provocados pela diluição da retirada do minério das bancadas de minério.

Esta não homogeneidade do minério se reflete na área de tratamento de minerais, dificultando uma previsão precisa do comportamento da polpa de minério ao longo das operações de beneficiamento. A polpa de minério apresenta, portanto, uma variabilidade em seu comportamento.

Com o intuito de obtermos um maior conhecimento sobre o comportamento da polpa de minério, são realizadas amostragens periódicas em determinados pontos do circuito, fornecendo informações técnicas que possibilitam a tomada de decisões.

Elaboramos, portanto, um programa em Microsoft Excel intitulado “Variabilidade23”, envolvendo vinte e três planilhas, com a presença de gráficos ilustrando o comportamento da variabilidade da porcentagem de sólidos em dezenove pontos de amostragem do processo.

Foram inseridos valores das densidades da polpa do minério, encontradas através das amostragens realizadas no dia 23/08/2000. Os valores da porcentagem de sólidos são calculados automaticamente, através da fórmula inserida no programa, que segue abaixo:

$$\% \text{ Sólidos} = \frac{ds \times (dp - 1) \times 100}{(dp - 1) \times dp} \quad (10)$$

O programa apresenta também uma tabela onde é realizado o tratamento estatístico das amostragens realizadas diariamente. Os seguintes itens são analisados:

- Valor máximo;
- Valor mínimo;
- Amplitude;
- Média;
- Variância;
- Desvio padrão.

A fim de obtermos uma maior dinamicidade na visualização das características de todos os pontos de amostragens, foi elaborada a planilha denominada “Tratamento de Dados”, a qual foi incumbida de “puxar” os valores das demais planilhas, e organizá-los de acordo com três sistemas de classificação, idealizados através de três macros construídas:

- *% de Sólidos*: organiza os valores em ordem crescente de porcentagem de sólidos;

- *Amplitude*: organiza os valores em ordem crescente de amplitude, ou seja, a maior diferença entre os valores máximo e mínimo;
- *Variância*: organiza os valores em ordem crescente de confiabilidade, ou seja, o ponto de maior confiabilidade amostrado é aquele que apresenta uma menor variância.

Esta última macro tem maior importância para nossos estudos, pois reflete a variabilidade do fluxo de polpa em um determinado ponto. Salientamos, porém, que a variância não exprime totalmente a confiabilidade do ponto de amostragem, pois esta depende de mais alguns fatores, como por exemplo, local onde se coleta a amostra e o nível de mecanização empregado.

Nas páginas seguintes, apresentamos um modelo das planilhas dos pontos de amostragem mencionadas acima, além da planilha “Tratamento de Dados”, organizada em ordem crescente de variância.

## 5. SOFTWARE DE BALANÇO DE MASSAS

Aplicamos ao nosso fluxograma um “software” para ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico, denominado “*Balmart*”, desenvolvido em linguagem C, muito útil para avaliar e acompanhar o desempenho de uma usina de tratamento de minérios.

O programa proposto é baseado na técnica dos mínimos quadrados, utilizando-se os multiplicadores de Lagrange e o método de eliminação de Gauss como ferramentas de solução do sistema linear montado. O algoritmo permite também a conciliação do balanço metalúrgico.

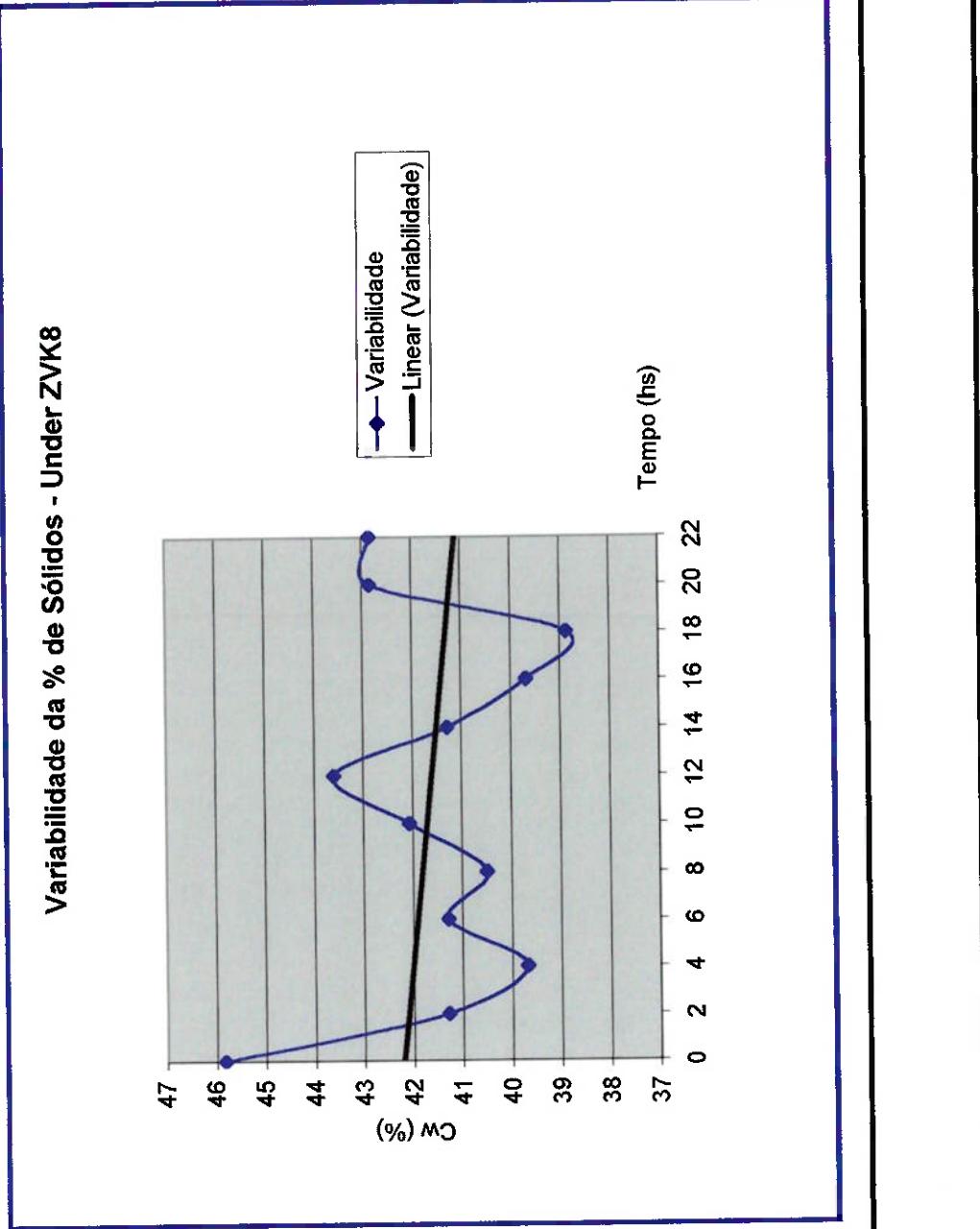
Dentre os métodos matemáticos para o ajuste de balanço de massas, a partir de dados existentes, pode-se salientar os seguintes:

- Minimização da soma dos quadrados dos resíduos do fechamento do balanço;
- Método dos mínimos quadrados;
- Método da busca direta: algoritmo de Coggins, Powell, Rosenbrock e de Hooke-Jeeves.

São avaliados no software utilizado, segundo as definições de Pierre Gy, os seguintes erros:

- *Erro fundamental de amostragem*: proveniente da constituição de um conjunto de partículas submetidas à amostragem, levando em consideração as propriedades físicas destas partículas;
- *Erro devido às variações do lote no tempo*: a periodicidade pode ser uma fonte de erro, portanto, deve-se retirar amostras combinadas, realizando-se uma amostragem sistemática, em intervalos regulares;
- *Erros devidos ao operador e ao amostrador*: ocasionado principalmente pelo modo de amostragem, seja pelo operador, ou pelo amostrador automático, em função da forma e posicionamento do amostrador, ou do manuseio inadequado do dispositivo de amostragem, não permitindo que as partículas tenham a mesma probabilidade de entrar no amostrador;

Horário (h:min)	Intervalo (hs)	Cw (%)
23:00	0	45,8
01:00	2	41,3
03:00	4	39,7
05:00	6	41,3
07:00	8	40,5
09:00	10	42,1
11:00	12	43,6
13:00	14	41,3
15:00	16	39,7
17:00	18	38,9
19:00	20	42,9
21:00	22	42,9
Amostragem	Tratamento Estatístico	
Under ZVK8	Valor máximo	45,8
	Valor mínimo	38,9
Operador	Amplitude	6,9
Alex G. Moreno	Média	41,7
	Variância	3,76
23/08/00	Desvio padrão	1,94

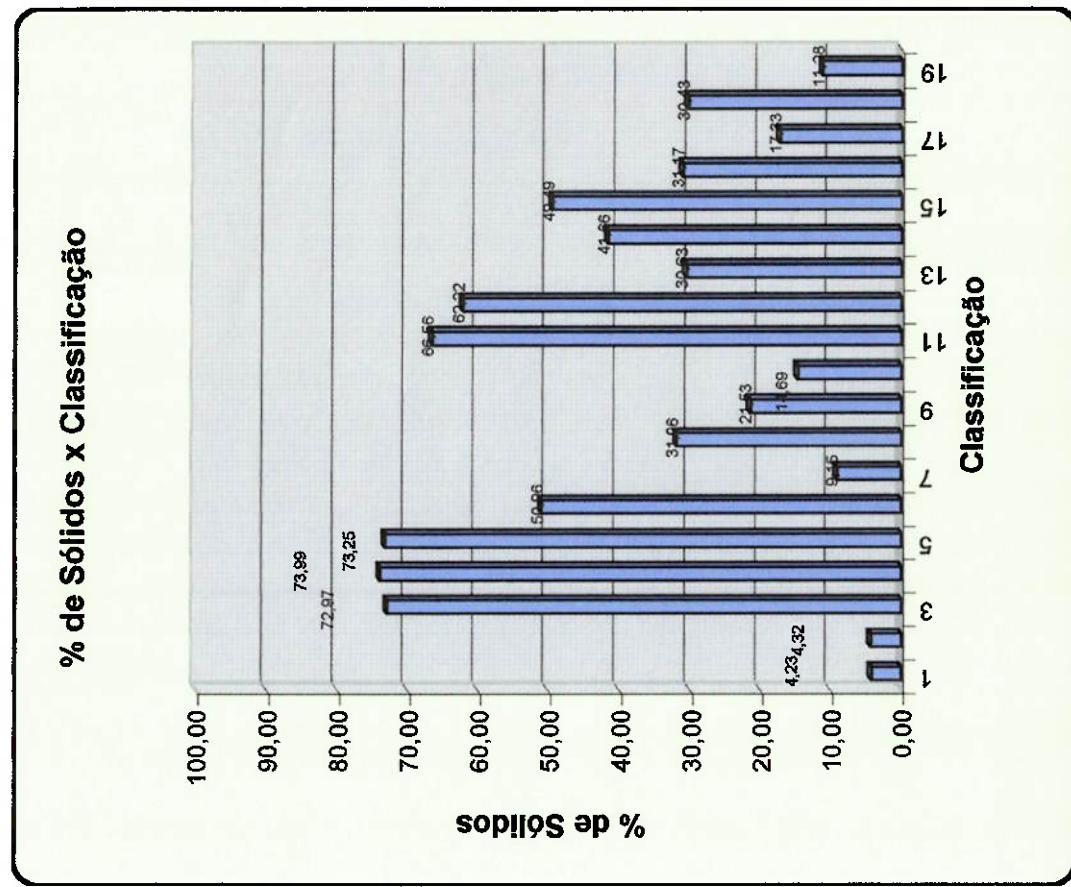


Observações:

## BENEFICIAMENTO DA CALAMINA - MINA DE VAZANTE

### SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO

Classificação de confiabilidade	Fluxo	%Sólidos (%)	Variância	Desvio padrão	Amplitude (%)
1° Over ZVK8	4,23	0,20	0,45	1,70	
2° Over ZVK16	4,32	0,23	0,48	1,55	
3° DM Moinho II	72,97	0,35	0,59	2,05	100,00
4° Under 4613 (I)	73,99	0,43	0,66	2,38	90,00
5° Under 4613 (I)	73,25	0,45	0,67	2,05	73,89
6° Alim.4613 (II)	50,96	0,54	0,73	2,36	72,97
7° Alim. ZVK16	9,15	0,79	0,89	3,53	73,25
8° Over 4613 (II)	31,96	1,00	1,00	2,61	65,56
9° Alim.Espiral I	21,53	1,23	1,11	4,12	65,32
10° Alim. ZVK8	14,69	1,36	1,17	3,53	49,9
11° DM Moinho I	66,56	1,73	1,32	4,98	41,66
12° Under ZVK16	62,22	1,94	1,39	4,11	31,96
13° Over 4613 (I)	30,63	2,13	1,46	4,41	21,63
14° Under ZVK8	41,66	3,76	1,94	6,94	11,69
15° Alim.4613 (I)	49,49	3,76	1,94	6,94	4,23,4,32
16° Alim.Flotação	31,17	3,90	1,98	7,95	10,00
17° Rej.Flotação	17,33	7,89	2,81	13,28	0,00
18° Conc.Flotação	30,43	8,00	2,83	11,08	
19° Over Espiral I	11,28	8,24	2,87	8,54	



- *Erros devidos à preparação das amostras e à análise:* podendo ser ocasionados por perdas, contaminações, retirada de alíquotas, métodos de análise, entre outros;
- *Erros devidos à flutuação das operações unitárias.*

O ajuste dos valores medidos têm que ser feitos de modo que todas as equações do balanço sejam satisfeitas e os ajustes totais sejam mínimos.

### 5.1. Aplicação do “Balmart”

A fim de verificarmos a veracidade dos valores obtidos nos programas “BalançoInterligado” e “BalançoUnitário”, realizamos uma série de balanços de massa, com a utilização do software “Balmart”, para os circuitos de moagem, deslamagem e flotação da usina de calamina, comparando e analisando as diferenças nos resultados obtidos.

Utilizamos, para tal fim, o balanço de água das operações mencionadas acima, pois aplicamos o desvio-padrão das porcentagens de sólidos das amostragens realizadas como elemento ponderador.

Adotamos o desvio-padrão igual a 100 para os valores que foram calculados pelo programa “BalançoInterligado”, os quais são frutos de fórmulas e não de amostragens realizadas, portanto apresentam um valor de desvio-padrão muito superior aos demais.

Os circuito de moagem não apresentaram distorções nos resultados obtidos, como podemos verificar nas tabelas abaixo:

Círculo de Moagem I			
Fluxo	$Q_{água}$ (t/h)	$Q_{água}$ corrigida (t/h)	Desvio padrão
1	4,3	4,3	100
2	21,5	21,5	1,32
3	10,2	10,2	0,67
4	33,4	33,4	1,46
5	7,0	7,0	100
6	22,2	22,2	100
Total	98,6	98,6	

Tab. 1: Comparação de resultados no circuito de moagem I.

Círculo de Moagem II			
Fluxo	$Q_{água}$ (t/h)	$Q_{água}$ corrigida (t/h)	Desvio padrão
1	4,3	4,3	100
2	15,9	15,9	0,59
3	9,9	9,9	0,66
4	31,4	31,4	1
5	1,7	1,7	100
6	25,4	25,4	100
Total	88,6	88,6	

Tab. 2: Comparação de resultados no círculo de moagem II.

Do mesmo modo, não encontramos alterações nos resultados obtidos no círculo de deslamagem:

Círculo de Deslamagem			
Fluxo	$Q_{água}$ (t/h)	$Q_{água}$ corrigida (t/h)	Desvio padrão
1	128,1	128,1	1,17
2	24,5	24,5	1,94
3	103,6	103,6	0,45
4	125,4	125,4	2,87
5	8,0	8,0	1,39
6	224,9	224,9	0,48
7	3,9	3,9	100
Total	618,4	618,4	

Tab. 3: Comparação de resultados no círculo de deslamagem.

O circuito de flotação apresentou uma pequena diferença no fechamento do balanço de massas, como podemos verificar na tabela abaixo:

Círculo de Flotação Balanço de Massas			
Fluxo	$Q_{água}$ (t/h)	$Q_{água}$ corrigida (t/h)	Desvio padrão
1	67,7	67,7	1,98
2	23,1	23,1	2,83
3	132,3	136,0	100
4	51,4	47,8	100
5	115,2	104,4	100
6	29,2	18,5	1000
7	98,0	98,0	2,81
8	36,3	43,6	100
9	5,2	16,2	100
10	12,0	12,1	100
Total	570,4	567,18	

Tab. 4: Comparação de resultados no circuito de flotação.

A diferença foi de 0,56% para a vazão total de água, com relação ao programa “BalançoInterligado”, que pode ser explicado pela maior quantidade de valores admitidos no circuito. Repare também que o fluxo 6 possui um desvio-padrão adotado igual a 1000, pois este valor foi estimado sem nenhuma base experimental anterior, portanto, possui uma confiabilidade muito menor que os demais valores.

Comparamos também, para o circuito de flotação, os resultados obtidos no balanço metalúrgico, ilustrados na tabela abaixo:

Círculo de Flotação Balanço Metalúrgico			
Fluxo	Teor de Zn (%)	Teor de ZN corrigido (%)	Desvio padrão
1	15,9	15,9	0,39
2	41,4	41,4	1,76
3	11,6	16,2	100
4	36,8	34,9	100
5	11,7	2,6	100
6	39,9	-0,2	1000
7	3,4	3,4	0,44

Tab. 5: Comparação de resultados no circuito de flotação.

Desta vez não foi utilizado o balanço de água, e sim o de sólidos, o que pode explicar a maior diferença entre os valores, pois a confiabilidade das vazões de sólidos no circuito é muito baixa.

As matrizes utilizadas para a inserção dos condicionantes de fluxos e operações dos circuitos acima encontram-se em anexo (1). Também estão em anexo (2 e 3) as matrizes do balanço global da calamina (I e II). Porém, por motivo desconhecido, o programa “Balmart” não “rodou” as matrizes, talvez por excesso de tamanho.

## 6. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

O minério provindo da lavra a céu-aberto não é totalmente homogêneo, alternando propriedades como teores de zinco e de impurezas provocados pela diluição da retirada do minério das bancadas de minério.

Esta não homogeneidade do minério se reflete na área de tratamento de minerais, dificultando uma previsão precisa do comportamento da polpa de minério ao longo das operações de beneficiamento. A polpa de minério apresenta, portanto, uma variabilidade em seu comportamento.

Com o intuito de se obter um maior conhecimento sobre o comportamento da polpa de minério, são realizadas amostragens periódicas em determinados pontos do circuito, fornecendo informações técnicas que possibilitam a tomada de decisões. Estas informações são organizadas em boletins diários, de onde foram coletados os dados que preencheram o programa “Variabilidade23”, e possibilitaram algumas análises e conclusões que veremos nos itens a seguir.

### 6.1. Classificador Espiral

Os classificadores espiral consistem de uma calha, com uma determinada inclinação, e no seu interior encontra-se um eixo envolvido por uma hélice, que mantém a polpa em suspensão devido ao seu movimento de rotação. O material sedimentado no fundo da calha é removido pela hélice do classificador, que é caracterizado pelo diâmetro de sua espiral.

A alimentação é realizada abaixo do nível da polpa, onde o material mais pesado afunda e é transportado pelas hélices ao longo do declive, sendo descarregado na parte superior, através de uma abertura na base da calha, acima do nível de água. O material mais fino, por sua vez, transborda pelo vertedouro da calha.

As condições operacionais são definidas pelas seguintes variáveis:

- Imersão da rosca;
- Inclinação da calha;
- Velocidade de revolvimento ou arraste;
- Diluição da polpa.

Na planta de calamina, o classificador opera com as seguintes características de diluição (% de sólidos):

#### Classificador Espiral

	Alim (%)	Over (%)
Média	21,5	11,3
Desv.Pad.	1,11	2,87

Data: 23/08/00

Tab. 6: Porcentagens de sólidos no classificador espiral.

Os classificadores espiral têm os seus limites de operação na faixa de 50% de sólidos na alimentação. Portanto, o equipamento acima está dentro desta faixa, trabalhando com uma alimentação média de 21,5%. Água é adicionada na alimentação, baixando a porcentagem de sólidos da polpa para uma média de 17% aproximadamente. Lembramos ainda que quando aumentamos a diluição, provocamos uma redução na densidade do transbordo, aumentando-se a sedimentação em “queda livre”.

Pela experiência diária de operação, e não havendo um ponto de coleta na parte superior da calha, é descartado o underflow, admitimos uma porcentagem de sólidos de 75%, o que resulta uma recuperação de 38,2% para o classificador.

Para fins de estudo da variabilidade da polpa no classificador, construímos dois gráficos de variabilidade, da alimentação e do over (finos) do espiral, que se encontram na página seguinte.

Note que a polpa não mantém um comportamento estável, que também pode ser verificada através dos desvios-padrão das médias de diluição ilustradas na tabela acima. Concluímos que as amostragens não apresentam um elevado nível de confiança, pois os desvios-padrão de suas amostras são relativamente altos, comparados com os demais equipamentos da usina de calamina.

## 6.2. Circuito de Moagem

A moagem é o último estágio do processo de fragmentação do minério de calamina, que tem suas partículas reduzidas em duas linhas paralelas de moagem, como pode ser observado na figura ao lado.

O circuito de moagem é composto por dois moinhos de bolas, com dimensões de 2,44 x 2,15m, e dois ciclones classificadores com 8" de diâmetro e abertura do apex de 56mm.

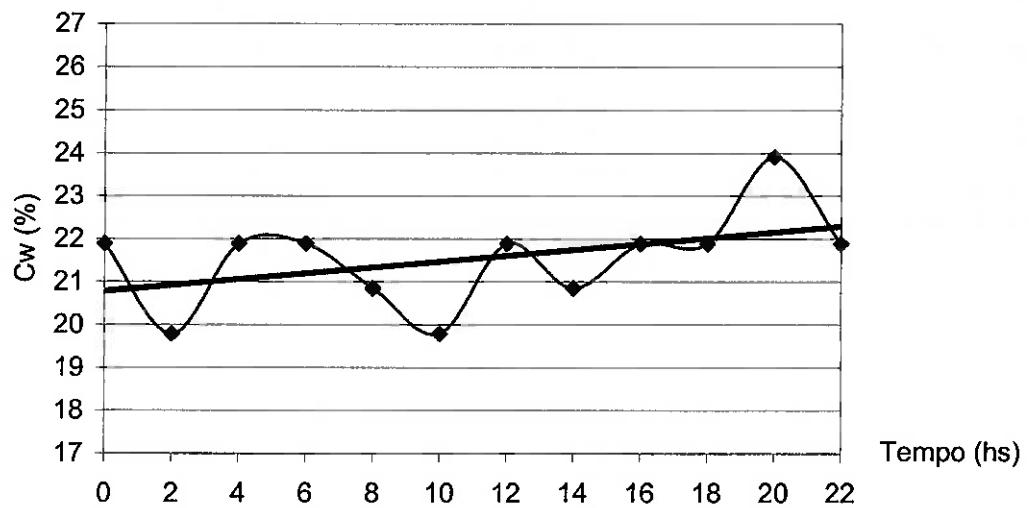
A importância econômica da operação de moagem se reflete no fato de ser a maior consumidora de energia elétrica de um processo de tratamento de minerais, o que nos leva a buscar variáveis que possam otimizar este processo, minimizando ao máximo seus custos de operação e, por outro lado, maximizando a sua produtividade e eficiência.

Muitos são os fatores que influenciam nos gastos de energia e na eficiência da operação dos moinhos, como a velocidade de operação, fração do volume do moinho ocupado pela carga do meio moedor, tamanho do meio moedor, carga circulante e percentagem de sólidos na polpa, que estudaremos um pouco mais detalhadamente.

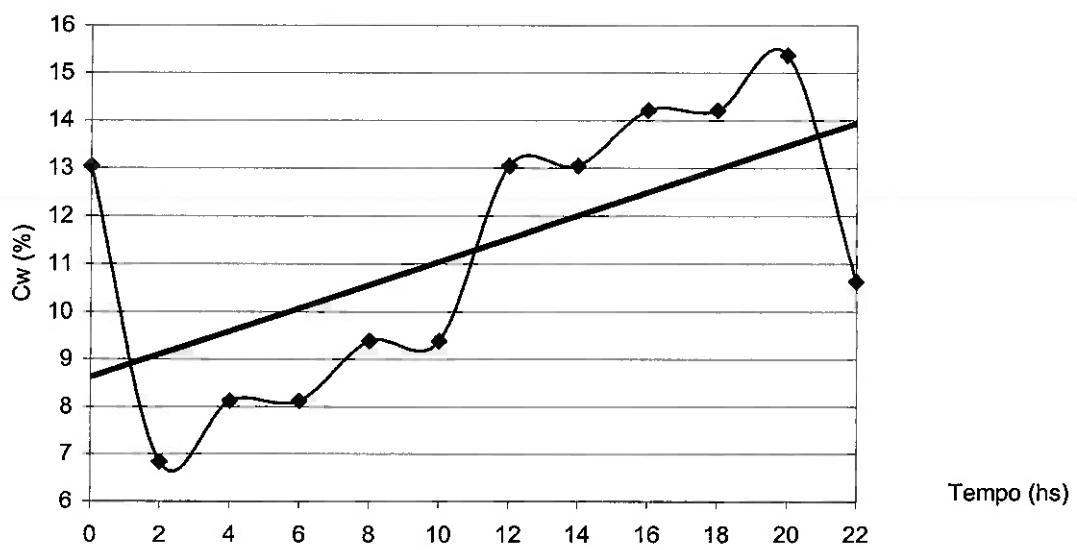


Fig. 4: Linhas de moagem (I) e (II).

**Variabilidade da % de Sólidos - Alimentação Classificador Espiral**



**Variabilidade da % de Sólidos - Over Classificador Espiral**



Lembramos ainda que os moinhos trabalham a úmido, ocasionando menor consumo de energia por tonelada de produto, maior capacidade por unidade de volume do moinho, eliminação de poeiras indesejáveis, e possibilitando o uso de meio de transporte simples como calhas, bombas e canos.

A alimentação nova do circuito de moagem provém dos silos de moagem, que por sua vez são alimentados pelo minério lavado (Círculo do Lavador) e pelos pesados do classificador espiral.

O circuito de moagem da calamina trabalha em circuito fechado, onde o produto do moinho alimenta um ciclone classificador denominado RWB 4613 (ver figura ao lado), que seleciona um material com granulometria adequada para a próxima etapa, e retorna o material grosso ao moinho, junto com a alimentação nova.

A alimentação nova de cada circuito de moagem gira em torno de 12,5 t, totalizando aproximadamente 25 t de alimentação para as duas linhas de moagem, que operam com uma carga circulante média em torno de 190%. A carga circulante de 190% (razão entre o retorno do classificador e a alimentação nova) encontra-se numa faixa aceitável de operação, que varia normalmente em moinhos de bolas entre 100 e 350%. Neste intervalo, salientamos que quanto maior a carga circulante maior será a capacidade do moinho, que pode ser aumentada também com a diminuição do diâmetro das bolas. No entanto, somente saberemos o verdadeiro resultado dessas mudanças operacionais através de ensaios em laboratório, plantas piloto, ou até mesmo na prática cotidiana de operação.

A carga de bolas é controlada de acordo com a granulometria do produto desejada, além do tempo de residência estipulado para a polpa de minério. Assim, há uma faixa ideal para se trabalhar, em que fora dela, quanto maior a carga de bolas, maior a geração de finos, diminuindo a carga circulante, aumentando o tempo de residência e ocasionando uma sobremoagem, podendo prejudicar as operações subsequentes.

Sabe-se que a quantidade de água utilizada no moinho para formar a polpa depende da granulometria da alimentação e do tipo de moinho. A utilização de uma polpa muito diluída leva a uma moagem pouco eficiente, pois as partículas sólidas se encontram muito dispersas na polpa sendo poucos os choques efetivos entre elas e as bolas. Ao elevarmos a percentagem de sólidos aumentamos a eficiência da moagem com uma redução considerável no consumo de bolas. No entanto, esta eficiência pode ser melhorada dentro de certos limites, conhecidos experimentalmente no decorrer de cada operação.



Fig. 5: Ciclone RWB 4613 (I).



Fig. 6: Moinho de bolas.

As duas linhas de moagem trabalham com percentagens de sólidos distintas, mas com apenas uma pequena variação, como pode ser observado nas tabelas abaixo, que fornecem também as percentagens inerentes ao ciclone de classificação que fecha o circuito de moagem:

**RWB 4613 (I)**

	Descarga do Moinho (I)	Alim (%)	Under (%)	Over (%)	Rec (%)
Média	66,6	49,5	73,3	30,6	65,5
Desv.Pad.	1,32	0,99	0,67	1,46	

Data: 23/08/00

**RWB 4613 (II)**

	Descarga do Moinho (I)	Alim (%)	Under (%)	Over (%)	Rec (%)
Média	73,0	51,0	74,0	32,0	65,6
Desv.Pad.	0,59	0,73	0,66	1	

Data: 23/08/00

Tab. 7: Porcentagens de sólidos nos ciclones RWB 4613 (I) e (II).

As percentagens de sólidos em que trabalham os moinhos podem ser vistas na primeira coluna de valores, ou seja, pela amostragem realizada na descarga dos moinhos. A primeira de moagem linha trabalha com uma média de 66% enquanto a segunda trabalha numa faixa de 73%. Estas percentagens de sólidos estão dentro da faixa de trabalho idealizada por Taggart, que prevê um valor ideal para tamanho de alimentação de 65 malhas em moinhos de bolas entre 60 e 80%.

O ciclone classificador RWB 4613, que fecha o circuito de moagem, tem um papel muito importante no bom desempenho desta operação, pois a porcentagem de sólidos ótima da alimentação é função da distribuição granulométrica da carga circulante. Devemos, portanto, considerar em conjunto a operação de moagem e a classificação, de forma a otimizarmos a eficiência da moagem. Por outro lado, a deficiência de finos diminui a viscosidade da polpa e piora o desempenho da moagem, o que demonstra não haver sentido em elevar-se a eficiência de classificação além de um certo ponto, que se encontra atualmente atuando a uma faixa de recuperação média em torno de 65%.



Fig. 7: Ciclone RWB 4613 (II).

Água é adicionada a caixa de bomba situada na descarga de cada moinho, baixando-se a % de sólidos para uma faixa de 48 a 52%, permitindo uma alimentação adequada ao ciclone de classificação.

Os ciclones que fecham o circuito de moagem, RWB 4613 (I) e (II), originam produtos com médias descritas nas tabelas acima, ou seja, underflow em uma faixa de 70 a 75% , e overflow em uma faixa de 30 a 33% aproximadamente.

Analisemos agora as curvas de variabilidade dos fluxos decorrentes deste circuito de moagem, ilustradas nas páginas seguintes:

- As linhas de tendência das alimentações dos ciclones tendem a seguir, logicamente, as mesmas direções da linha de tendência das descargas dos moinhos, pois apenas água é adicionada à polpa, o que comprova também a relação direta entre o produto da descarga dos moinhos e as respectivas alimentações dos ciclones;
- A variabilidade do fluxo de alimentação possui uma maior influência no fluxo de overflow do ciclone, o que é prejudicial ao processo, pois o overflow do circuito de moagem alimenta o circuito de deslamagem;
- O fluxo de underflow apresenta apenas uma pequena variabilidade, não comprometendo o seu retorno ao moinho de bolas;
- Por fim, note que a amplitude das curvas e a sua maior irregularidade pode ser prevista através da segunda linha de valores das tabelas acima, ou seja, dos desvio-padrão das amostragens realizadas.

### 6.3. Circuito de Deslamagem

O circuito de deslamagem da planta de calamina é composto basicamente por duas baterias de ciclones, denominadas ZVK 8 e ZVK 16, ambas com ciclones de cinco polegadas de diâmetro, ilustrados na figura ao lado.

Sabe-se que o princípio básico de separação empregado nos ciclones é a separação centrífuga, sendo o seu desempenho influenciado por suas dimensões, pelas variáveis operacionais e pelas propriedades físicas dos sólidos e da polpa alimentada.

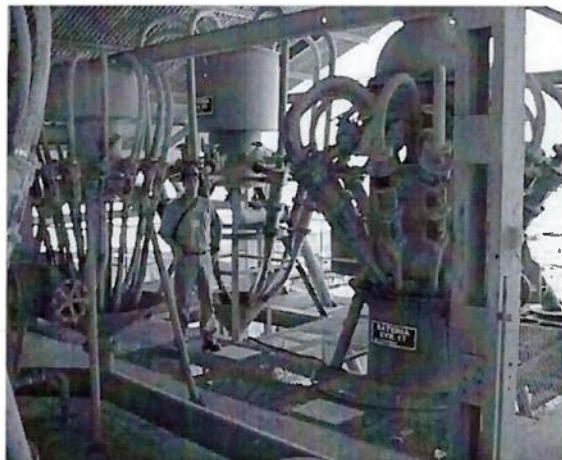
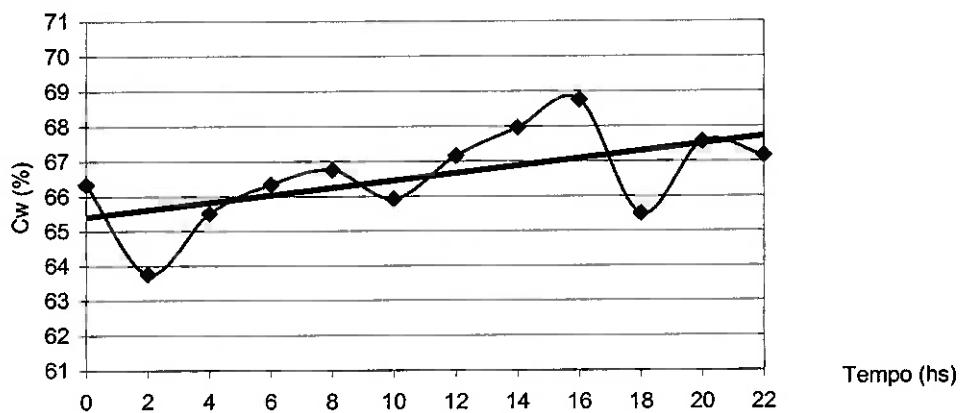
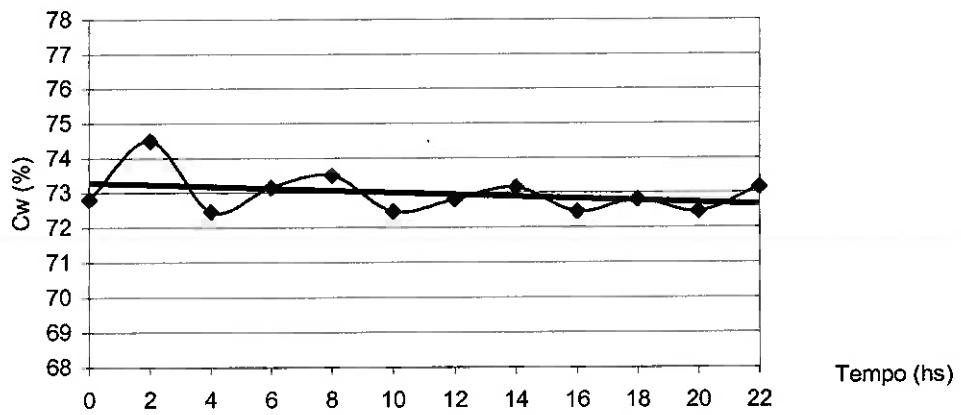


Fig. 8: Bateria de ciclones ZVK 16 e ZVK 8 .

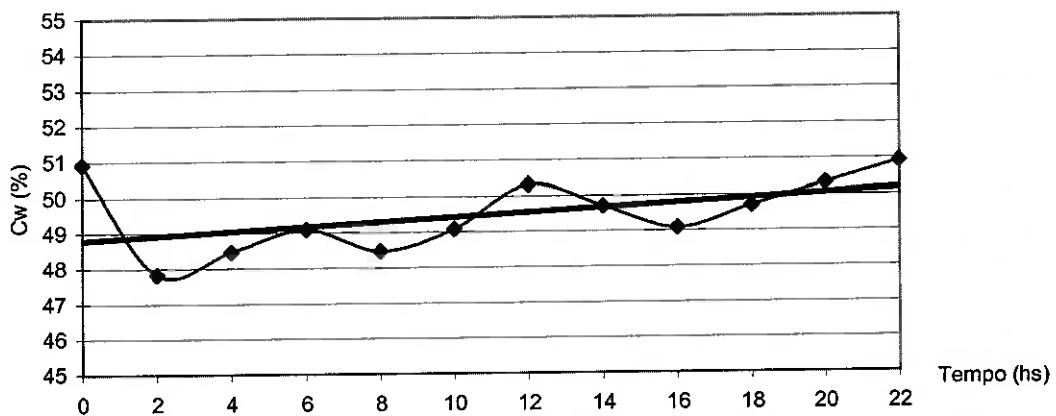
**Variabilidade da % de Sólidos - Descarga do Moinho I**



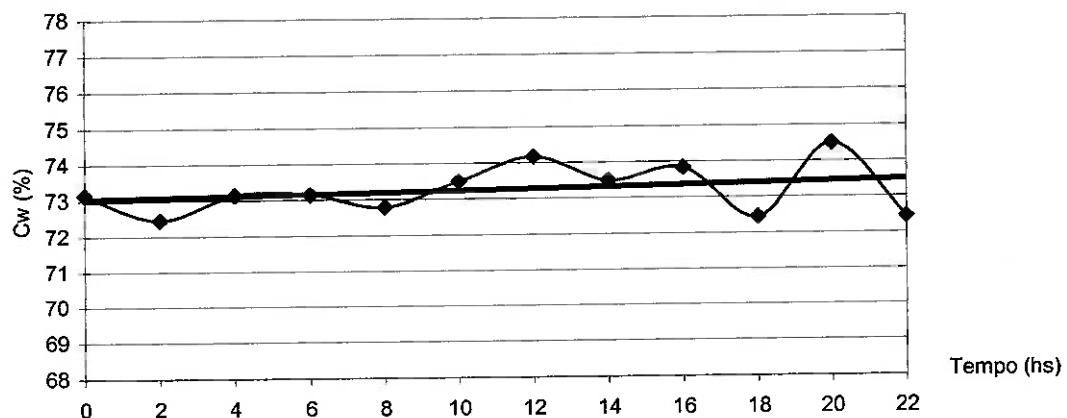
**Variabilidade da % de Sólidos - Descarga do Moinho II**



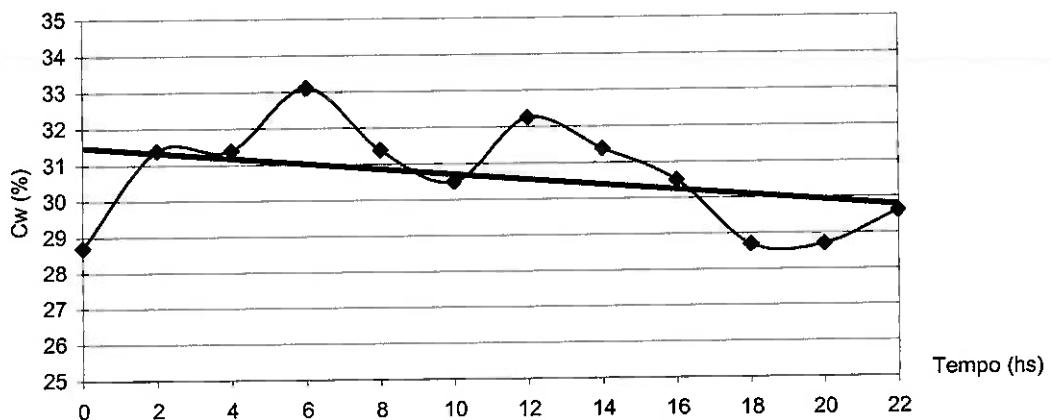
**Variabilidade da % de Sólidos - Alimentação RWB4613 Moinho I**



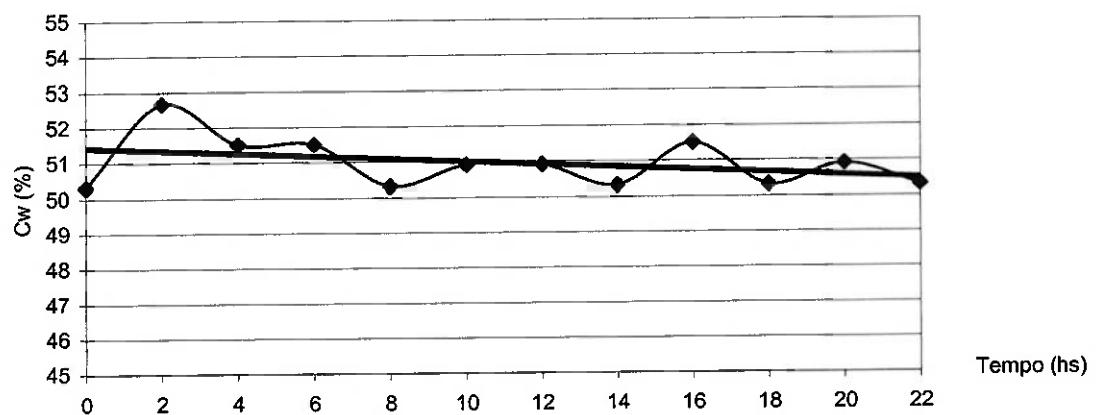
**Variabilidade da % de Sólidos - Under RWB4613 - Moinho I**



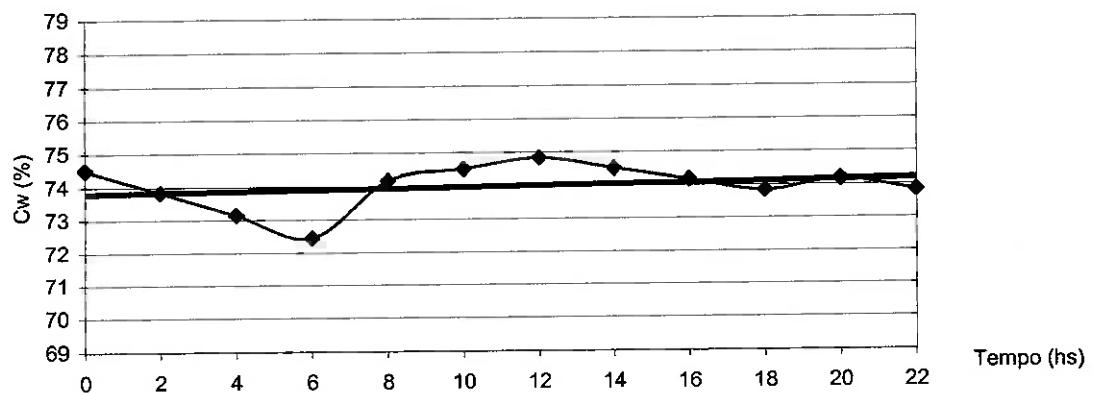
**Variabilidade da % de Sólidos - Over RWB4613 - Moinho I**



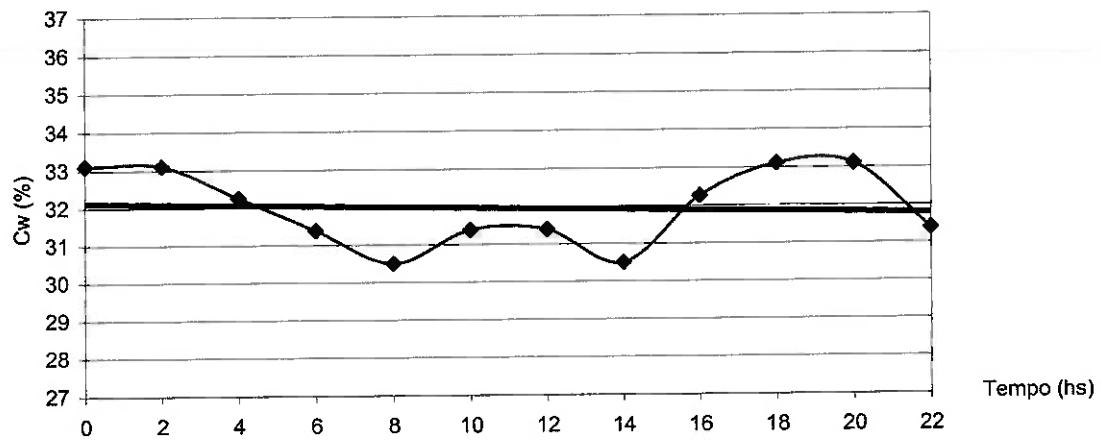
**Variabilidade da % de Sólidos - Alimentação RWB4613 - Moinho II**



**Variabilidade da % de Sólidos - Under RWB4613 - Moinho II**



**Variabilidade da % de Sólidos - Over RWB4613 - Moinho I**



Iremos analisar esta última variável, através do estudo da variabilidade da porcentagem de sólidos de sua alimentação, overflow e underflow. Veja a seguir, nas tabelas abaixo, as características da polpa presente no circuito de deslamagem quanto a sua diluição:

#### ZVK 8

	Alim (%)	Under (%)	Over (%)	Rec (%)
Média	14,7	41,7	4,2	79,4
Desv. Pad.	1,17	1,94	0,45	

Data: 23/08/00

#### ZVK 16

	Alim (%)	Under (%)	Over (%)	Rec (%)
Média	9,1	62,2	4,3	56,4
Desv. Pad.	0,89	1,39	0,48	

Data: 23/08/00

Tab. 8: Porcentagens de sólidos nos ciclones ZVK 8 e ZVK 16.

Note que a densidade de sólidos da alimentação do primeiro ciclone (14,7 % de sólidos), é mais elevada do que no segundo (9,1 % de sólidos), pois lembramos que a alimentação do ZVK 16 provém do overflow do ZVK 8, adicionado dos leves do classificador espiral e água.

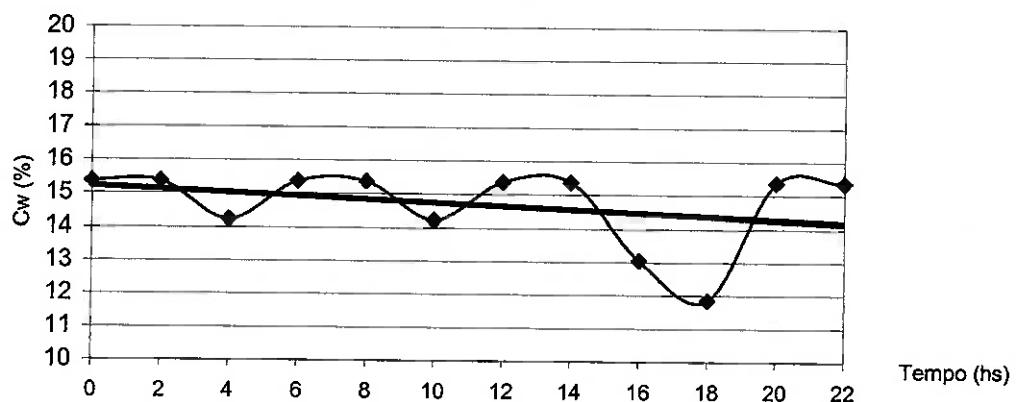
A recuperação mássica também é mais elevada no primeiro ciclone (79,4 % de sólidos), derivada principalmente da distribuição granulométrica da alimentação, fazendo com que uma maior parte da alimentação se dirija ao underflow.

A concentração de sólidos no underflow do ZVK 16 é, porém, mais elevada (62,2 % de sólidos), pois o processo exige uma última tentativa de recuperar o mineral útil, adequando o equipamento para um maior desaguamento e menor recuperação mássica.

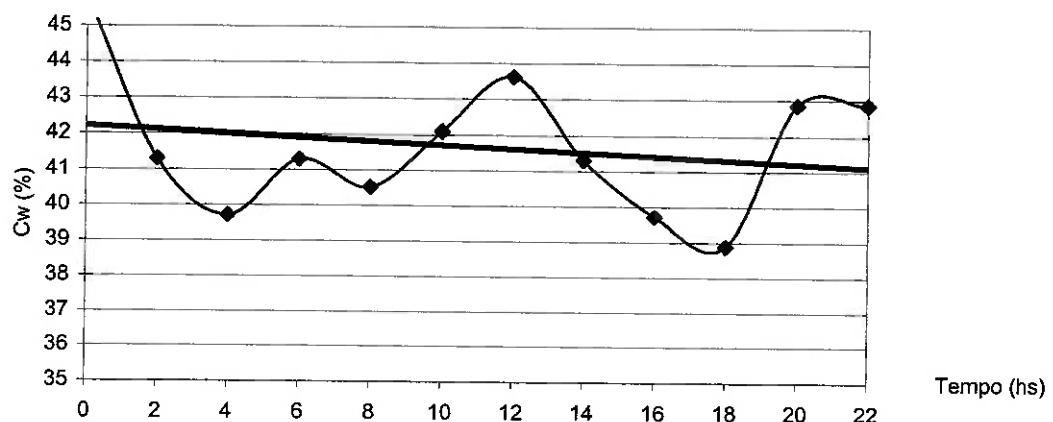
Analisemos agora as curvas de variabilidade dos fluxos decorrentes deste circuito de deslamagem e classificação, que se encontram nas páginas seguintes:

- Verificamos que as características da polpa de alimentação influem diretamente nas características dos produtos obtidos, pois note que as linhas de tendência dos produtos tem aproximadamente a mesma direção da linha de tendência da alimentação, em declínio para o ZVK 8 e em ascensão para o ZVK 16;
- A linha de tendência da alimentação do ZVK 8 também segue aproximadamente a mesma direção da linha de tendência do overflow do circuito de moagem, o que nos leva a concluir uma direta correlação no comportamento da polpa;

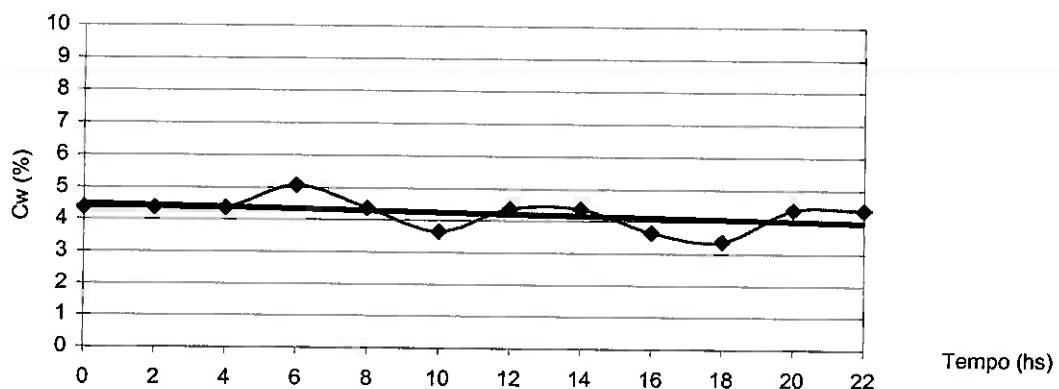
**Variabilidade da % de Sólidos - Alimentação ZVK8**



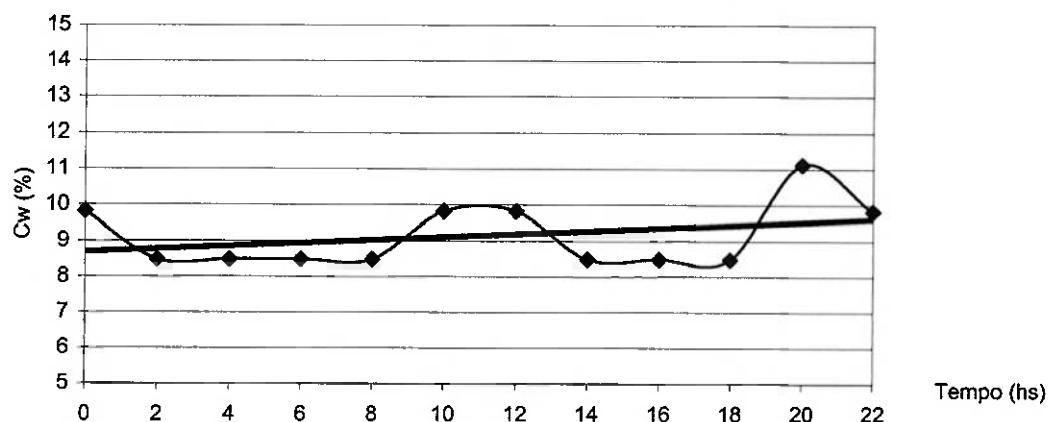
**Variabilidade da % de Sólidos - Under ZVK8**



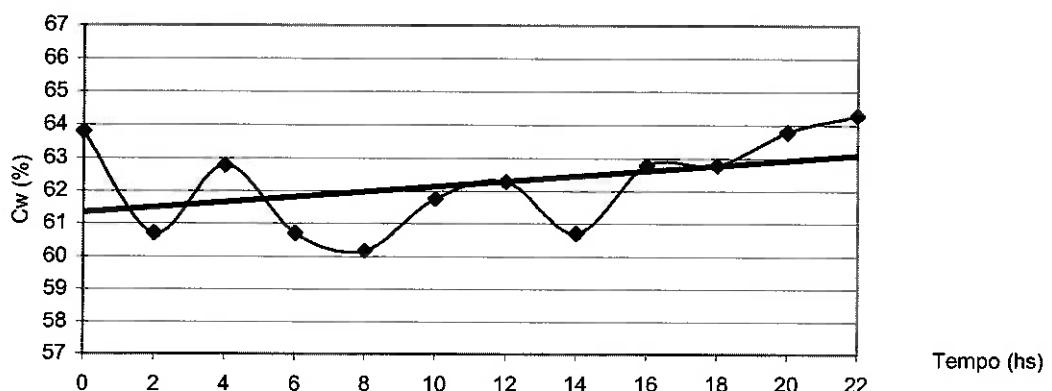
**Variabilidade da % de Sólidos - Over ZVK8**



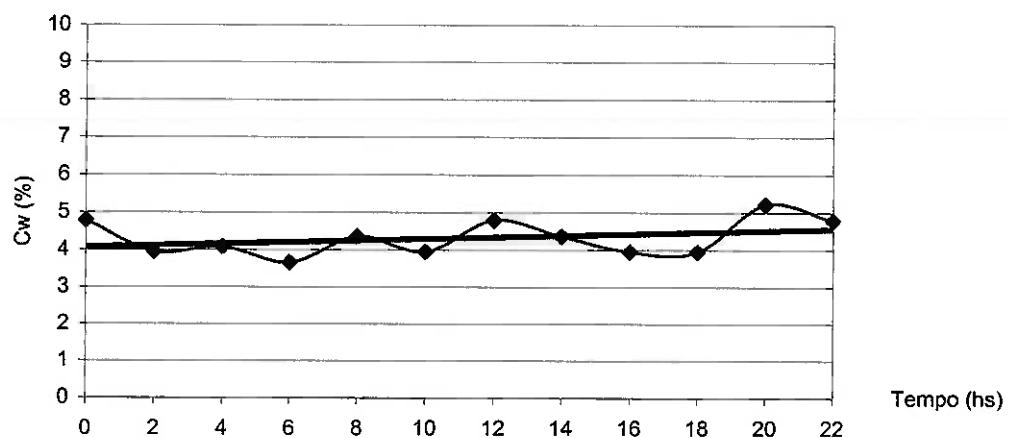
**Variabilidade da % de Sólidos - Alimentação ZVK16**



**Variabilidade da % de Sólidos - Under ZVK16**



**Variabilidade da % de Sólidos - Over ZVK16**



- A variabilidade do fluxo de alimentação possui uma maior influência no fluxo de underflow dos ciclones, o que é muito prejudicial ao processo, pois os fluxos de underflow são encaminhados para o circuito de flotação, de onde extrairemos o concentrado final;
- A porcentagem de sólidos do underflow está baixa, provocando uma perda de eficiência do ciclone, que deve trabalhar em uma faixa de 65% de sólidos. Deve-se, portanto, aumentar a porcentagem de sólidos do underflow, que pode ser alcançada, por exemplo, através do fechamento do apex.

Lembramos ainda que as variáveis de operação ou as propriedades do minério que está sendo classificado, influem no resultado da classificação no ciclone, conforme:

- A presença de grande quantidade de lamas afetará a viscosidade da polpa. Em consequência, é mais difícil para as partículas sedimentarem no campo centrífugo, e o diâmetro de corte tenderá a aumentar;
- A diminuição da porcentagem de sólidos na polpa tenderá a diminuir tanto a densidade como a viscosidade da mesma, facilitando a sedimentação das partículas e diminuindo o diâmetro de corte;
- O aumento da pressão de alimentação aumentará o campo centrífugo, resultando, portanto, numa diminuição do diâmetro de corte;
- O aumento do diâmetro do vortex finder facilitará o escoamento por esse orifício. Em consequência, aumenta a facilidade do overflow arrastar as partículas sólidas, aumentando portanto o diâmetro de corte;
- Partículas de densidade mais elevada separarão em diâmetros menores que partículas de densidade inferior, em função do efeito maior do campo centrífugo sobre elas;
- Partículas muito finas têm massa tão pequena que são indiferentes à ação do campo centrífugo e o seu comportamento é governado pela partição da água entre os dois produtos. Em outras palavras: elas são arrastadas pela água contida em cada um dos produtos e a sua partição será a mesma da água;
- O aumento do diâmetro do apex atua no sentido contrário ao do aumento do diâmetro do vortex finder, causando portanto o efeito oposto, isto é, diminuindo o diâmetro de corte. Já a diminuição do diâmetro do apex não atua dessa maneira em toda a extensão: as partículas grosseiras e, portanto, mais pesadas, são pesadas demais para serem arrastadas pelo overflow e por isto só podem sair pelo apex.
- Diminuindo-se o diâmetro do apex, dificulta-se a saída da polpa por esse orifício. Como as partículas pesadas só podem sair por ali, que deixa de sair é água, que passa a ser encaminhada para o overflow.

#### 6.4. Circuito de Flotação

O circuito de flotação é a última etapa de concentração do minério de calamina antes de se unir ao concentrado do minério de willemita.

A flotação é direta, ou seja, a separação é realizada numa suspensão em água (polpa), onde as partículas são obrigadas a percorrer um trajeto e, num dado instante, as partículas que se deseja flotar são levadas a abandoná-lo, tomando um rumo ascendente.

Lembramos também que a diferenciação das espécies minerais é dada pela capacidade de suas partículas se prenderem a bolhas de ar, com o conjunto partícula-bolhas deslocando-se ascendente para a superfície e, por fim, sendo retirado pela parte superior numa espuma. Esta propriedade de determinadas espécies minerais capturarem bolhas de ar na polpa é denominada hidrofobicidade, e pode ser conseguida através da introdução de reagentes específicos para cada processo (ver figura ao lado). Por outro lado, o material deprimido é arrastado pela corrente de água e sai por baixo, passando para a célula seguinte e, finalmente, sendo descarregado pela caixa de descarga.

O circuito de flotação é alimentado pelo condicionador (figura ao lado), sendo um tanque cilíndrico, de diâmetro e altura usualmente próximos. Note que sobre o tanque assenta-se uma viga que sustenta o mecanismo de acionamento (motor e redutor) de um eixo, na ponta do qual está um hélice, que agita a polpa deixando-a homogênea e em suspensão. A descarga é realizada por transbordo da polpa, a qual se encontra com teores de 15 a 16% de zinco, alimentando as células rougher.

O primeiro estágio da flotação é realizado pelas células rougher, que são as responsáveis pelo concentrado final de calamina, a um teor médio de 41% de zinco. Há, no entanto, uma célula cleaner de reserva, utilizada somente quando o concentrado rougher não atende os teores mínimos desejados. Não iremos tratar de seu estudo, pois este equipamento não é utilizado diariamente.



Fig. 9: Circuito de flotação (Rougher e Scavenger).

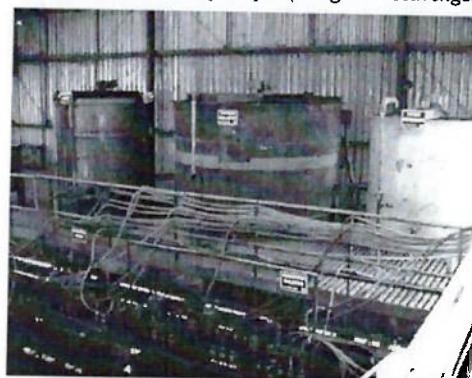


Fig. 10 : Tanques de reagentes.



Fig. 11:Condicionador.

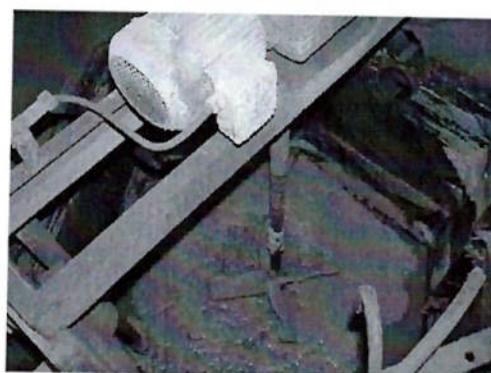


Fig. 12:Hélice do condicionador.

O rejeito rougher ( 11,6% de Zn) alimenta as células scavenger I, que tem o seu concentrado recirculado, pois o seu teor ainda não pode ser considerado um concentrado final. O rejeito scavenger I alimenta as células scavenger II, que, por sua vez, também tem o seu concentrado recirculado, alimentando o scavenger I . O seu rejeito, com um teor de 3 a 3,5% , é considerado o rejeito final.

Veja a seguir, nas tabelas seguintes, as características da polpa presente no circuito de flotação quanto a sua diluição e teores:

#### FLOTAÇÃO - %Sólidos

	Alim (%)	Conc(%)	Rej (%)
Média	31,17	30,43	17,33
Desv.Pad.	3,90	8,00	7,89

Data: 23/08/00

Tab. 9: Porcentagens de sólidos no circuito de flotação.

#### FLOTAÇÃO - Teores (%)

	Alim (%)	Under (%)	Over (%)	Rec (%)
Média	15,9	41,4	3,4	85,6
Desv.Pad.	0,15	3,10	0,19	

Data: 23/08/00

Tab. 10: Teores de Zn no circuito de flotação.

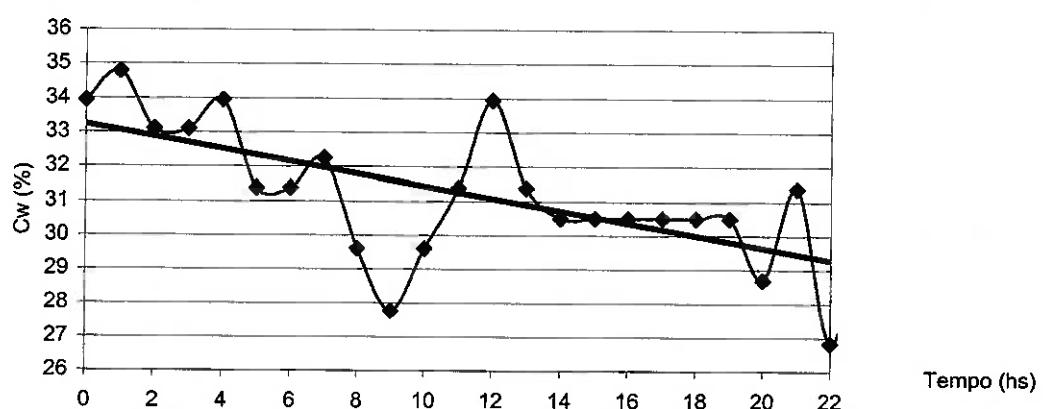
A variabilidade da porcentagem de sólidos e dos teores da flotação estão ilustradas pelos gráficos nas páginas seguintes, onde podemos notar que a variabilidade do fluxo de alimentação possui uma maior influência no rejeito da flotação quanto a porcentagem de sólidos, e uma maior influência no concentrado quanto aos teores de zinco.

## 7. RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE PROCESSO E A RECUPERAÇÃO

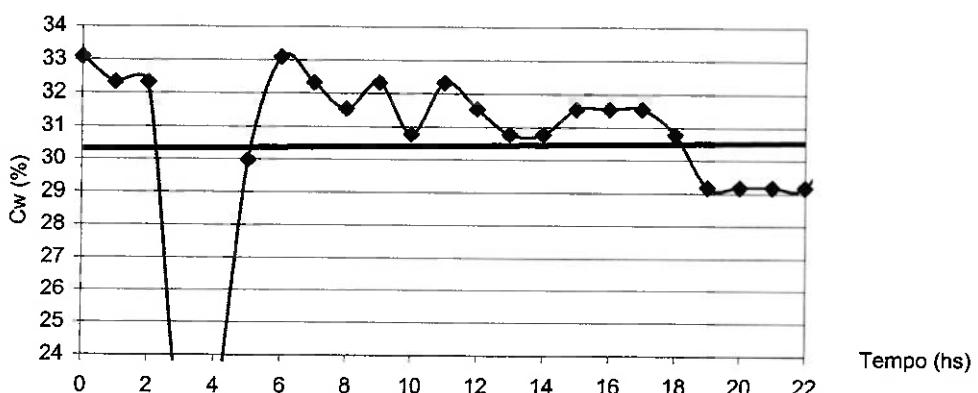
Uma operação de concentração tem como objetivo obter-se a máxima recuperação e o máximo enriquecimento. No entanto, isto é impossível de ser obtido simultaneamente, pois a alimentação é composta de partículas e cada partícula tem uma composição química própria, que será mantida, mesmo que ela vá para o concentrado ou para o rejeito.

A título de curiosidade, construímos alguns gráficos que relacionam porcentagens de sólidos e recuperação mássica, a fim de verificarmos quais seriam as consequências de possíveis modificações no processo. Construímos também gráficos

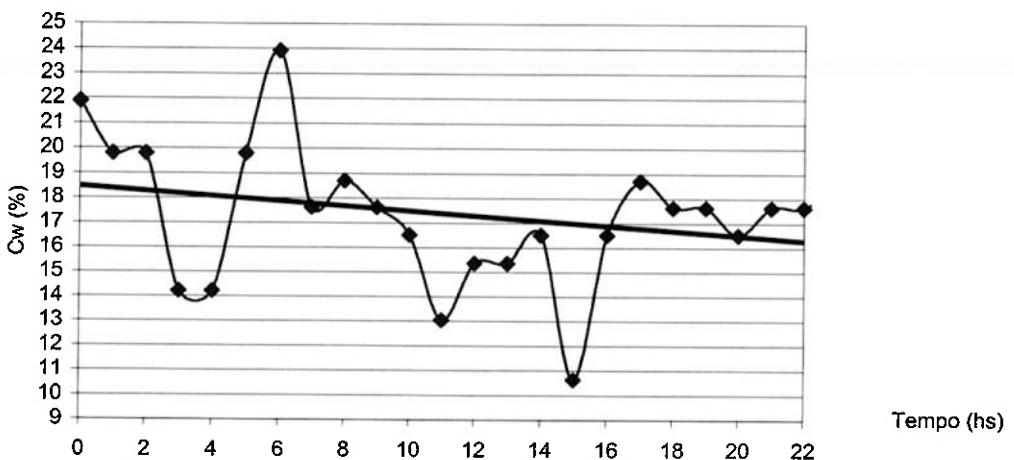
**Variabilidade da % de Sólidos - Alimentação da Flotação**



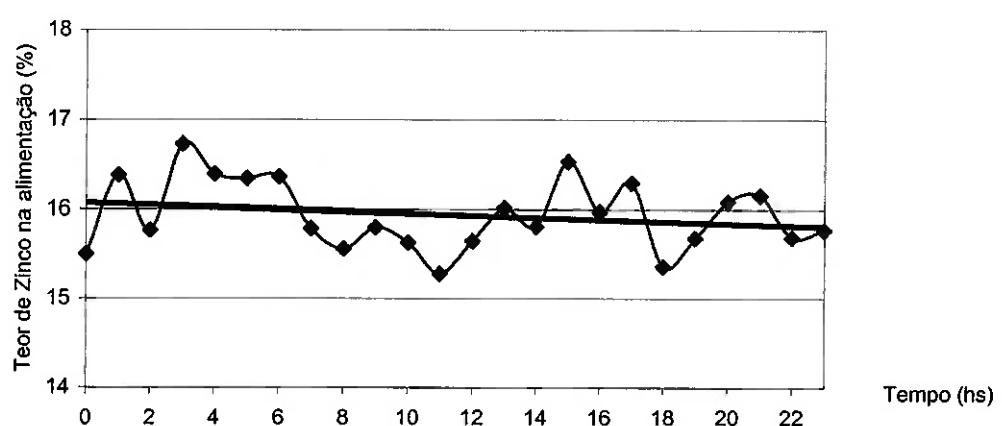
**Variabilidade da % de Sólidos - Concentrado da Flotação**



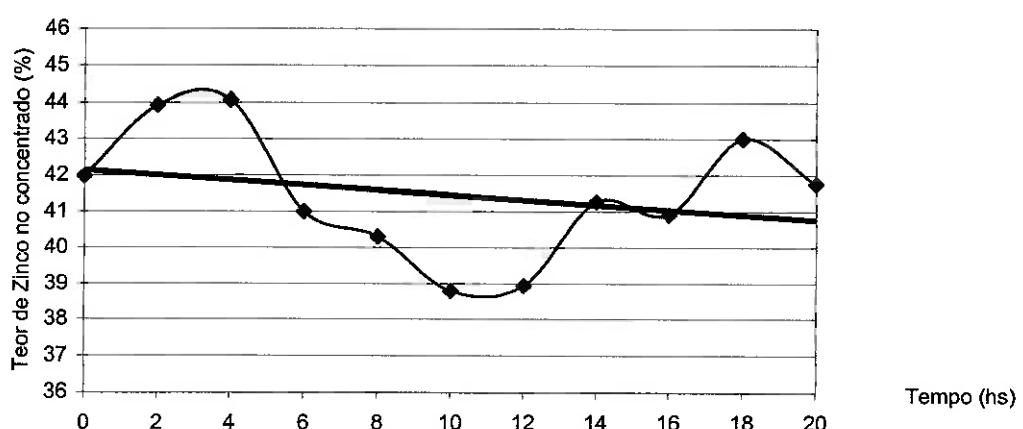
**Variabilidade da % de Sólidos - Rejeito da Flotação**



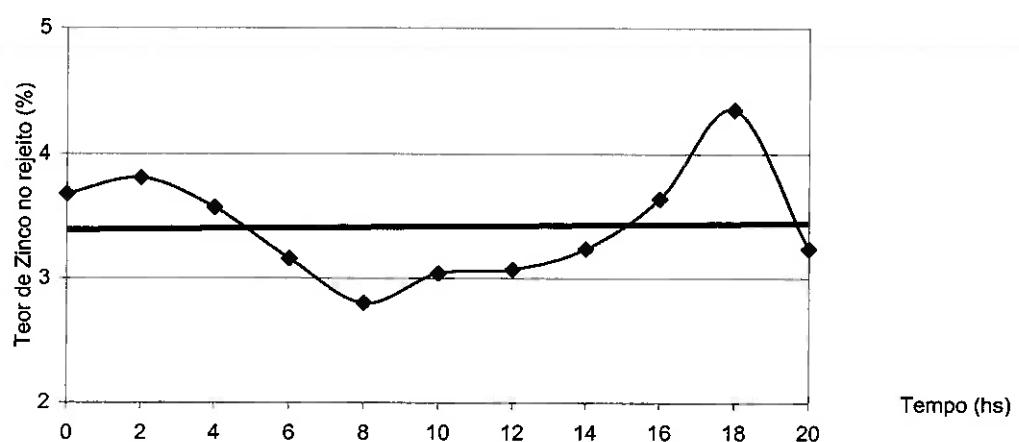
**Variabilidade do Teor da Alimentação da Flotação (%)**



**Variabilidade do Teor do Concentrado da Flotação (%)**



**Variabilidade do Teor do Rejeito da Flotação (%)**



que relacionam teores de Zn, Fe e CaO com a recuperação metalúrgica. Os dados coletados envolvem a série de amostragens equivalentes ao mês de agosto de dois mil.

Os gráficos se encontram nas páginas seguintes, onde podemos observar algumas tendências, como:

- Quando elevamos a porcentagem de sólidos na alimentação ou do underflow dos ciclones, a recuperação mássica tende a subir;
- Ao elevarmos o teor de alimentação de Zn no circuito de flotação, a recuperação metalúrgica tende a subir;
- Já se elevarmos o teor de Zn no concentrado do circuito de flotação, a recuperação metalúrgica tende a cair, o que pode ser também comprovado pelas curvas de seletividade;
- Se elevarmos os teores de Fe na alimentação, ou de Cao no concentrado, praticamente não temos alterações na recuperação metalúrgica.

Não podemos esquecer, porém, dos conceito das curvas de seletividade, em que a recuperação de um processo de concentração Lembramos, porém, que utilizamos apenas meios estatísticos para a construção destes gráficos, ou seja, plotamos uma série de amostras ao longo de um determinado tempo. Fica como sugestão para futuros trabalhos a determinação real das alterações nas variáveis de controle de um processo.

## 8. CONCLUSÃO

A tomada de decisões em uma usina de tratamento de minérios depende de uma equipe de engenheiros tratamentistas e operadores, que juntos, unindo prática, experiência e conhecimento, tornam possível o constante aprimoramento das técnicas de concentração de minérios.

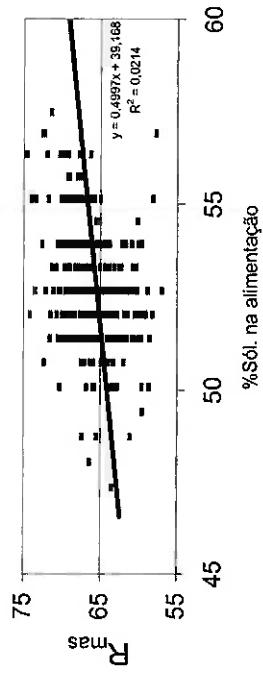
Sistemas computadorizados, como os mencionados neste trabalho, auxiliam no controle do processo, mas necessitam sempre estar acompanhados de “olhares críticos”, pois muitas vezes podem levar a conclusões errôneas caso sejam frutos de uma equivocada utilização e interpretação.

Portanto, são ferramentas que agilizam a conduta de uma usina de beneficiamento, proporcionando rápidas visualizações de pontos críticos do circuito. Não podemos deixar de relevar a importância de programas computadorizados cada vez melhores, mais ágeis e precisos, porém, envolvendo maiores custos.

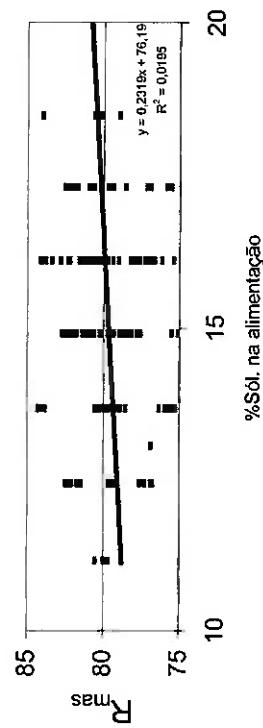
**Relação das Variáveis de Processo e a Recuperação nos ciclones RWB 4613 e ZVK 8**

**RWB 4613**

**%Sólidos na alimentação x  $R_{mas}$**

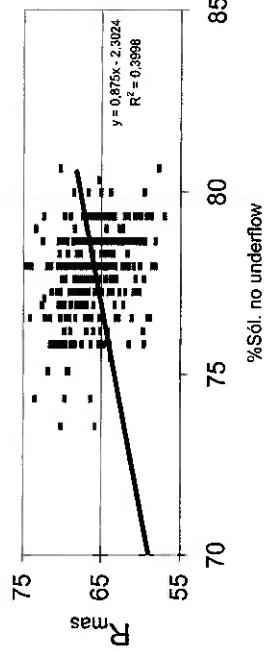


**%Sólidos na alimentação x  $R_{mas}$**

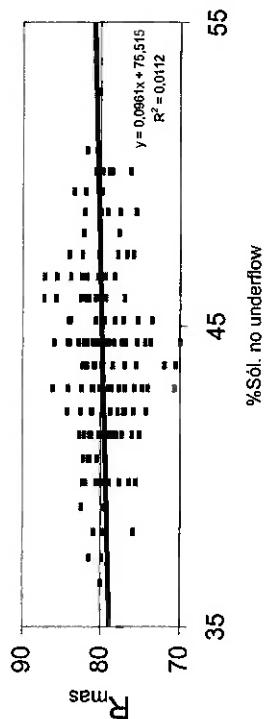


**ZVK 8**

**%Sólidos na underflow x  $R_{mas}$**

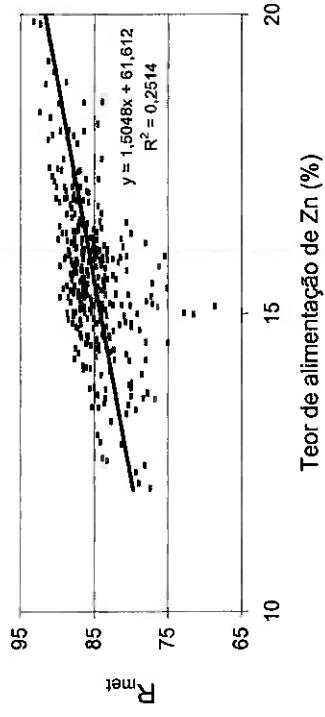


**%Sólidos na underflow x  $R_{mas}$**

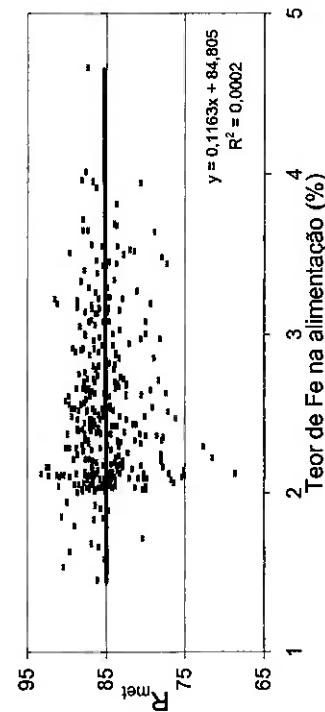


## Relação das Variáveis de Processo e a Recuperação Metalúrgica no circuito de Flotação

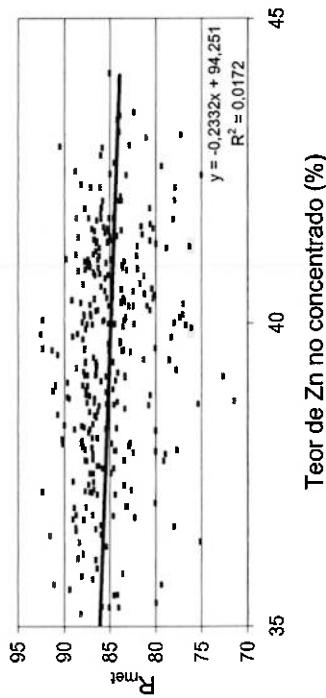
Teor de Zn na alimentação (%) x  $R_{met}$



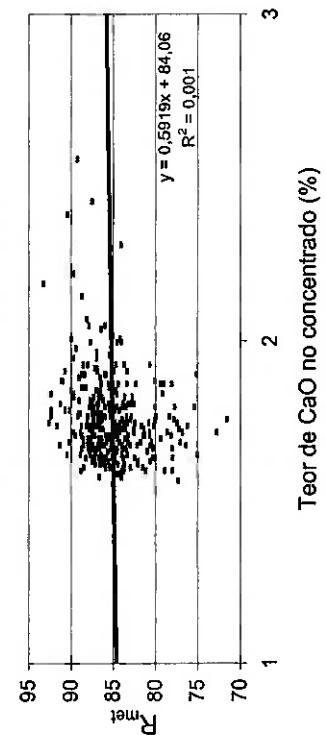
Teor de Fe na alimentação (%) x  $R_{met}$



Teor de Zn no concentrado x  $R_{met}$



Teor de CaO no concentrado (%) x  $R_{met}$



## **9. ANEXOS**

**MATRIZES - PROGRAMA DE BALANÇO DE MASSAS - BALMART**

**DESLAMAGEM**

**MOAGEM**

**FLOTAÇÃO**

Fluxos	Operações Unitárias	
	I	II
1	+1	0
2	-1	0
3	-1	+1
4	0	+1
5	0	-1
6	0	-1
7	0	+1

Fluxos	Operações Unitárias	
	I	II
1	+1	0
2	-1	+1
3	+1	-1
4	0	-1
5	+1	0
6	0	+1

Fluxos	Operações Unitárias	
	I	II
1	+1	0
2	-1	+1
3	+1	-1
4	0	-1
5	+1	0
6	0	+1

Fluxos	Operações Unitárias	
	I	II
1	+1	0
2	-1	+1
3	+1	-1
4	0	-1
5	+1	0
6	0	+1

Aplicação de Matrizes - Partição de Água

**MATRIZES - PROGRAMA DE BALANÇO DE MASSAS - BALMART**

Fluxos	BALANÇO GLOBAL					
	I	II	III	IV	V	VI
1	+1	0	0	0	0	0
2	-1	+1	0	0	0	0
3	-1	0	+1	0	0	0
4	0	-1	0	0	+1	0
5	0	-1	+1	0	0	0
6	0	0	-1	+1	0	0
7	0	0	0	-1	0	+1
8	0	0	0	-1	+1	0
9	0	0	0	0	-1	+1
10	0	0	0	0	-1	0
11	0	0	0	0	0	-1
12	0	0	0	0	0	-1
13	+1	0	0	0	0	0
14	0	+1	0	0	0	0
15	0	0	+1	0	0	0
16	0	0	0	+1	0	0
17	0	0	0	0	+1	0
18	0	0	0	0	0	+1
19	0	0	0	0	0	+1

**Aplicação de Matrizes - Partição de Água**

MATRIZES - PROGRAMA DE BALANÇO DE MASSAS - BALMART

Fluxos	BALANÇO TOTAL								
	Operações Unitárias								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0
3	-1	0	+1	0	0	0	0	0	0
4	0	-1	0	0	0	+1	0	0	0
5	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0
7	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	-1	+1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	-1	+1	+1	0	0
10	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	-1	+1	0	0
12	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
14	0	0	0	0	0	0	-1	+1	0
15	0	0	0	0	0	0	+1	-1	0
16	0	0	0	0	0	0	0	-1	+1
17	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1
18	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	+1	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	+1	0	0	0	0	0	0
22	0	0	+1	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	+1	0	0	0	0	0
24	0	0	0	+1	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	+1	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	+1	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	+1	0	0
28	0	0	0	0	0	0	+1	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	+1	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	+1

Aplicação de Matrizes - Partição de Água

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- NUNES, A. C.; *Sistema Computadorizado para Ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico*; Trabalho de Formatura; São Paulo - julho de 1992;
- DAMASCENO, P. F.de Toledo ; *Sistema Computadorizado para Ajuste e Fechamento de Balanço de Massas e Metalúrgico – Método Iterativo* ; Trabalho de Formatura; São Paulo – 1993;
- NUNES, A. C.; CHAVES, A. P.; *Sistema Computadorizado para Ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico*; Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP – Dept. de Eng. De Minas – BT/PMI/025 ; São Paulo – 1993;
- CHAVES, A.P.; *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios* ; Volume 1; Editora Signus LTDA./Brasil Mineral; São Paulo – 1996;
- CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C.L.; *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios* ; Volume 3; Editora Signus LTDA./Brasil Mineral; São Paulo – 1999;
- DA LUZ, A.B.; ALMEIDA, S.L.;POSSA, M.V. *Tratamento de Minérios*.CNPq / CATEM / MCT, Rio de Janeiro, 1998.
- MORENO, A.G. ; *Relatório Parcial de Estágio III – Mina de Vazante* ; agosto de 2000;
- LYNCH, A.J. *Mineral Crushing and Grinding Circuits: their simulation, optimization, design and control* Amsterdam, Elsevier, 1977. (Developments in Mineral Processing, v.1.);

