

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia de Minas

PMI-500 ~ TRABALHO DE FORMATURA EM ENGENHARIA DE MINAS

Tema: "MELHORIA DE DESEMPENHO EM ENSAIOS DE DESLAMAGEM"

Aluna:
Paula Sayuri Seki

Orientador:
Toru Otani - Especialista da JICA
Japan International Cooperation Agency

Co-orientador:
Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves - Professor Titular
Depto. de Engenharia de Minas da EPUSP

novembro de 1992

TF-1992

Se 47m

Syano 146?554

M1992A

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700005436

IV . METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	15
1. Metodologia para determinação granulométrica	15
2. Equipamento utilizado para determinação granulométrica	16
2.1. Especificações	16
2.2. Princípio de funcionamento	17
3. Considerações sobre a determinação granulométrica	18
3.1. Uso de dispersantes	18
3.2. Aglomeração	18
3.3. Bolhas de ar	18
4. Aferição do equipamento	18
5. Tratamento dos resultados para avaliação dos processos	19
6. Modelo teórico do ensaio	19
 V . DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO	 23
1. Material utilizado e densidade real obtida	23
2. Condições do ensaio	23
3. Resultados obtidos através das análises granulométricas	27
4. Avaliação do desempenho das deslamagens	33
4.1. Cálculo das partições	33
a) Processo com um estágio de deslamagem	33
b) Processo com dois estágios de deslamagem	34
c) Processo com três estágios de deslamagem	35
4.2. Cálculo dos desvios inter-quartis centrais (E) das curvas	35
 VI . DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	 40
 VII . CONCLUSÕES	 41
 VIII . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 42

I . INTRODUÇÃO

1. Apresentação do estudo

Este estudo refere-se à realização de ensaios de deslamagem tendo por objetivo a melhoria do desempenho de um processo de separação.

1.1. Definição de lama

Lama são as partículas finas, com granulometria inferior a 10 μ m.

As lamas afetam muitas operações de concentração, como as separações densitárias ou a flotação, sendo, por isso necessário eliminá-las. Dá-se o nome de deslamagem à operação de sua eliminação.

1.2. Considerações sobre o ensaio

No ensaio programado para o presente estudo, adotou-se a separação por granulometria, onde o processo utilizado para separar a lama sobrenadante foi o sifonamento.

Para alcançar uma condição próxima ao regime de queda livre, utilizou-se polpa com porcentagem de sólidos de 3%. Deve-se considerar, entretanto, que desta forma uma parte da fração fina ficará no decantado, pois na realidade as condições adotadas levam ao regime de queda impedida. Por outro lado, é provável que ocorra também mistura da parte grosseira na fração fina.

Para calcular a partição e a medida de dispersão da curva obtida, determinou-se a distribuição granulométrica das frações grosseira e fina obtidas utilizando um determinador granulométrico, e pesou-se estes produtos.

Avaliando o efeito da repetição do processo de deslamagem, na sequência realizaram-se duas repetições do sifonamento, preparando a polpa com o material da fração grosseira obtida pelo sifonamento anterior, levando o volume da polpa ao mesmo volume utilizado anteriormente. Desta forma pretende-se melhorar o desempenho do processo de deslamagem como um todo. As condições das etapas do ensaio e da determinação das granulometrias serão citadas nos respectivos itens.

ÍNDICE

I . INTRODUÇÃO	1
1. Apresentação do estudo	1
1.1. Definição de lama	1
1.2. Considerações sobre o ensaio	1
2. Objetivos da deslamagem	2
2.1. Considerações sobre deslamagem (I)	2
2.2. Considerações sobre deslamagem (II)	3
2.3. Definição e objetivos da deslamagem	3
3. Objetivos do estudo	4
II . CONHECIMENTOS GERAIS	5
1. Métodos de deslamagem adotados na indústria	5
2. Diâmetro mediano de separação	5
3. Regime de queda livre e de queda impedida de partículas	5
4. Velocidade terminal de queda de partículas	6
5. Mistura de partículas finas na parte decantada	7
6. Mistura de partículas grosseiras nas lammas	7
7. Curva de partição de uma classificação granulométrica	7
8. Problema da diferença de peso específico em um processo de classificação	9
9. Fator de conversão de granulometria devido à densidade	10
III . METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	11
1. Fluxograma geral	11
2. Método de determinação da densidade do material	11
2.1. Aparelhagem	12
2.2. Procedimento	12
3. Preparação da amostra	13
4. Procedimento de deslamagem	13

2. Objetivos da deslamagem

Antes de conceituar "deslamagem" e definir seus objetivos, gostaria de considerar sobre alguns casos genéricos, comumente adotados na indústria e em laboratórios.

2.1. Considerações sobre deslamagem (I)

No exemplo da Figura 01, o processo ③ não é chamado de deslamagem, pois o objetivo da classificação granulométrica neste caso é obter um melhor desempenho total na flotação, o que se consegue através da adoção de condições otimizadas para as frações grosseira e fina, respectivamente. Portanto não se trata de eliminação de partículas finas.

Na Figura 02, descreve-se um exemplo de adequação granulométrica para flotação. A operação ③ não é considerada deslamagem, pois seu objetivo é separar as partículas finas que não requerem moagem, alimentando diretamente a flotação. Logo, neste caso também não se trata da eliminação de partículas finas.

Figura 01 - Flotação por frações granulométricas

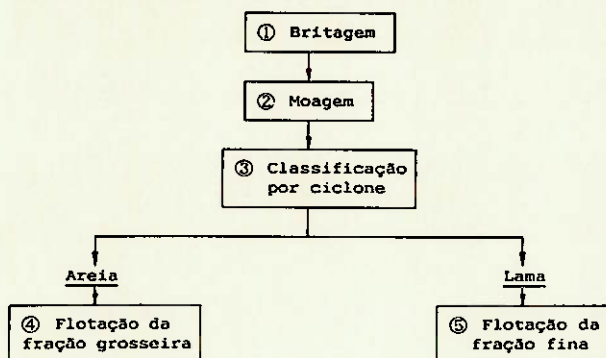
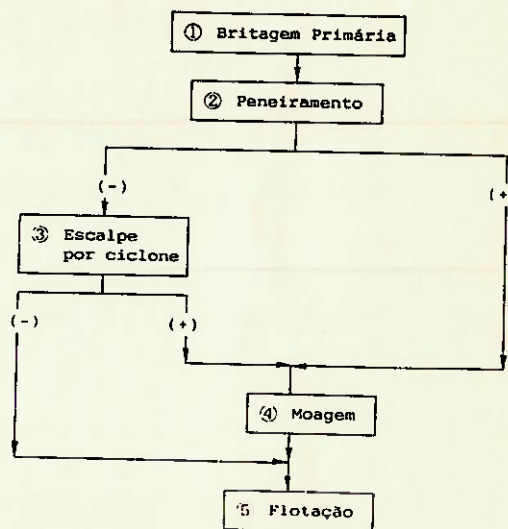


Figura 02 - Exemplo de adequação granulométrica para flotação



Os resultados abaixo apresentados foram obtidos calculando-se a equação de regressão polinomial pelo método dos mínimos quadrados, a partir dos dados fornecidos pelo determinador granulométrico. Os gráficos representativos destas distribuições estão ilustrados nas Figuras 11, 12, 13 e 14.

Descreve-se a seguir a equação de regressão utilizada para cada produto.

LAMA 1: $Y = -2,368 \times 10^{-2} \cdot X^4 + 0,623 \cdot X^3 - 5,435 \cdot X^2 + 9,520 \cdot X + 89,871$

LAMA 2: $Y = 1,604 \times 10^{-3} \cdot X^5 - 4,894 \times 10^{-2} \cdot X^4 + 0,570 \times X^3 - 3,384 \cdot X^2 + 5,115 \cdot X + 96,074$

LAMA 3: $Y = 3,494 \times 10^{-2} \cdot X^3 - 1,261 \cdot X^2 + 7,069 \cdot X + 86,510$

DECANTADO: $Y = 1,225 \times 10^{-1} \cdot X^2 - 10,945 \cdot X + 2,461 \times 10^2$

onde Y: % retida acumulada

X: granulometria da partícula (μm)

Tabela 03 - Dados obtidos na curva de regressão para distribuição granulométrica (% retida acumulada)

GRANULOMETRIA	DECANTADO	LAMA 1	LAMA 2	LAMA 3
μm	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$
+ 20	76,20	—	—	2,99
+ 18	88,78	—	—	8,95
+ 16	100,00	—	—	19,91
+ 14	—	—	—	34,19
+ 12	—	6,32	40,28	50,13
+ 10	—	27,39	50,30	66,04
+ 8	—	39,99	64,60	80,25
+ 6	—	55,13	77,13	91,07
+ 4	—	74,78	88,02	96,85
- 4	—	100,00	100,00	100,00

As massas obtidas de cada produto são as seguintes:

Tabela 04 - Massas dos produtos obtidos

	DECANTADO	LAMA 1	LAMA 2	LAMA 3	TOTAL
MASSA (g)	24,75	21,83	11,42	3,19	61,19

perda de material = massa final-massa inicial = $61,19/63,00 = 2,9\%$

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

DECANTADO

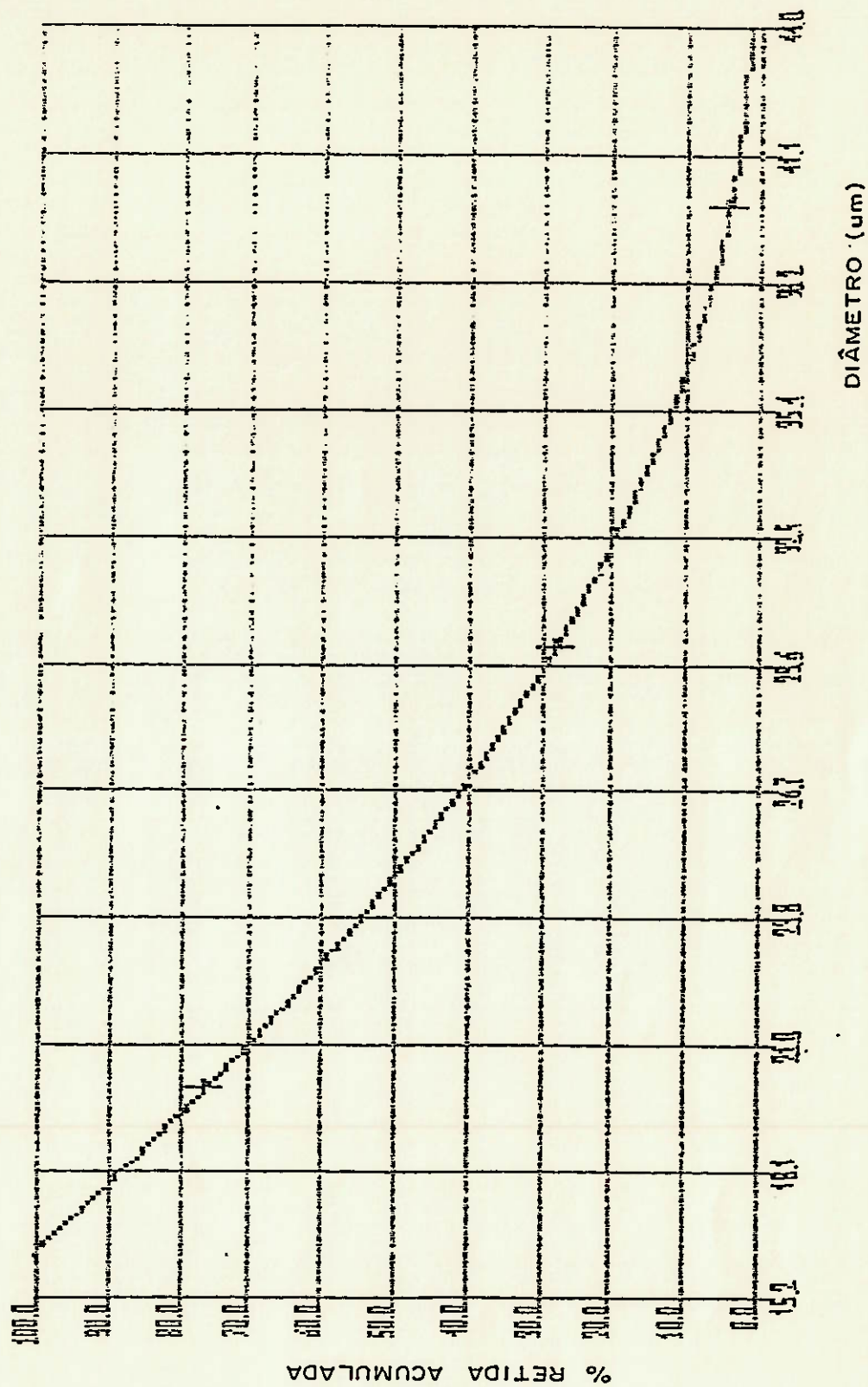


FIGURA 11

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

LAMA 1

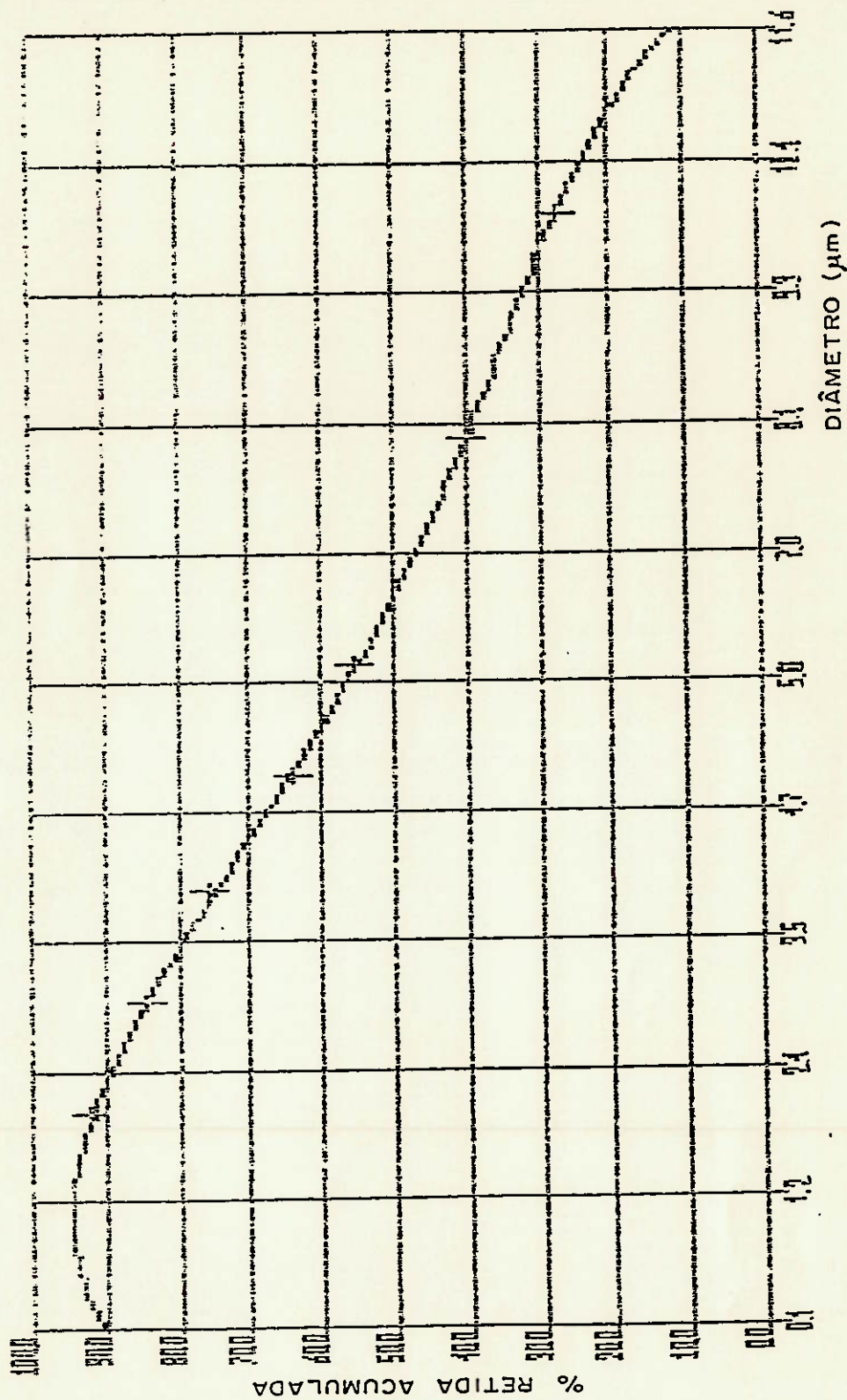


FIGURA 12

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

LAMA 2

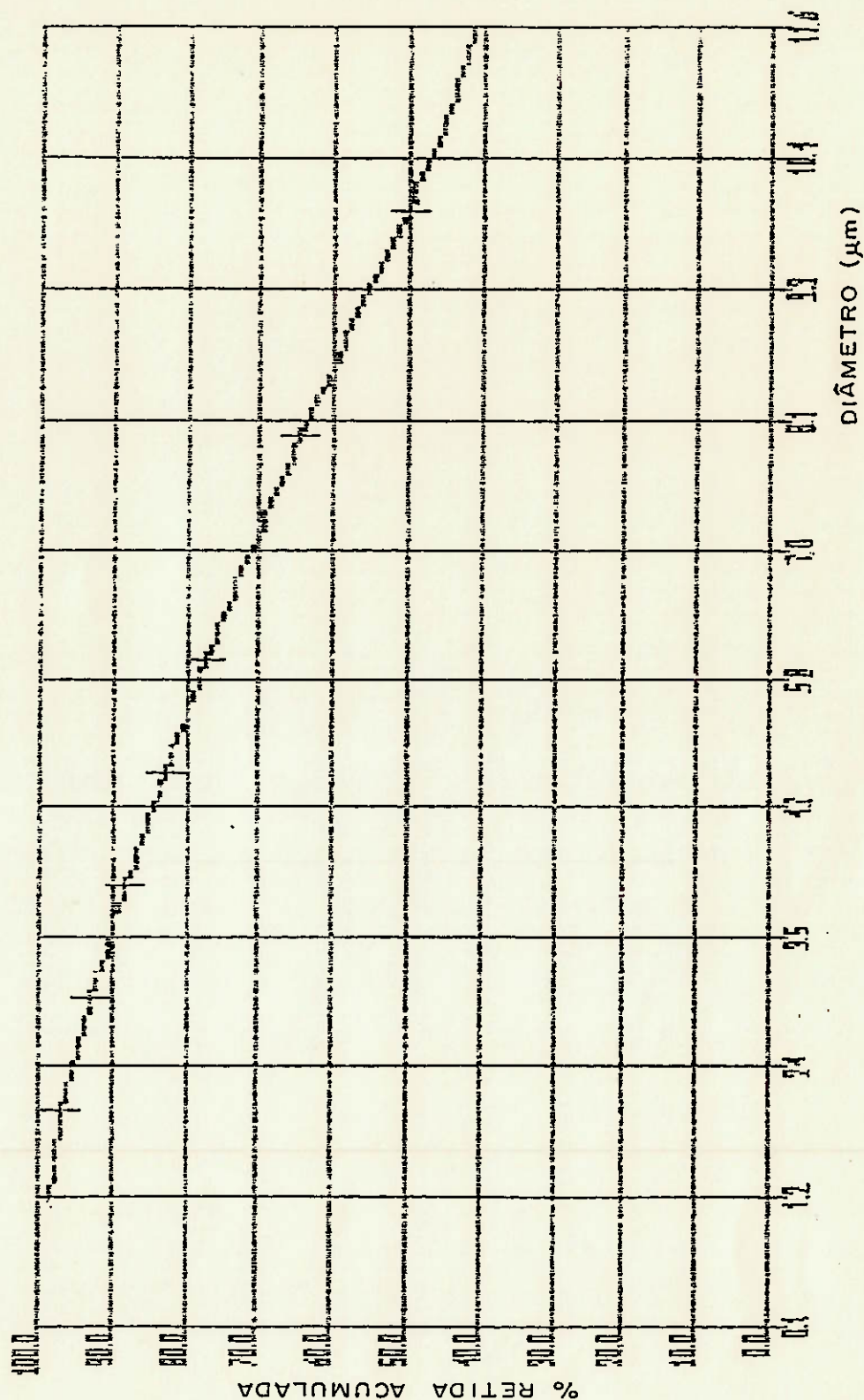


FIGURA 13

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

LAMA 3

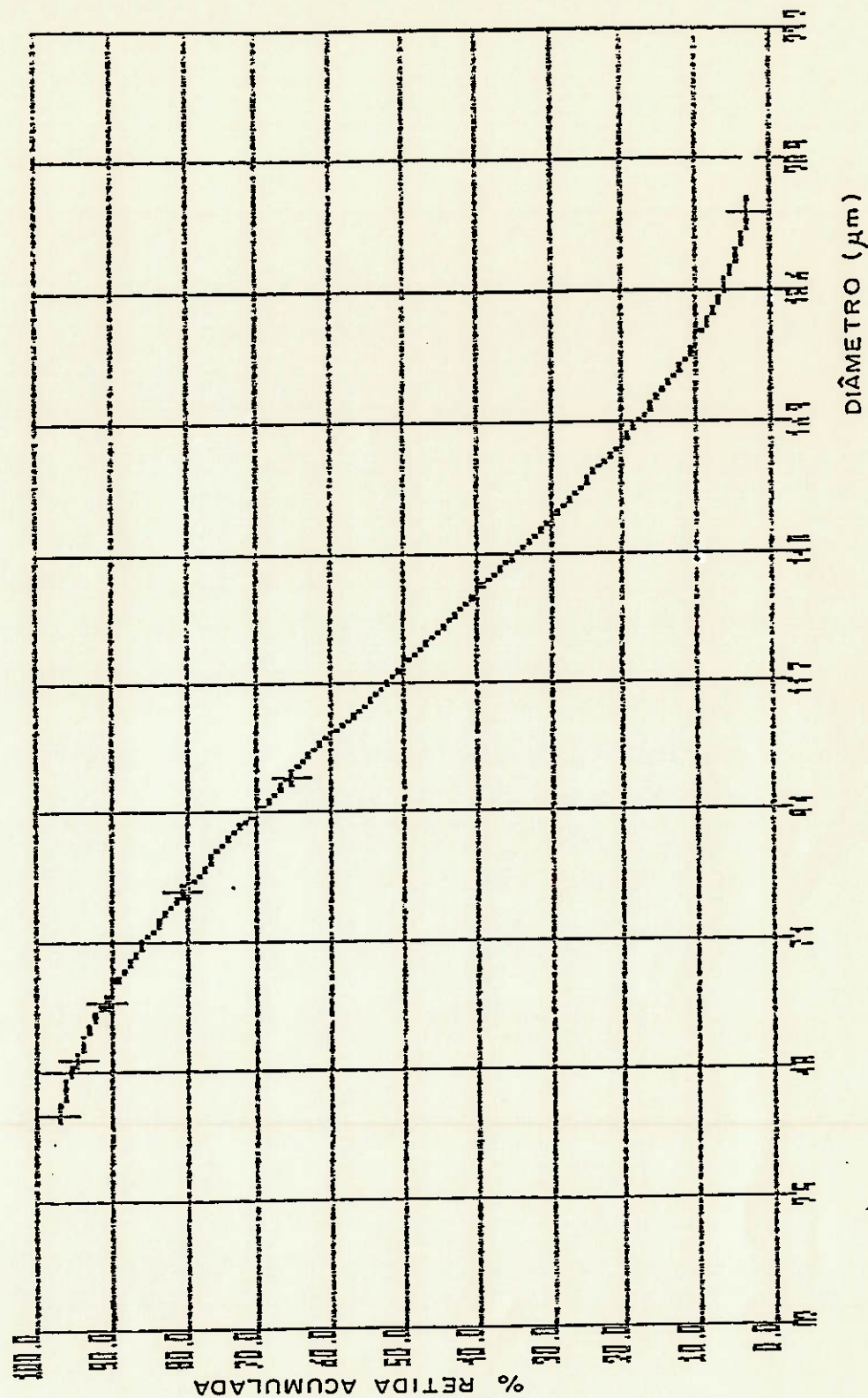


FIGURA 14

A partir dos dados das Tabelas 02 e 03, calcula-se a massa retida por fração granulométrica:

Tabela 05 - Massa retida por fração granulométrica

GRANULOM.	DECANTADO	LAMA 1	LAMA 2	LAMA 3	TOTAL
μm	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$
+ 20	18,8595	—	—	0,0954	18,9549
+ 18	3,1136	—	—	0,1901	3,3037
+ 16	2,7770	—	—	0,3496	3,1266
+ 14	—	—	—	0,4555	0,4555
+ 12	—	1,3797	4,6000	0,5085	6,4882
+ 10	—	4,5996	1,1443	0,5075	6,2514
+ 8	—	2,7506	1,6331	0,4533	4,8370
+ 6	—	3,3051	1,4401	0,3452	5,0904
+ 4	—	4,2896	1,2345	0,1844	5,7085
- 4	—	5,5055	1,3681	0,1005	6,9741

4. Avaliação do desempenho das deslamagens

4.1. Cálculo das partições

Para o cálculo das partições e para a elaboração das respectivas curvas, utilizou-se o diâmetro médio de cada fração e as curvas foram obtidas através da regressão polinomial dos dados abaixo, como descrito anteriormente.

As curvas estão descritas por processo nas Figuras 15, 16 e 17, e a Figura 18 ilustra comparativamente as três curvas.

② Processo com um estágio de deslamagem

$$Z = -5,217 \times 10^{-2} \cdot X^3 + 1,816 \cdot X^2 - 12,547 \cdot X + 43,384$$

onde Z: partição para underflow (%)

X: granulometria da partícula (μm)

Tabela 06 - Partição do processo ⑥

GRANULOMETRIA	PARTIÇÃO
μm	%
+ 20	100,00
+ 18	100,00
+ 16	100,00
+ 14	100,00
+ 12	78,74
+ 10	26,42
+ 8	43,13
+ 6	35,07
+ 4	24,86
- 4	21,06

⑥ Processo com dois estágios de deslamagem

$$Z = 4,204 \times 10^{-1} \cdot X^2 - 2,655 \cdot X + 2,531$$

onde Z: partição para underflow (%)

X: granulometria da partícula (μm)

Tabela 07 - Partição do processo ⑥

GRANULOMETRIA	PARTIÇÃO
μm	%
+ 20	100,00
+ 18	100,00
+ 16	100,00
+ 14	100,00
+ 12	7,84
+ 10	8,12
+ 8	9,37
+ 6	6,78
+ 4	3,23
- 4	1,44

© Processo com três estágios de deslamagem

$$Z = 3,571 \times 10^{-2} \cdot X^3 - 0,461 \cdot X^2 + 0,411 \cdot X + 3,345$$

onde Z: partição para underflow (%)

X: granulometria da partícula (μm)

Tabela 08 - Partição do processo ©

GRANULOMETRIA	PARTIÇÃO
μm	%
+ 20	99,50
+ 18	94,25
+ 16	88,82
+ 14	—
+ 12	—
+ 10	—
+ 8	—
+ 6	—
+ 4	—
- 4	—

4.2. Cálculo dos desvios inter-quartis centrais (E) das curvas

Os valores do d_{25} , d_{50} e d_{75} foram obtidos na curvas de partição que foram elaboradas.

Tabela 09 - Dados obtidos nas curvas de partição

PROCESSO	Ⓐ	Ⓑ	©
$d_{50} (\mu m)$	10,3	14,2	16,8
$d_{25} (\mu m)$	6,7	11,1	14,9
$d_{75} (\mu m)$	13,3	16,7	18,3
E	3,3	2,8	1,7

onde Ⓐ: Processo com um estágio de deslamagem
 Ⓑ: Processo com dois estágios de deslamagem
 ©: Processo com três estágios de deslamagem

PARTIÇÃO PROCESSO COM UMA DESLAMAGEM

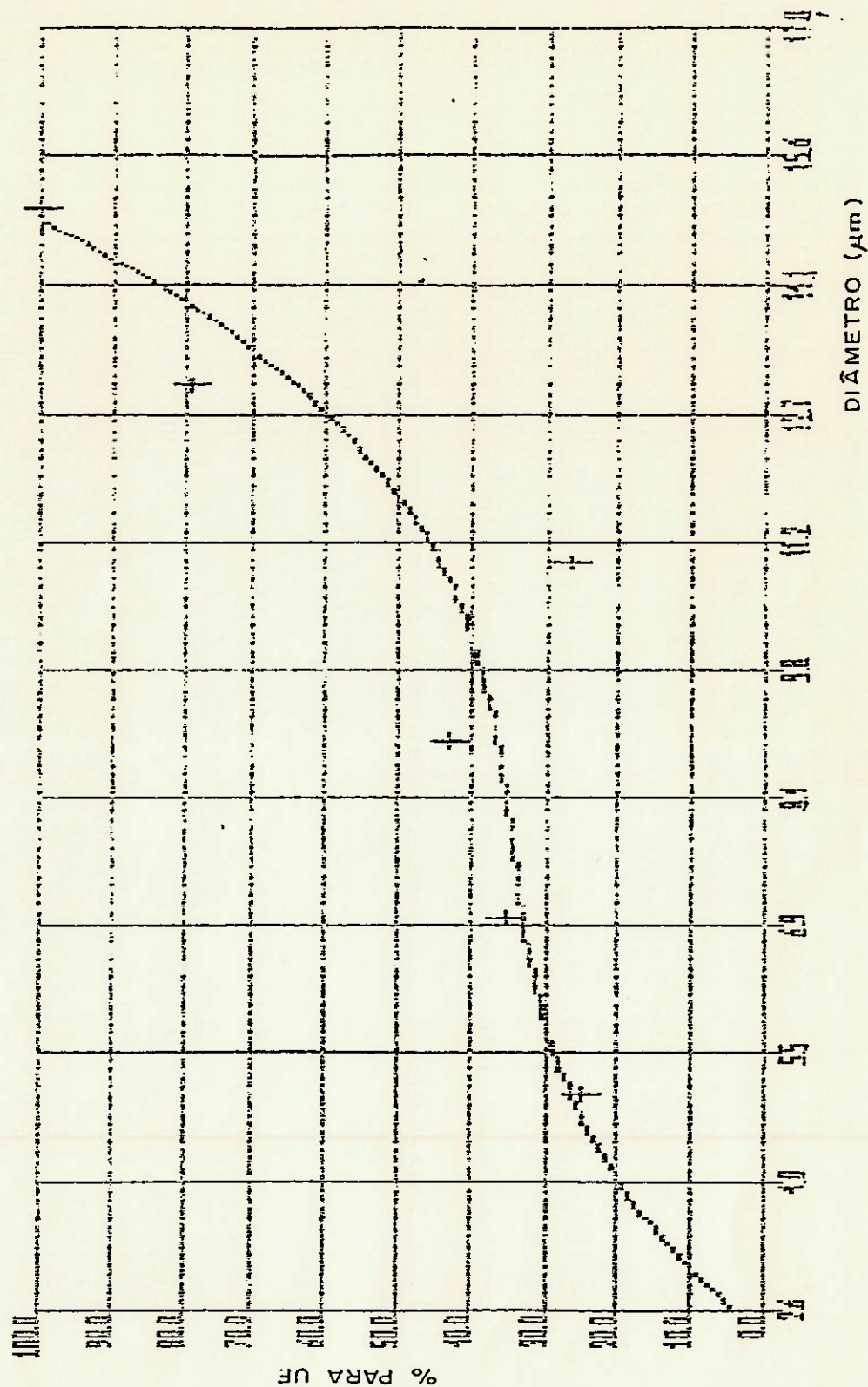


FIGURA 15

PARTIÇÃO PROCESSO COM UMA REPETIÇÃO

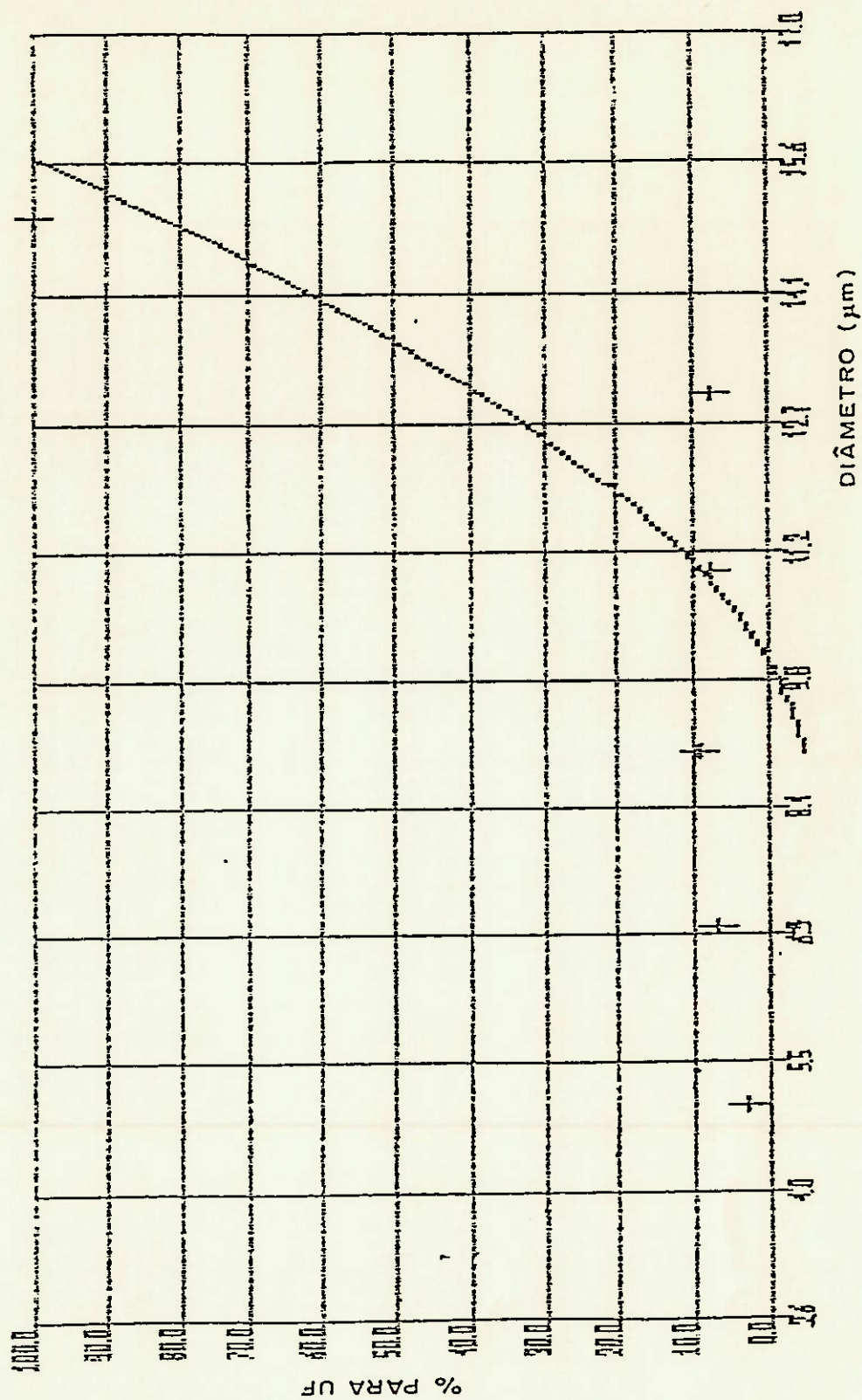


FIGURA 16

PARTIÇÃO PROCESSO COM DUAS REPETIÇÕES

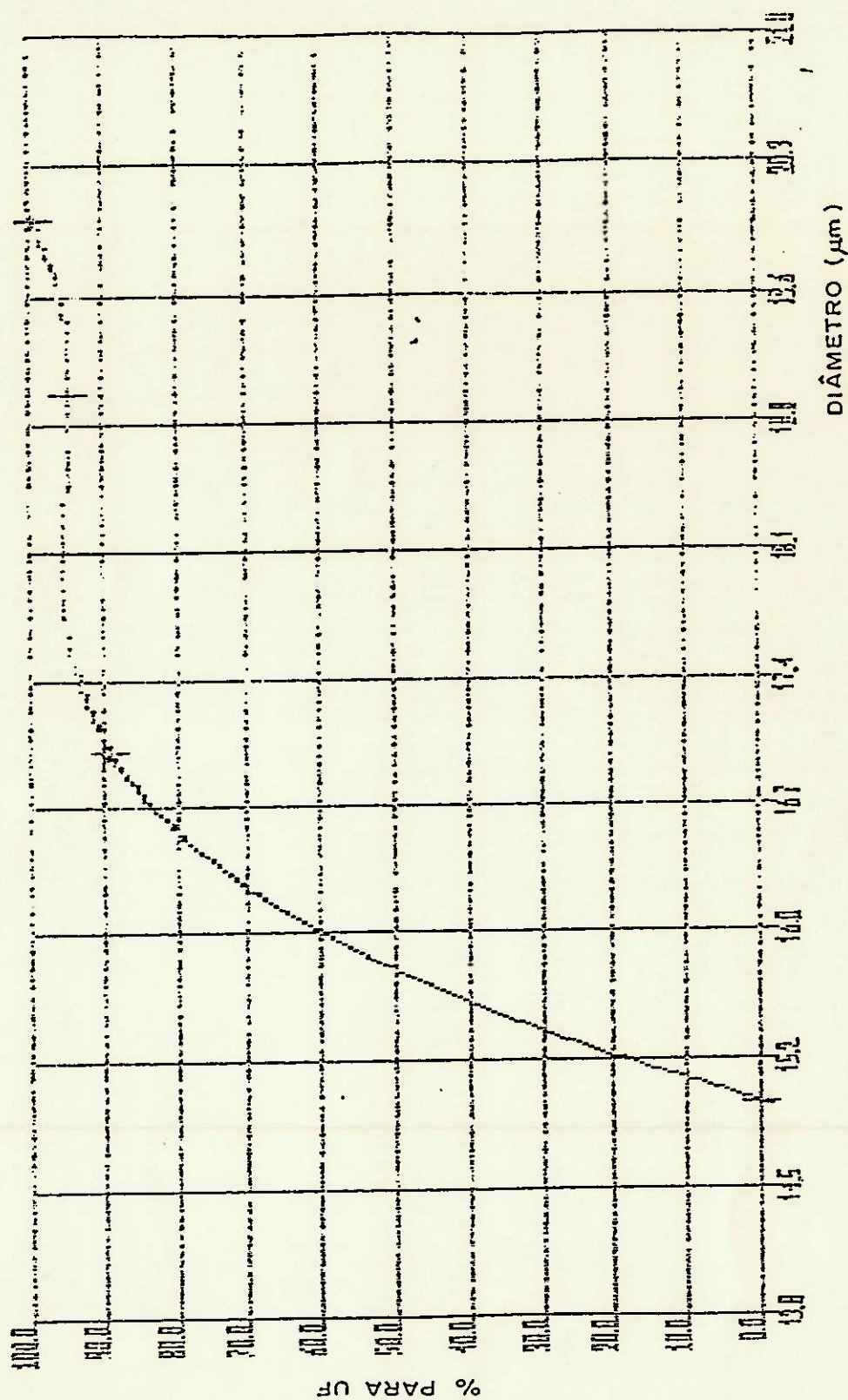


FIGURA 17

PARTIÇÃO COMPARAÇÃO ENTRE OS TRÊS PROCESSOS

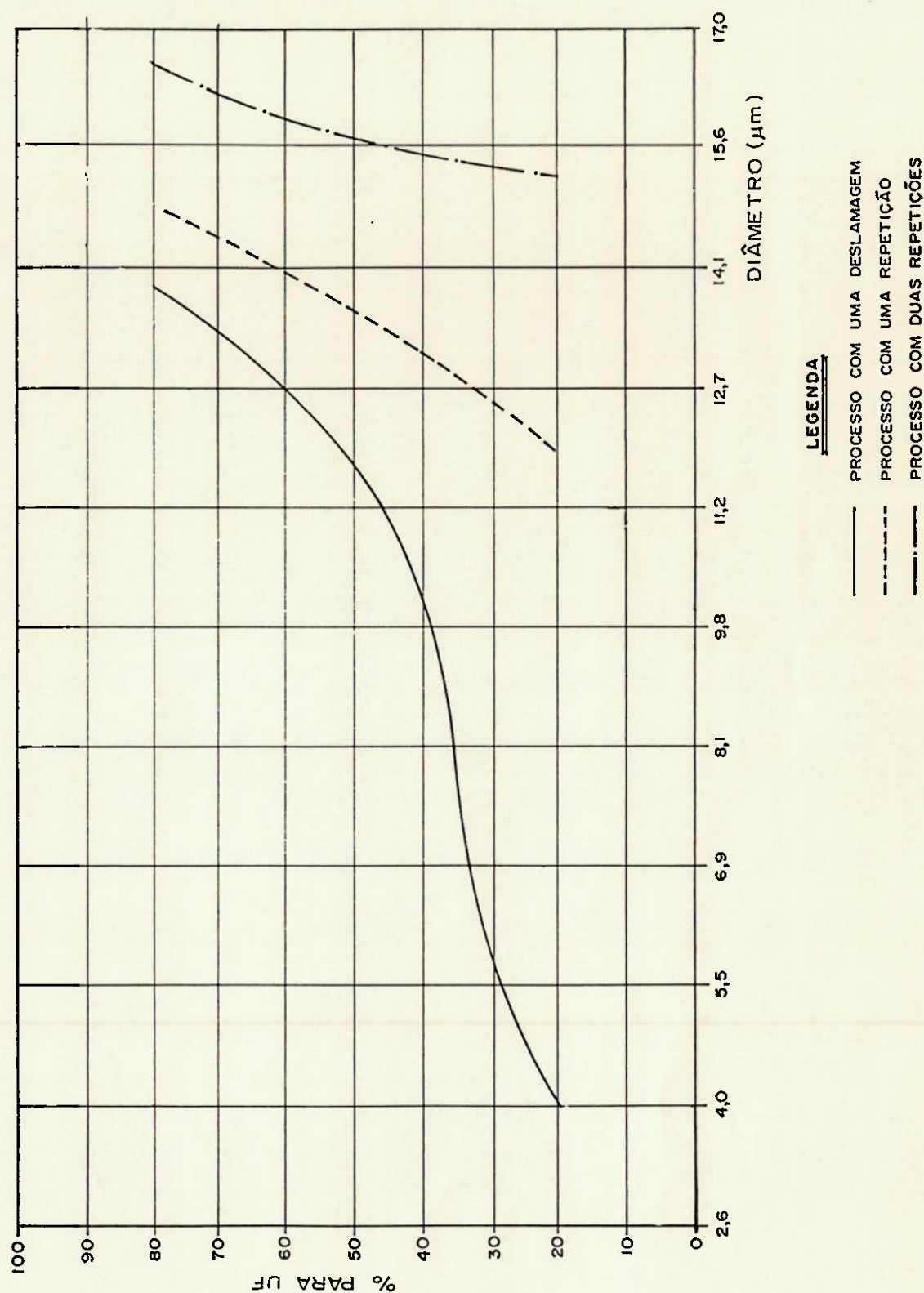


FIGURA 18

VI . DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A) Na determinação granulométrica do decantado pode-se observar que o equipamento não acusou a existência de partículas abaixo de $16\mu\text{m}$. Tal fato é impossível na prática, mas este resultado leva a crer que a porcentagem de finos era bastante reduzida e por isso o equipamento não pôde detectar a sua existência. Outra possibilidade é que houve aglomeração, apesar dos cuidados tomados em relação a este problema.

B) Na distribuição granulométrica da lama 3, observa-se a existência de partículas grosseiras, o que deve ser atribuído a um erro no sifonamento causado pelo posicionamento incorreto do tubo de vidro conectado à extremidade da mangueira.

C) A perda de material ocorrida em todo o ensaio foi de 2,9%, o que pode ser considerado razoável uma vez que a massa utilizada foi pequena (63g).

D) Comparando os resultados do ensaio com os valores calculados para o modelo teórico, pode-se verificar que há similaridade entre os resultados, sendo que a diferença é atribuída à interferência entre as partículas durante a queda. No ensaio, o d_{50} do processo com três estágios de deslamagem foi o que mais se aproximou do pretendido e seu valor é superior ao do modelo. Esperava-se que tivesse um valor inferior ao calculado no modelo, devido à mistura de partículas finas no decantado. Tal fato deve ser observado como um erro proveniente da mistura de partículas grosseiras na lama 3.

VII . CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que a repetição sucessiva de um processo de deslamagem permite melhorar o desempenho da operação, aumentando a agudeza da separação.

Cabe ressaltar que os ensaios referentes ao presente estudo visavam a recuperação da lama contida no material decantado, entretanto, as condições adotadas também reduziram a mistura de partículas grosseiras na lama.

Pretendia-se obter d_{50} na granulometria de $18,5 \mu m$ da sílica, resultado que não pôde ser alcançado, mas comprovou-se que repetindo os sifonamentos, e assim reduzindo a quantidade de lama contida no decantado, obteve-se diâmetros médios de separação cada vez mais próximos do pretendido.

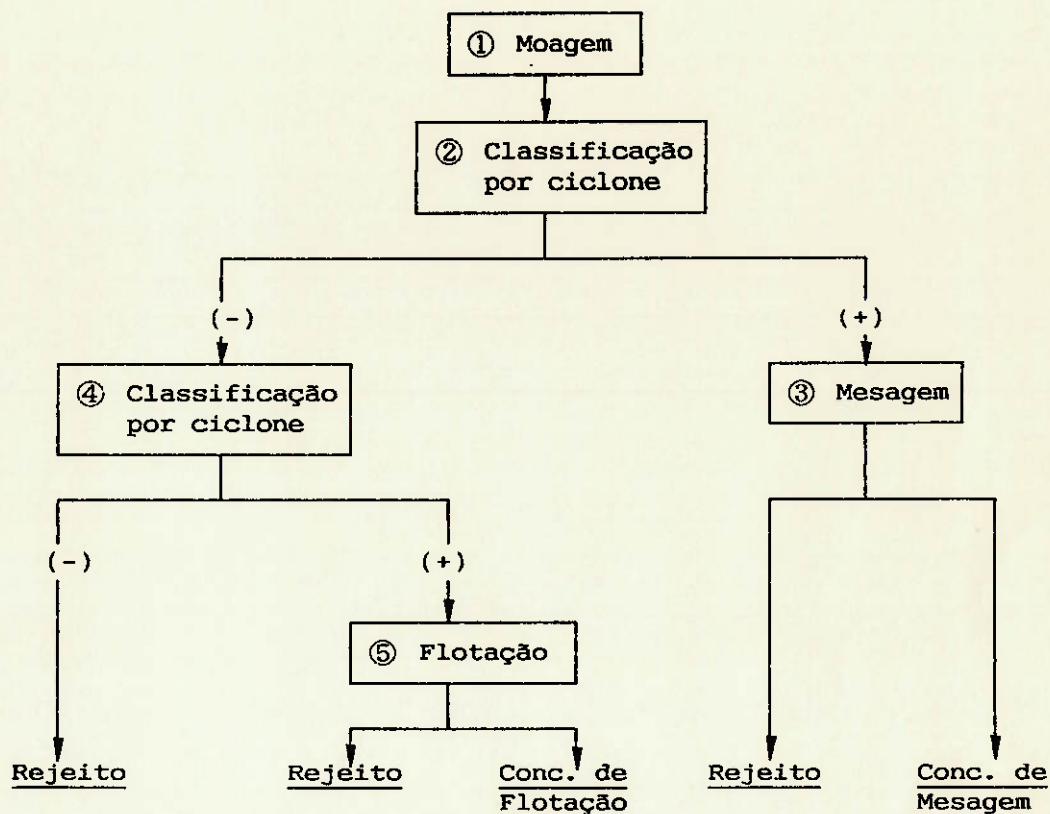
VIII . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TAGGART, A. F. Handbook of Mineral Dressing. New York, John Willey / London, Chapman and Hall, 1945, section 8 and 15.
2. CHAVES, A. P. Partição. São Paulo, 1992. Prova de Erudição (dissertação), Escola Politécnica, USP.
3. BERALDO, J. L. Moagem de minérios em moinhos tubulares. São Paulo, Edgar Blucher, 1987.
4. ALLEN, T. Particle size measurement. London, Chapman and Hall, 1974, p.154-240.
5. DALLAVALLE, J.M. Micromeritics: the tecnology of fine particles. New York, Pitman Publishing Corporation, 1948, p. 14-94.
6. TROMP, K. Neue wege zur beurfeilung der aufbereintung von stuckkohlen. Gluckauf, v.37, p. 125-131, 151-156, 1937.
7. COSTA NETO, P. L. Estatística. São Paulo, Edgar Blücher, 1977.

2.2. Considerações sobre deslamagem (II)

Ilustra-se na Figura 03 abaixo um exemplo de recuperação de material na fração fina de uma classificação.

Figura 03 - Exemplo de recuperação de material



Neste exemplo, a classificação do processo ② visa melhorar o desempenho da mesagem, mas por outro lado ela provoca perda do elemento útil em uma quantidade que não pode ser desprezada. Para recuperar esta perda, o processo é seguido por uma flotação.

A eliminação da fração fina do processo "④ Classificação" tem por objetivo obter um melhor desempenho total de separação. Na operação subsequente (a flotação, neste caso) as partículas finas não participam do processo, pois são separadas como rejeito. Assim sendo, esta classificação é chamada de deslamagem.

2.3. Definição e objetivos da deslamagem

Baseando-se nos exemplos dos itens 2.1. e 2.2., pode-se dar a seguinte definição para Deslamagem:

"Operação através da qual elimina-se a fração granulométrica fina na alimentação do processo de separação que a segue. A fração eliminada é desprezada".

Quando se elimina a fração fina através da deslamagem, consegue-se melhorar o desempenho de processos subsequentes, a recuperação metalúrgica e/ou o teor dos concentrados, devido à eliminação da interferência da lama em tais processos. Considerando estes fatores, geralmente conclui-se que o processo de deslamagem produz mais vantagens que desvantagens.

Em geral, a granulometria de corte na deslamagem fica na faixa de alguns μm a aproximadamente $50\mu\text{m}$.

Em algumas usinas industriais, onde se realizava deslamagem como definido acima, posteriormente instalou-se um circuito para recuperação de material útil contido na lama, como por exemplo a flotação de cassiterita fina. Neste caso, a deslamagem original, às vezes, continua sendo chamada de deslamagem, embora seja seguida por um circuito específico de recuperação. Neste ensaio, considerou-se uma classificação correspondente ao processo ② da Figura 03, visando granulometria de separação em $10\mu\text{m}$ com a densidade da cassiterita (em geral, em usinas industriais de beneficiamento de cassiterita adota-se granulometria de corte entre 10 e $30\mu\text{m}$ processo ② da Figura 03).

3. Objetivos do estudo

O material escolhido para realizar o ensaio foi a sílica, com densidade real de $2,7\text{g/cm}^3$, mas considerou-se que o pretendido seria obter diâmetro mediano de separação (d_{50}) de $10\mu\text{m}$ para a cassiterita, cuja densidade é de $6,8\text{g/cm}^3$. Assim, pretendeu-se verificar como se deve proceder os cálculos quando há diferença de peso específico relativamente grande entre o mineral útil e a ganga de um minério.

Em consequência da mistura de partículas finas na fração grosseira, o d_{50} resulta mais fino que o pretendido. Este estudo trata tal questão, visando reduzir mistura de finos no decantado sem que haja perda significativa de material, e assim obtendo d_{50} mais próximos do desejado. Para tanto, avalia-se o efeito da repetição do processo de deslamagem, realizando operações com um, dois e três estágios de sifonamento. Os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho dos três processos serão os diâmetros medianos de separação e os desvios inter-quartis centrais das curvas de partição obtidas.

II . CONHECIMENTOS GERAIS

1. Métodos de deslamagem adotados na indústria

Os métodos de deslamagem adotados na indústria são o classificador hidráulico tipo mecânico, hidrociclone e cone.

2. Diâmetro mediano de separação

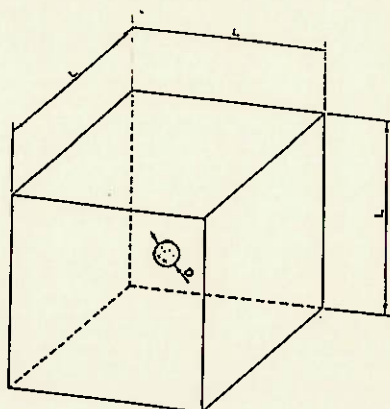
Tromp (6) estabeleceu o conceito de curva de partição (ou curva de Tromp). Conforme esta definição, diâmetro mediano de separação é aquele em que a probabilidade das partículas com esta granulometria estarem na fração fina é a mesma destas partículas estarem na fração grosseira. Ou seja, na curva de partição, diâmetro mediano de separação é o diâmetro em que 50% da massa total alimentada com esta granulometria está na fração fina. Por convenção este diâmetro é chamado d_{50} .

3. Regime de queda livre e de queda impedida de partículas

Supondo-se uma condição em que ocorre a queda de uma única partícula em um meio fluido, a interferência na queda da partícula é nula. Entretanto, na prática é impossível chegar-se a esta condição ideal e, à medida em que aumenta a concentração de partículas, aumenta também a interferência na queda.

No esquema da Figura 04, considere-se uma única partícula sólida esférica de diâmetro D , que ocupa uma parte ideal do volume de um líquido de forma cúbica, de aresta L . Pode-se tomar a relação L/D como o parâmetro do espaço ocupado pela partícula. Esse parâmetro é uma medida da concentração do sólido no líquido.

Figura 04 - Esquema da concentração de sólidos



onde D: diâmetro de uma partícula

L: cubo hipotético contendo uma partícula

Pode-se demonstrar que, quando $L/D \geq 10$, é desprezível a interferência na queda de outras partículas próximas. Entretanto, nos casos da prática, é raro ter polpas que tenham menos que 0,1% de sólidos. Mesmo no caso de se ter um valor de L/D de aproximadamente 5, que corresponde a cerca de 1% de sólidos em volume na polpa, considera-se ainda uma condição próxima à da queda livre.

Como um exemplo, nos analisadores de tamanho de partícula baseados em velocidade de queda, recomenda-se usar uma concentração de sólidos de cerca de 1% em volume.

4. Velocidade terminal de queda de partículas

Segundo Taggart (1), em uma condição em que o escoamento é laminar, as partículas são esféricas e o Número de Reynolds é inferior a 0,4, a velocidade terminal de queda das partículas é expressa pela Lei de Stokes, que será adotada para calcular a velocidade das partículas neste ensaio.

$$V = \frac{1}{18\mu} \times (\gamma_m - \gamma_w) \times g \times d^2$$

onde

V : velocidade terminal de queda da partícula (cm/s)

d : diâmetro da partícula esférica (cm)

γ_m : peso específico da partícula

γ_w : peso específico do fluido

g : aceleração da gravidade (cm/s²)

μ : viscosidade do fluido (centipoise)

5. Mistura de partículas finas na parte decantada

Considerando-se que dificilmente chega-se às condições de queda livre e que assim ocorre queda com interferência entre partículas, pode-se dizer que ocorre mistura de partículas finas na parte decantada, decorrente do arraste das partículas finas pelas partículas grosseiras. Além disso, na operação de sifonamento, durante a homogeneização da polpa já existem partículas finas abaixo do nível determinado para interromper o sifonamento.

6. Mistura de partículas grosseiras nas lammas

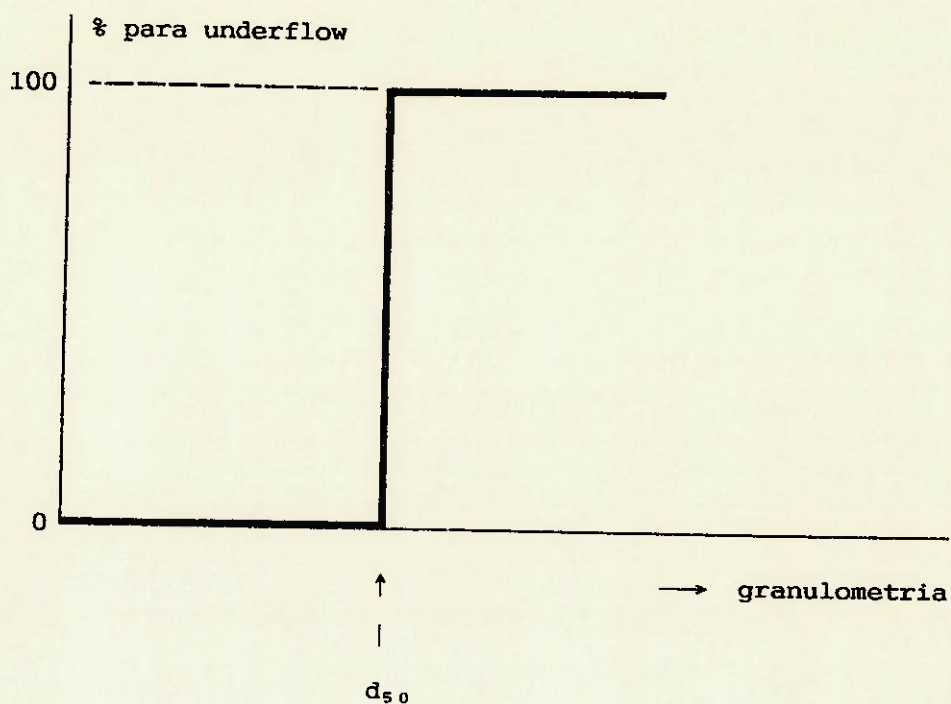
Pela Lei de Stokes, utiliza-se o diâmetro máximo das partículas que se deseja eliminar para calcular o tempo necessário para a sedimentação das partículas que não se deseja eliminar. Assim, supõe-se que no material eliminado não existam partículas maiores que o diâmetro de corte determinado. Entretanto, na operação de sifonamento haverá mistura de partículas grosseiras nas lammas pois a porcentagem de sólidos adotada permite a interferência de queda das partículas, restando partículas grosseiras na lama.

7. Curva de partição de uma classificação granulométrica

Para definir partição, suponha uma operação de classificação granulométrica por gravimetria. Define-se partição como a razão em massa referente à alimentação, por diâmetro de partícula, que passa ao afundado

No caso de uma separação ideal, para as granulometrias acima da de separação, o valor da partição para grossos deveria ser 100%, e para granulometrias inferiores à granulometria de separação o valor da partição deveria ser 0%, como ilustrado na Figura 05.

Figura 05 - Curva de partição de uma separação ideal



Em uma separação imperfeita que ocorre na realidade pois não se consegue atingir as condições ideais, a curva de partição apresenta o comportamento ilustrado na Figura 06. Quanto menos inclinada for a curva de partição, ou quanto menor for a dispersão, melhor terá sido o desempenho da separação que ela representa.

Pode-se adotar uma medida de dispersão da curva como parâmetro para avaliar desempenhos de processos que visam o mesmo diâmetro mediano de separação. A medida que utiliza-se tradicionalmente em distribuições normais, como no caso da curva de partição, é a metade da distância inter-quartis central (E), cuja fórmula apresenta-se a seguir:

$$E = \frac{d_{75} - d_{25}}{2}$$

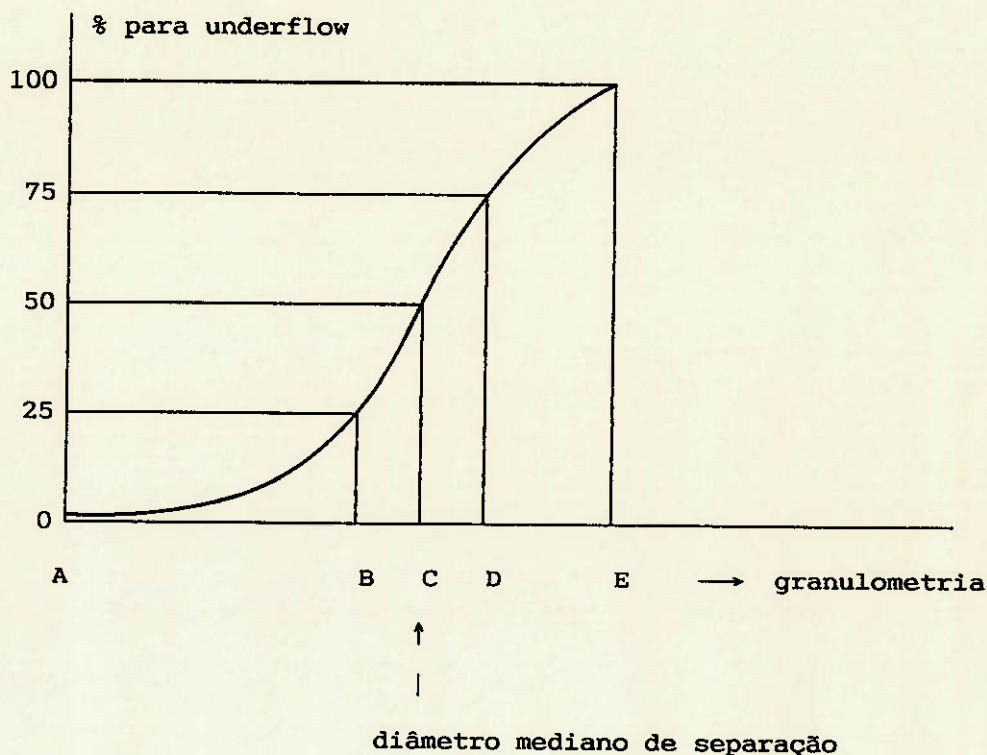
onde

E : desvio inter-quartis central

d_{25} : granulometria em que a partição é de 25% (ponto B na Figura 06)

d_{75} : granulometria em que a partição é de 75% (ponto D na Figura 06)

Figura 06 - Comportamento da curva de partição de uma separação real



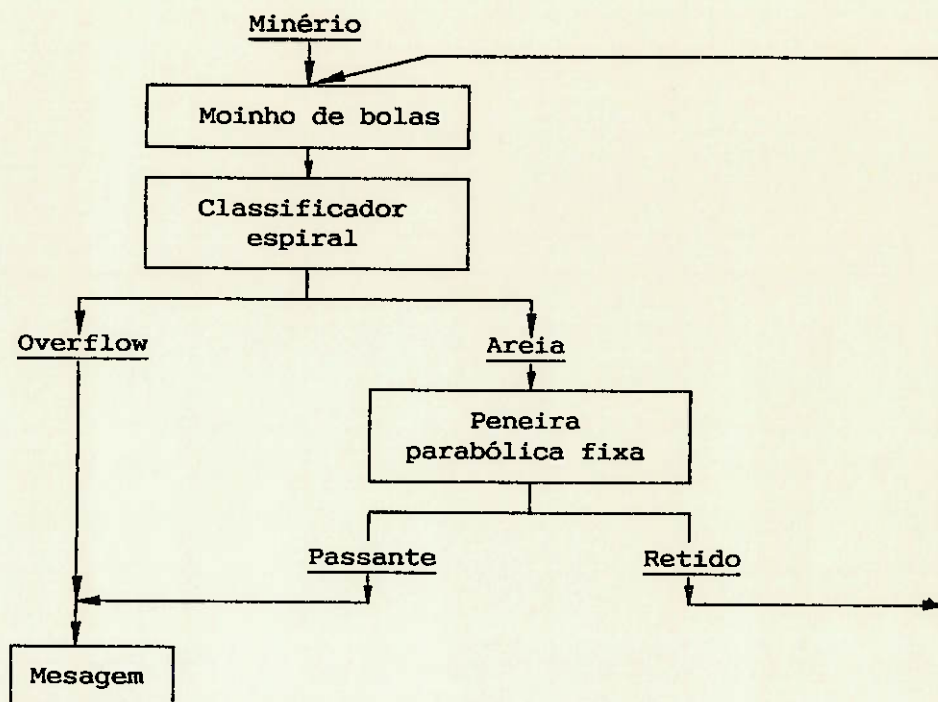
8. Problema da diferença de peso específico em um processo de classificação

O sifonamento é realizado baseando-se na diferença de velocidade terminal de queda das partículas em um líquido, que depende da granulometria, peso específico, formato e estado superficial das partículas, além do peso específico e da viscosidade do líquido. Nas operações de classificação por granulometria, em geral considera-se somente a diferença de granulometria das partículas, adotando-se um único peso específico para as partículas de uma polpa, ignorando a diferença de peso específico entre as mesmas. Entretanto, em alguns casos a diferença de peso específico das partículas é de grande importância na eficiência da separação, não podendo ser desprezada.

Por exemplo, suponha-se o circuito fechado de moagem da Figura 07 abaixo, constituído de um moinho de bolas ou barras e de um classificador hidráulico tipo espiral, destinado à adequação granulométrica de minério composto de cassiterita e areia para posteriores ensaios de separação por mensagem. No classificador hidráulico tipo espiral, caso considere-se somente a diferença de granulometria entre as partículas, ignorando o fato de que a cassiterita e a sílica possuem grande diferença de peso específico, haverá partículas de cassiterita com granulometria menor que a da areia que se sedimentarão no mesmo intervalo de

tempo. Assim, partículas de cassiterita que não necessitam de remoagem retornarão ao moinho, resultando em uma sobreemoagem que causará a diminuição da porcentagem de recuperação da mensagem. Para evitar este tipo de problema, trata-se o rejeito do classificador com uma peneira parabólica fixa, onde a separação será executada pela diferença entre as dimensões das partículas.

Figura 07 - Circuito de moagem



9. Fator de conversão de granulometria devido à densidade

Suponha-se a determinação granulométrica de uma mistura de uma pequena porção de cassiterita com densidade de $6,8 \text{ g/cm}^3$ e uma grande porção de sílica com densidade $2,7 \text{ g/cm}^3$, dando-se uma densidade de aproximadamente $2,7 \text{ g/cm}^3$ para a mistura devido à predominância de sílica. Neste caso, em geral, adota-se $2,7 \text{ g/cm}^3$ como a densidade do material cuja granulometria será determinada. Com esta operação o resultado da determinação será correto para a sílica, tendo diferença para a cassiterita devido à diferença de densidade.

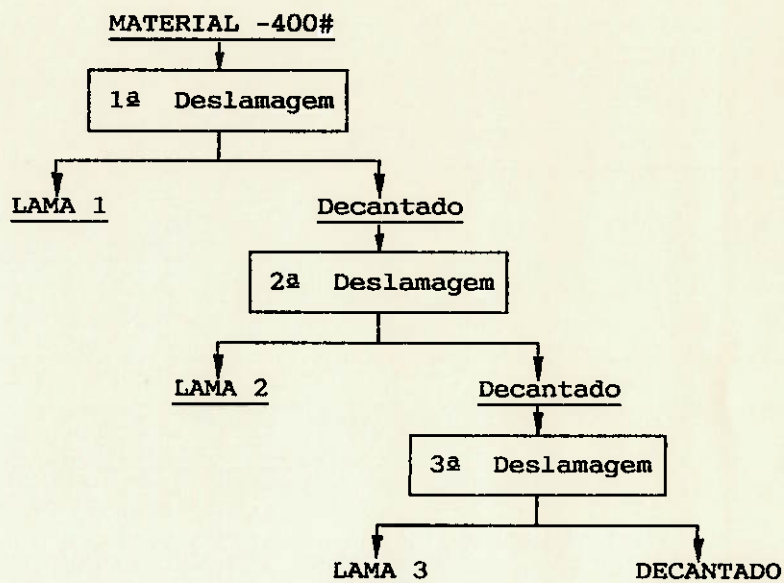
Para converter o diâmetro para cassiterita, multiplica-se os diâmetros obtidos para a sílica por um fator obtido da seguinte forma:

$$\text{Fator} = \sqrt{\frac{\text{Densidade da sílica} - \text{Densidade do líquido}}{\text{Densidade da cassiterita} - \text{Densidade do líquido}}} = \sqrt{\frac{2,7 - 1,0}{6,8 - 1,0}} = 0,54$$

III . METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

1. Fluxograma geral

Figura 08 - Fluxograma geral do ensaio



Será realizada análise granulométrica dos produtos obtidos (LAMA 1, LAMA 2, LAMA 3 e DECANTADO).

2. Método de determinação da densidade do material

Em vários ensaios é necessário que se conheça a densidade real do material para o entendimento dos resultados obtidos. Na análise granulométrica em determinador granulométrico, por exemplo, a densidade real das partículas é uma das variáveis introduzidas no equipamento.

Descreve-se a seguir o método utilizado neste estudo para determinação da densidade real do material.

2.1. Aparelhagem

- Moinho de disco ou gral
- Peneiras de 270# e 200#
- Picnômetro de 50ml
- Seringa com agulha fina
- Aquecedor com controle automático de temperatura
- Balança analítica

2.2. Procedimento

Para determinação da densidade real, utilizaram-se 30g de amostra, compreendida entre as peneiras 200# e 270#, procedendo à determinação da densidade real através do uso do picnômetro. Obteve-se as massas do picnômetro, do picnômetro com 10g de material, do picnômetro com 10g de material e completando o volume com água e a massa do picnômetro cheio somente com água.

Passa-se ao cálculo da densidade real pela seguinte fórmula:

$$D = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)}$$

onde

P_1 = peso do picnômetro (g)

P_2 = peso do picnômetro + material (g)

P_3 = peso do picnômetro + material + líquido (g)

P_4 = peso do picnômetro + líquido (g)

Executou-se duas determinações com a mesma amostra, e como a diferença entre os resultados estava em uma faixa desprezível, adotou-se a média como resultado final. Se a diferença não estivesse em um valor desprezível, seria refeito novamente o ensaio.

3. Preparação da amostra

Para preparação da amostra, realizou-se duas moagens de 25 minutos em moinho de bolas, seguidas de peneiramento na malha 400#. Com o undersize do último peneiramento procedeu-se uma separação magnética em separador de alta intensidade para separar o material que possivelmente misturou-se devido ao desgaste das bolas do moinho. O material magnético foi desprezado e o não magnético foi levado à secagem em estufa. Foi pesada uma alíquota de 63g do material seco, pretendendo-se preparar uma polpa com 3,0% de sólidos e volume de 2000ml. O material pesado foi condicionado a aquecimento e agitação em agitador magnético para desaglomeração das partículas.

4. Procedimento de deslamagem

Realizou-se os ensaios conforme descreve-se, visando melhorar o desempenho da separação:

- ① O material utilizado para os ensaios foi a sílica com densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$, mas pretendendo separar em $10 \mu\text{m}$ cassiterita com densidade de $6,8 \text{ g/cm}^3$.
- ② A deslamagem foi realizada por sifonamento, utilizando proveta de 2000ml e mangueira com tubo de vidro fixado na extremidade, o que facilita a visualização e controle do sifonamento, uma vez que a extremidade do tubo de vidro foi mantida na camada clarificada próxima à superfície da polpa.
- ③ Realizou-se previamente um ensaio para que fosse possível visualizar na proveta qual seria a altura da camada de material decantado. Para tanto, preparou-se na proveta a polpa com água deionizada, deixando-a em repouso por cerca de 12 horas.
- ④ Preparou-se solução de dispersante que foi utilizada nas etapas de sifonamento e na determinação granulométrica, mantendo sempre a mesma dosagem de 0,2%.
- ⑤ Foi mantida uma margem de segurança na proveta de aproximadamente 2,5cm acima da camada decantada para evitar ao máximo a mistura de partículas grosseiras nas lamas, pois tal fato não poderia ser revertido através da repetição do sifonamento.



Foto 01 - Observar a margem de segurança estabelecida, indicada pela linha em azul

⑥ Após o primeiro sifonamento, adicionou-se solução de dispersante à parte decantada, levando ao mesmo volume da polpa anterior. Repetiu-se por duas vezes o sifonamento para eliminar a lama misturada na parte decantada. A Figura 08 do item III .1. ilustra todo o processo do ensaio realizado.

⑦ A velocidade e o tempo de decantação foram calculados conforme a Lei de Stokes, visando que a granulometria de classificação ficasse em $10\mu\text{m}$ do diâmetro de cassiterita.

⑧ A densidade introduzida no determinador granulométrico foi a da sílica, devido ao argumento descrito no item II .8. Portanto, nos resultados das análises granulométricas deve-se considerar que a separação em $10\mu\text{m}$ para cassiterita corresponde a uma separação em aproximadamente $18,5\mu\text{m}$ para a sílica. O fator que permite converter as granulometrias desta forma deve ser calculado conforme o item II .9.

IV . METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

1. Metodologia para determinação granulométrica

Existem vários métodos para se obter a distribuição granulométrica de um material. Adota-se peneiramento com peneiras-padrão para materiais com granulometria superior a 40 μ m. Para materiais com granulometria mais fina adota-se métodos baseados na velocidade de queda de partículas.

O determinador granulométrico empregado neste estudo utiliza-se da velocidade terminal de queda de uma partícula para realizar a distribuição granulométrica. Para obter o valor da velocidade terminal de queda o determinador granulométrico utiliza a absorbância de luminosidade, sendo o diâmetro, densidade, formato, estado da superfície e molhabilidade da partícula fatores altamente implicantes, além da densidade e viscosidade do líquido utilizado e outras condições do ensaio. Na distribuição granulométrica por peneiramento, todos acima citados implicam, sendo que o fator de maior influência é o diâmetro da partícula.

Entretanto, em alguns instrumentos, certos fatores são ignorados, como por exemplo, influência do formato e do estado da superfície da partícula, etc. Por esta razão, deve-se utilizar o mesmo instrumento para obter resultados comparáveis entre si. Na indústria, é aceita a idéia de que não se encontra nenhum problema na utilização do determinador granulométrico, ignorando os fatores citados anteriormente, desde que se utilize o mesmo instrumento.

2. Equipamento utilizado para determinação granulométrica

2.1. Especificações

Fabricante	- SHIMADZU CORPORATION - JAPÃO
Modelo	- SA-CP2-20
Finalidade	- laboratório
Aplicação	- Determinação de granulometria abaixo da fração peneirável
Método	- Sedimentação gravitacional ou centrífuga e detecção fotométrica
Intervalo máximo de determinação	- 150 a 0,1 μ m (depende da densidade dos sólidos, da densidade e viscosidade do meio dispersante, e outras condições operacionais)
Intervalo adequado	- 37 a 1 μ m
Quantidade de amostra	- 1 a 2g para preparação e mais 10mg para a determinação, dependendo do material
Alimentação elétrica primária	- AC 100V 5A 60Hz
Sistema fotométrico	
* Fonte luminosa	- Lâmpada de tungstênio, 6V, 0,5A
* Fenda	- 1x4,5mm (duas) e 1x3mm (uma)
* Filtro	- Corta radiações com comprimento de onda maior que 750nm
* Sistema óptico	- Constituído de uma lente simples
* Detector	- Célula fotoelétrica de silício
Célula	
* Dimensões externas	- 67H x 26W x 16D mm
* Material	- Pyrex
* Material da tampa	- Teflon
* Capacidade	- 12,8 cm ³
* Volume máximo de amostra	- 10 cm ³
Condições de determinação	- Introduzidas através de teclado em digital
Resultado	- Impressão da relação entre diâmetros de partículas e porcentagem retida acumulada, calculada pelo microprocessador

2.2. Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do equipamento baseia-se na combinação de dois métodos: sedimentação e fotometria. O método de sedimentação fundamenta-se na Lei de Stokes. Este método permite, a partir de uma suspensão homogênea, determinar o diâmetro de uma partícula, conhecendo-se a distância percorrida pela mesma, o tempo gasto para percorrer esta distância, a densidade da partícula e a densidade e viscosidade do meio dispersante. Todas essas variáveis podem ser determinadas antes do ensaio, com exceção do tempo. Para este, o equipamento dispõe de um cronômetro.

O método fotométrico baseia-se na detectabilidade da passagem de luz através de uma suspensão. Partículas em suspensão obscurecem a intensidade de luz emergente, o que significa maior absorbância. À medida que se processa a sedimentação dessas partículas, aumenta a intensidade de luz emergente (menor absorbância). A diferença de absorbância, decorrido um intervalo de tempo, pode ser medida pelo equipamento e está diretamente relacionada com o tamanho e com a quantidade (concentração) de partículas que se sedimentam naquele intervalo de tempo. Esse método permite, portanto, determinar a concentração de partículas, uma vez que o diâmetro das mesmas pode, como vimos, ser determinado pelo método de sedimentação. A partir da concentração de partículas em número, é possível determinar a concentração das mesmas em peso.

A combinação desses dois métodos permite obter como resultado a distribuição granulométrica. Para facilitar o uso, o equipamento conta com um microprocessador (CPU) que executa todos os cálculos necessários e fornece como resultado a impressão de uma tabela de diâmetros de partículas versus porcentagem retida acumulada.

3. Considerações sobre a determinação granulométrica

3.1. Uso de dispersantes

Considerando a metodologia de determinação granulométrica, há a necessidade de que as partículas a serem determinadas estejam dispersas na suspensão. Geralmente obtém-se a melhor dispersão em um líquido do que em um gás, preferindo a utilização de líquido para a determinação granulométrica. O resultado da dispersão depende do tipo de líquido e/ou tipo de dispersante utilizado. Pode-se considerar que a função do dispersante é aumentar a molhabilidade da superfície da partícula.

3.2. Aglomeração

Há possibilidade de ocorrer aglomeração entre partículas durante a secagem. Para desaglomerar, imergiu-se o material a ser utilizado na determinação granulométrica em água durante aproximadamente 24 horas, evitando, assim, desaglomerar através de um meio mecânico que pudesse causar a fragmentação das partículas.

3.3. Bolhas de ar

Na preparação da suspensão de partículas, há possibilidade de que se formem pequenas bolhas de ar que tendem a aderir-se às partículas. Para evitar tal fato, preparou-se a suspensão misturando água e material lentamente, não perturbando a superfície da suspensão. Caso houvesse formação de bolhas, o material seria aquecido lentamente até um ponto próximo ao de ebulição.

4. Aferição do equipamento

A aferição do equipamento foi realizada com dois tipos de pó-padrão, N° 8 e N°11, fornecidos pela APPIE - "Association of Powder Process Industry & Engineering".

Realizou-se três determinações com cada pó-padrão, tomando-se o valor médio por fração granulométrica. Os resultados da aferição estavam dentro da faixa denominada pelo fabricante, comprovando a confiabilidade do equipamento.

5. Tratamento dos resultados para avaliação dos processos

A partir dos resultados do determinador, são levantadas curvas de distribuição granulométrica para os quatro produtos do ensaio: decantado, lama 1, lama 2, lama 3. Obtidas as massas destes, serão calculadas as partições dos três processos, ou seja:

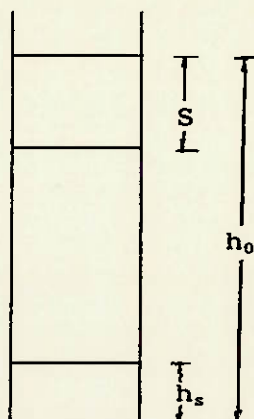
- Ⓐ Processo com um estágio de deslamagem;
- Ⓑ Processo com dois estágios de deslamagem;
- Ⓒ Processo com três estágios de deslamagem;

Em cada curva de partição será calculado o desvio inter-quartis central (E) como parâmetro comparativo entre os três processos. Todas as distribuições e curvas serão obtidos pela equação de regressão polinomial dos pontos obtidos nas determinações granulométricas e no cálculo das partições. A ordem da equação será selecionada entre 2º e 5º grau, escolhendo-se aquela cuja característica da curva seja mais semelhante a uma distribuição granulométrica ou uma curva de partição.

6. Modelo teórico do ensaio

Elaborou-se um modelo teórico do ensaio para comparar os resultados obtidos experimentalmente, onde considerou-se a mesma polpa, com 3% de sólidos, a mesma altura para sifonamento e a velocidade terminal de queda das partículas foi calculada da mesma forma pela Lei de Stokes. Procurou-se eliminar, entretanto, o efeito da distribuição homogênea da polpa, isto é, considerou-se que uma porcentagem das partículas com diâmetro inferior a $18,5 \mu m$ irá para a fração grosseira devido à distribuição homogênea da polpa ao longo da proveta. No esquema abaixo, h_0 corresponde à altura total da coluna de polpa, h_s é a altura da margem de segurança estabelecida para evitar ao máximo a mistura de partículas grosseiras na lama e S representa a altura da coluna de polpa percorrida pelas partículas de diâmetro d_x durante o tempo de decantação t. Devido à baixa porcentagem de sólidos utilizada, a altura da camada decantada é desprezível em relação à altura total da coluna de polpa, e por isso esta será ignorada neste modelo.

Figura 09 - Esquema do modelo teórico do ensaio



Para calcular a partição de cada classe de partículas de diâmetro d_x , partiu-se da seguinte relação entre as alturas acima:

$$P_{dx} (\%) = \frac{S + h_s}{h_0} \times 100 \quad (*)$$

onde

P_{dx} : partição das partículas de diâmetro d_x (%)

entretanto, também pode-se definir que

$$S = v_{tx} \times t$$

$$h_0 = v_{ts} \times t$$

onde

t : tempo de decantação

S : altura percorrida pela partícula d_x no intervalo de tempo t de decantação

h_0 : altura percorrida pela partícula com diâmetro de separação d_s no intervalo de tempo t de decantação

v_{tx} : velocidade terminal de queda da partícula d_x

v_{ts} : velocidade terminal de queda da partícula d_s

e substituindo na relação (*), obtém-se a seguinte fórmula para o cálculo da partição no modelo elaborado:

$$P_{dx} (\%) = \left(\frac{v_{tx}}{v_{ts}} + \frac{h_s}{h_0} \right) \times 100$$

As curvas obtidas a partir da equação acima estão representadas na Figura 10, e os valores dos d_{50} , d_{25} , d_{75} e dos respectivos desvios E estão tabelados abaixo.

Tabela 01 - Dados obtidos nas curvas de partição do modelo

PROCESSO	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ
$d_{50} (\mu m)$	12,30	14,70	15,80
$d_{25} (\mu m)$	8,05	12,40	13,95
$d_{75} (\mu m)$	15,30	16,70	17,20
E	3,6	2,2	1,6

onde Ⓐ: modelo de processo com um estágio de deslamagem

Ⓑ: modelo de processo com dois estágios de deslamagem

Ⓒ: modelo de processo com três estágios de deslamagem

PARTIÇÃO SEGUNDO O MODELO

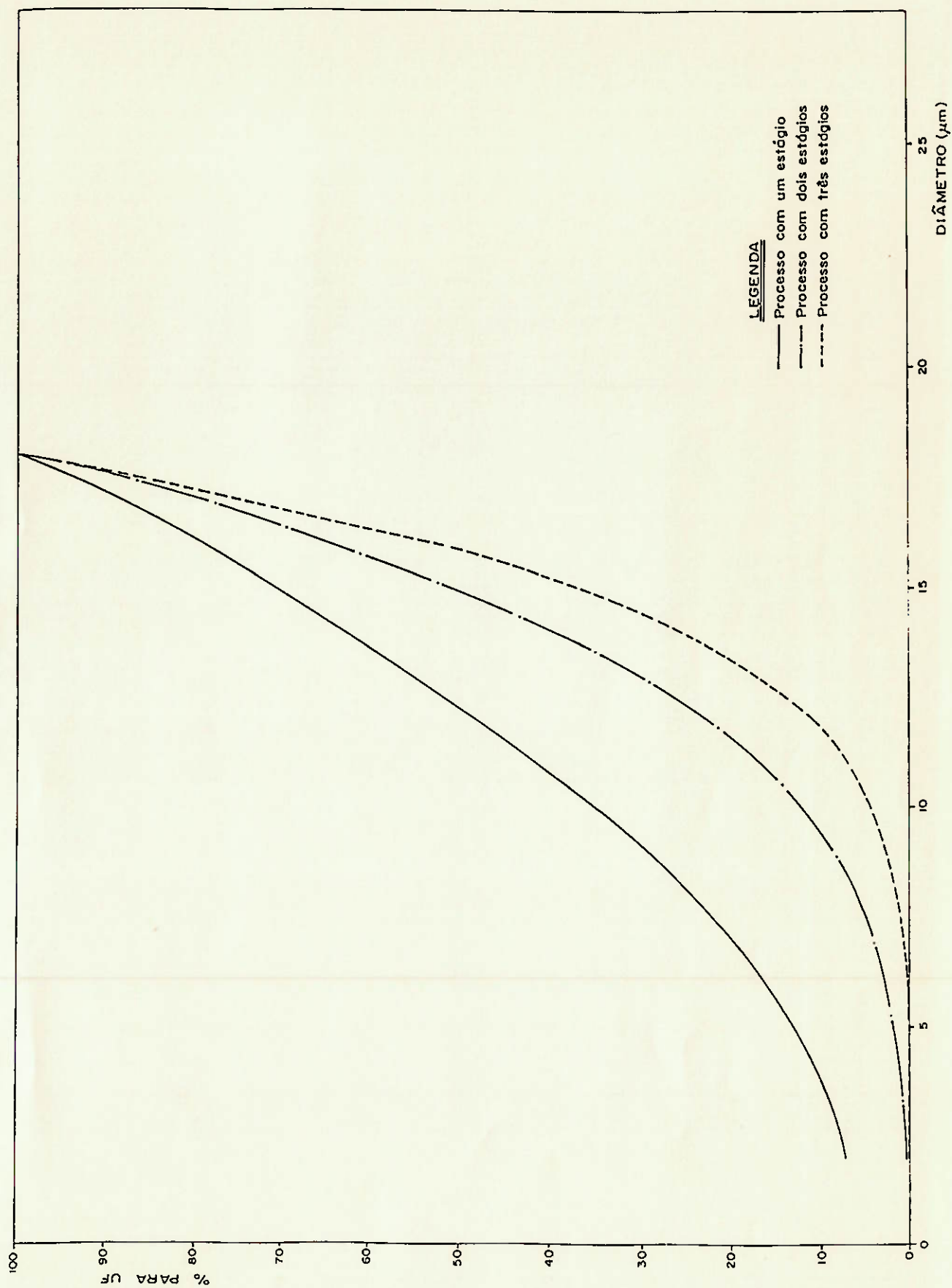


FIGURA 10

V . DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO

1. Material utilizado e densidade real obtida

O material utilizado para os ensaios foi a sílica com densidade real obtida de $2,7 \text{ g/cm}^3$, mas pretendendo obter d_{50} igual a $10 \text{ } \mu\text{m}$ de cassiterita com densidade de $6,8 \text{ g/cm}^3$.

2. Condições do ensaio

Porcentagem de sólidos:	3,0%
Temperatura:	22°C
Viscosidade do líquido:	0,0096 centipoise
Altura da coluna de polpa na proveta:	41,7 cm
Altura da coluna de polpa até a camada decantada:	40,5 cm
Altura de sifonamento:	38,0 cm
Altura da margem de segurança mantida:	2,5 cm
Velocidade terminal de sedimentação: (para partículas de cassiterita com diâmetro de $10 \text{ } \mu\text{m}$)	0,033 cm/s
Tempo de sifonamento:	1min 07s
Tempo de decantação:	20min 27s

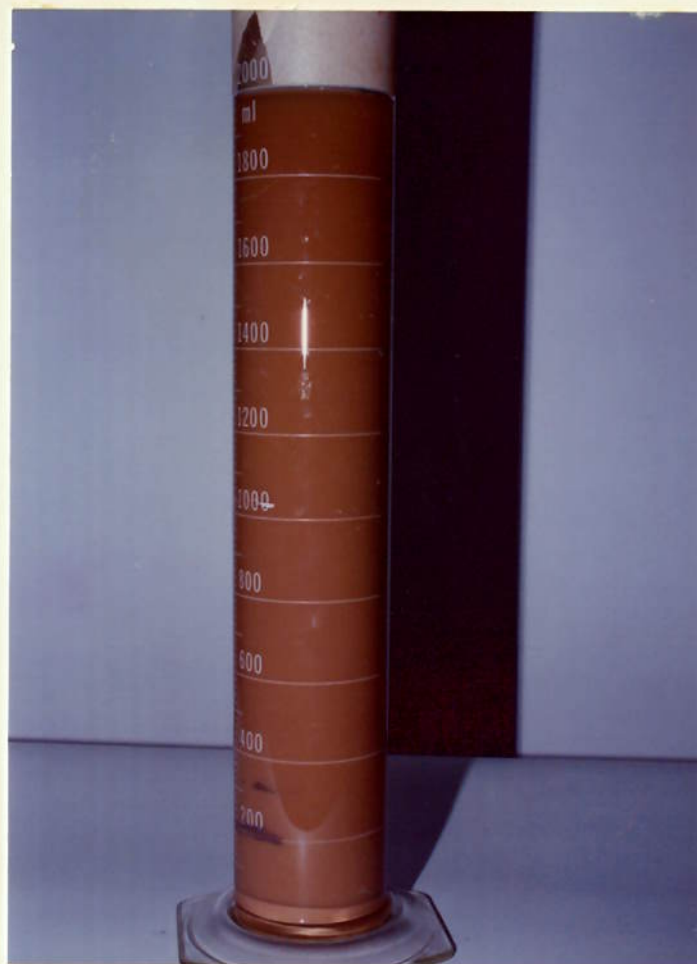


Foto 02 - Primeiro estágio de deslamagem após 20min de decantação

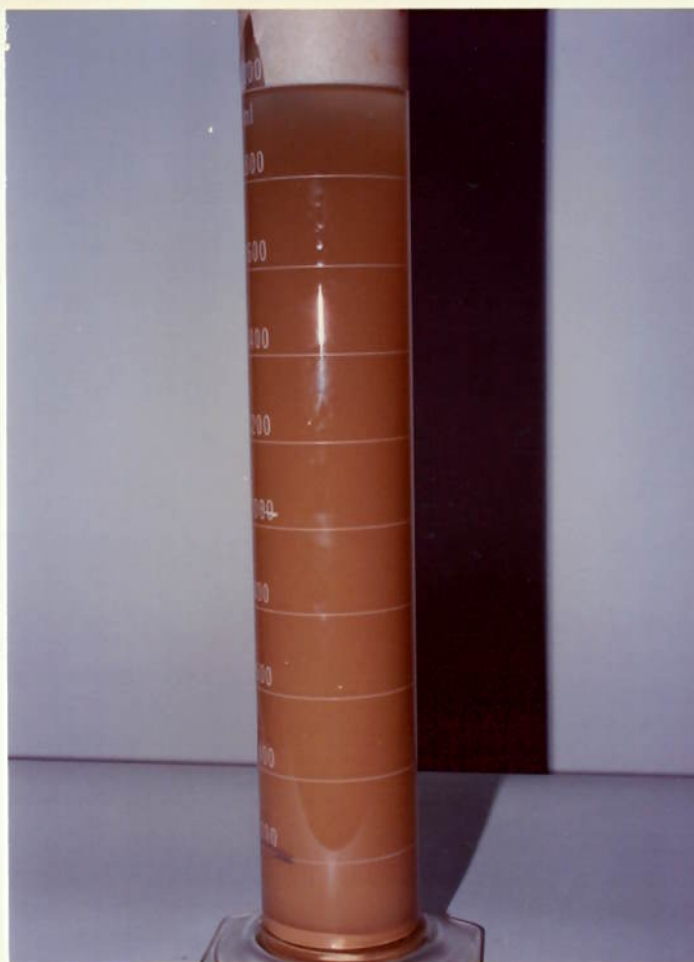


Foto 03 - Segundo estágio de deslamagem após 20min de decantação

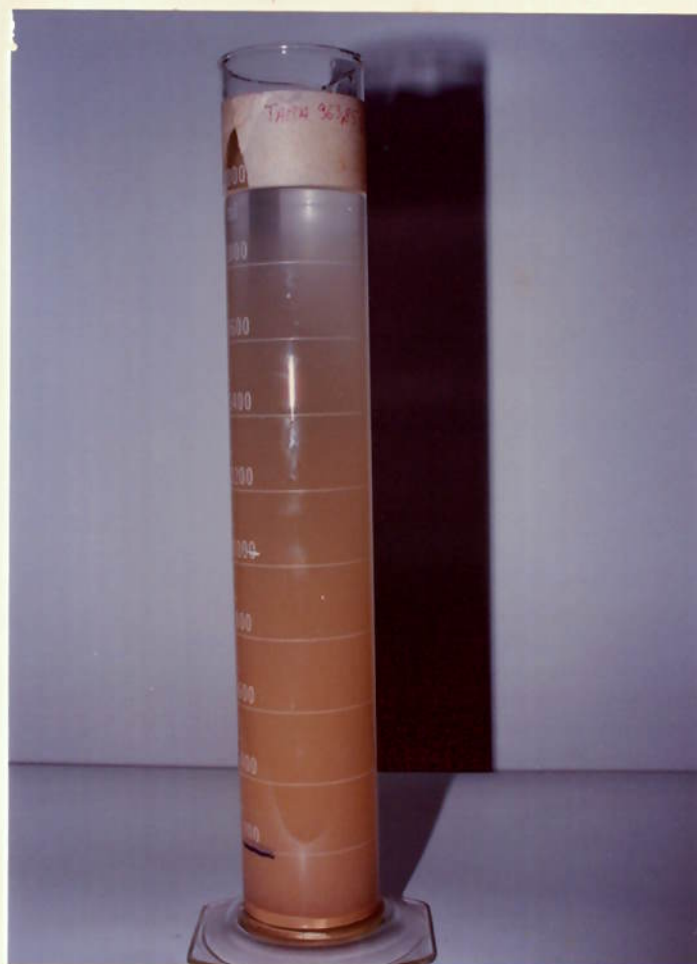


Foto 04 - Terceiro estágio de deslamagem após .20min de decantação

3. Resultados obtidos através das análises granulométricas

Tabela 02 - Resultados fornecidos pelo determinador granulométrico
(% retida acumulada)

GRANULOMETRIA	DECANTADO	LAMA 1	LAMA 2	LAMA 3
μm	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$	$\Sigma (\%)$
+ 40	4,3	—	—	—
+ 30	28,0	—	—	—
+ 20	76,2	—	—	3,0
+ 10	—	27,4	50,3	65,8
+ 8	—	39,9	64,6	80,8
+ 6	—	55,6	77,2	90,8
+ 5	—	63,8	82,8	94,4
+ 4	—	75,4	88,0	97,1
+ 3	—	84,2	92,8	—
+ 2	—	91,8	96,6	—