

VI ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA

AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE CICLONES

Engº Leonel Luis Gutierrez Retamal
Engº Edward Oblad

PAULO ABIB ENGENHARIA S.A.

I - INTRODUÇÃO

Nestes últimos vinte anos, a indústria mineral vem utilizando cada vez mais, hidrociclones nas operações clássicas de classificação, deslamagem e desaguamento de polpas minerais. Apesar do amplo uso deste equipamento na indústria, e da aparente simplicidade do seu funcionamento, existem ainda amplas divergências referentes aos princípios teóricos que governam o mecanismo da classificação.

Uma das mais importantes pesquisas referente ao estudo e avaliação da performance de ciclones na indústria mineral, deve-se aos pesquisadores Lynch e Rao, na Austrália (1, 2). Este trabalho permitiu desenvolver um conjunto de equações empíricas que descrevem a operação de ciclones de grande diâmetro operando à elevadas porcentagens de sólidos, simulando-se assim, condições típicas de instalações industriais. Estas equações têm sido aplicadas com sucesso no desenvolvimento e instalação de um sistema de controle automático no circuito de moagem e classificação da Mount Isa Mines (3) na Austrália.

As equações de Lynch e Rao, incluem várias constantes que devem ser determinadas experimentalmente para cada tamanho de ciclones e tipo de material ensaiado. Variando-se as condições de operação e/ou as dimensões do ciclone dispõe-se de um modelo adequado que permite predizer a performance de ciclones geometricamente similares, com o tipo de material ensaiado, embora estas predições sejam válidas apenas dentro da área experimental, na qual as constantes experimentais foram levantadas.

O modelo de Plitt, de publicação mais recente (4) (dezembro/76), se distingue do anterior pelo caráter mais geral necessitando apenas de poucos ensaios para a determinação dos

parâmetros experimentais (mesmo que não se tenha resultados experimentais, poder-se-ia utilizar as constantes previamente determinadas por Plitt). As suposições básicas do modelo de Plitt, são as mesmas do modelo de Lynch e Rao, sendo apenas as equações e a aproximação utilizada ligeiramente diferentes.

II - DESCRIÇÃO GERAL DO MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO

Baseando-se nos trabalhos prévios de Lynch-Rao, Plitt, e nos gráficos e tabelas fornecidas pela "Krebs", juntamente com a nossa própria experiência pessoal e nossos próprios resultados experimentais, desenvolvemos as equações indicadas que permitem avaliar capacidades e simular performances de ciclones "Krebs", para qualquer tipo de material e qualquer tamanho de hidrociclones utilizado.

A) Equação do Tamanho de Corte

O tamanho de corte no ciclone, é normalmente definido como o tamanho de separação no ciclone, garantindo no máximo 1 - 5 % de material retido nesse tamanho no "overflow" do ciclone.

B) Equação do Tamanho D50 Corrigido

O tamanho d50 corrigido, é aquele diâmetro cujas partículas vão 50% para o "overflow" e 50% para o "underflow" devido exclusivamente ao mecanismo de classificação no ciclone.

O valor de K_d , indicado na equação, é apenas "uma primeira estimativa" para calcular o valor de d_{50} (corr), pois o programa de computação desenvolvido para simulação da ciclonagem utiliza simultaneamente as equações (a) e (b), a fim de garantir o tamanho desejado.

Na realidade a equação permite calcular apenas uma primeira estimativa do valor de d_{50} (corr), que satisfaça o corte desejado (d_{95}). O valor de d_{50} (corr) é modificado convenientemente através de um método de cálculo iterativo até atingir-se a convergência desejada.

C) Equação de Capacidade do Ciclone

Foi desenvolvido uma equação para correlacionar a capacidade volumétrica do ciclone, em função do diâmetro do ciclone, a pressão de alimentação, a porcentagem de sólidos volumétrica da alimentação, o diâmetro do "vortex finder", e a área de entrada na alimentação.

D) Equação da Recuperação de água no "underflow"

Para caracterizar o fenômeno real de classificação deve-se quantificar o efeito do "by pass" das partículas da alimentação, as quais, devido ao arraste pela água e/ou arraste mecânico por outras partículas, aparecerão no "underflow" do ciclone. O "bay pass" é suposto ser equivalente à partição de água no "underflow".

E) Equação de Partição Reduzida

A equação de partição reduzida utilizada em nosso trabalho, é a mesma já definida por Lynch-Rao.

F) Equação do Diâmetro do Apex

A partir de dados experimentais, e baseando-se nas curvas da "Krebs" (5), desenvolveu-se uma equação empírica bastante aceitável, que é utilizada para calcular o diâmetro do apex, necessário numa operação característica de ciclonação, deslamagem e/ou desaguamento.

Da equação (b), observa-se que D_u depende tanto da densidade do material (ρ_s), da porcentagem de sólidos desejada no "underflow" (P_{su}), do número de ciclones (N_c), como também da vazão de sólidos obtida no "underflow" (V_s). Sendo o valor de V_s desconhecido antes da simulação, deve-se portanto, utilizar um método de cálculo iterativo, para achar os valores corretos de V_s e D_u .

Observa-se nas equações anteriores, que sendo o método de cálculo relativamente complexo (método de cálculo iterativo para a maioria das equações apresentadas), é preciso utilizar um computador para realizar os cálculos.

No final deste trabalho, apresentam-se alguns exemplos práticos de simulação em ciclones 6", 15", 20" e 26" polegadas de diâmetro.

III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Realizou-se uma coleta de dados experimentais, para testar a validade do modelo matemático proposto neste trabalho, da seguinte maneira:

1. Realizou-se uma série de 12 ensaios de ciclonação num ciclone "Krebs" D6B-12^o, com minério de fosfato de Anitápolis. Esta amostra foi colhida em polpa a 38% sô

lidos, representando o "overflow" do classificador espiral da usina piloto da Paulo Abib Engenharia S.A.-PAA. Variou -se a pressão de alimentação (de 7 a 30 psi), a % de sólidos em peso na alimentação (de 10 a 40% sólidos) e o diâmetro do apex (1-1 1/2 pol), para se calcular os parâmetros de classificação e simular a ciclonação na usina industrial.

2. Utilizou-se uma série de dados experimentais antigos, coletados nas escalas de usina piloto e semi-industrial, disponíveis nos arquivos da PAA, para testar o modelo proposto. Estes ensaios englobam diferentes tipos de minérios e diferentes diâmetros de ciclones "Krebs".

3. Utilizou-se informação experimental mais recente, sobre dados de ciclonação, obtidos em usina industrial e semi-industrial, incluindo-se informação sobre ciclones de 15, 20 e 26 polegadas de diâmetro, operando em circuitos fechados de moagem.

4. Aproveitou-se a informação proveniente de trabalhos prévios aparecidos na literatura (informação de ciclones "Krebs", trabalhos de Rao-Lynch, Plitt e outros).

IV - RESULTADOS ENCONTRADOS E CONCLUSÕES

Nas figuras 1 a 5, apresenta-se a comparação entre as análises granulométricas do "overflow" e "underflow", tanto experimentais, como simulados pelo modelo.

Dos resultados apresentados nos gráficos deste trabalho, conclui-se o seguinte:

1. A comparação entre os valores experimentais e preditos pela simulação no computador indica um ajuste razoável, na maioria dos casos, referidos tanto à operações industriais, semi-industriais e escala de usina piloto;
2. As equações do modelo "Krebs" desenvolvida pela Paulo Abib Engenharia S.A.-PAA, permitem avaliar capacidades e simular performances de hidrociclones para vários tipos de materiais e vários tamanhos de hidrociclones de uma maneira bastante razoável;
3. Na medida que maior quantidade de informação seja acumulada, maior será a confiabilidade que poderá-se atribuir ao modelo matemático aqui proposto. Estima-se que, provavelmente, alguns coeficientes e/ou expoentes envolvidos nas equações possam sofrer pequenas modificações após retratamento estatístico de toda a informação acumulada, mas acredita-se que o formato geral das equações desenvolvidas, não seja mudado apreciavelmente.

EQUAÇÕES

A) EQUAÇÃO DO TAMANHO DE CORTE

$$d_{95} = 16,098 \times D_c^{0,467} \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5 \quad (a)$$

Sendo:

FATOR CORRETOR	DEFINIÇÃO	EQUAÇÃO	OBSERVAÇÕES
f_1	Fator corretor da densidade de sólidos	$f_1 = \left[\frac{\rho_s - 1}{1,65} \right]^{-0,485}$	$f_1 = 1$ para $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$
f_2	Fator corretor da % sólidos em volume na alimentação	$f_2 = \left[\frac{50 - \beta}{40} \right]^{-1,791}$	$f_2 = 1$ para $\beta = 10\%$ sólido em volume
f_3	Fator corretor da pressão de alimentação	$f_3 = \left[\frac{P}{10} \right]^{-0,252}$	$f_3 = 1$ para $P = 10 \text{ psi}$
f_4	Fator corretor do vortex finder	$f_4 = \left[\frac{D_o}{\bar{D}_o} \right]^{0,60}$	$f_4 = 1$ para $D_o = \bar{D}_o$ (pol)
f_5	Fator corretor da área de entrada do ciclone	$f_5 = \left[\frac{A_i}{\bar{A}_i} \right]^{0,15}$	$f_5 = 1$ para $A_i = \bar{A}_i$ (pol ²);

B) EQUAÇÃO DO TAMANHO D_{50} CORRIGIDO

$$d_{50}(c) = K_D \times D_c^{-0,28} \times D_o^{0,64} \times A_i^{0,14} \times (53 - \beta)^{-1,37} \times (\rho_s - 1)^{-0,5} \times P^{-0,25} \times Du^{-0,5} \times x_h^{-0,5} \times \mu^{0,5} \quad (b)$$

Onde:

$$K_D = \begin{cases} 85.582,4 \times [1 - 1,618 \times \text{EXP}(-0,227 \times D_c)] & ; \text{ para } D_c > 6 \\ 34.233,0 & ; \text{ para } D_c < 6 \end{cases}$$

C) EQUAÇÃO DE CAPACIDADE DO CICLONE

$$Q = K_Q \times D_c^{0,271} \times P^{0,5} \times (1 + 4,461 \times 10^{-3} \times \beta^{1,28}) \times D_o^{0,982} \times A_i^{0,323} \quad (c)$$

Onde:

$$K_Q = a_0 + a_1 D_c + a_2 D_c^2 + a_3 D_c^3 + a_4 D_c^4 + a_5 D_c^5$$

Sendo:

$$a_0 = 2,321; \quad a_1 = -2,187 \times 10^{-1}; \quad a_2 = 1,553 \times 10^{-2}; \quad a_3 = -4,534 \times 10^{-4}; \quad a_4 = 5,944 \times 10^{-6}; \quad a_5 = -2,868 \times 10^{-8}$$

D) EQUAÇÃO DA RECUPERAÇÃO DE ÁGUA NO "UNDERFLOW"

$$B_p = \frac{(100 - P_{su}) \times P_{sa} \times \sum_{i=1}^n Y_{ci} \times f_{Ai} / 100}{100 \times (P_{su} - P_{sa}) + (100 - P_{su}) \times P_{sa} \times \sum_{i=1}^n Y_{ci} \times f_{Ai} / 100} \quad (d)$$

E) EQUAÇÃO DE PARTIÇÃO REDUZIDA

$$Y_{ci} = \frac{[\text{EXP}(\alpha X_i) - 1]}{[\text{EXP}(\alpha X_i) + \text{EXP}(\alpha) - 2]} \quad (e)$$

F) EQUAÇÃO DO DIÂMETRO DO APEX

$$D_u = 1,7242 - 0,0174 \times P_{su}^* + 0,0591 \times \ln V_s^* + 0,1624 (\ln V_s^*)^2 \quad (f)$$

Sendo: $P_{su}^* = 265 \times P_{su} / [2,65 \times P_{su} + \rho_s \times (100 - P_{su})]$

$$V_s^* = 2,9211 \times V_s / [\rho_s \times N_c]$$

Com as seguintes restrições práticas:

$$D_u \geq 3/8" \text{ e } D_u < D_o$$

S-I-M-B-O-L-O-G-I-A

- d_{95} = Tamanho de corte no ciclone.
 D_c = Diâmetro interno da secção cilíndrica do ciclone (pol).
 ρ_s = Densidade de sólidos (t/m^3).
 $\#$ = Porcentagem de sólidos em volume na alimentação do ciclone (%).
 P = Pressão de alimentação no ciclone (psi).
 D_o = Diâmetro do Vortex Finder (pol).
 \bar{D}_o = Diâmetro médio do Vortex Finder para o modelo e diâmetro de ciclones utilizados (pol).
 A_1 = Área de entrada na alimentação do ciclone (pol^2).
 \bar{A}_1 = Área média de entrada para o modelo e diâmetro de ciclone utilizado (pol^2).
 $d_{50(c)}$ = Tamanho d_{50} corrigido (μm).
 D_u = Diâmetro do Apex (pol).
 h = Distância compreendida entre o centro da área de entrada do ciclone e a parte superior do apex (pol).
 μ = Viscosidade aparente de polpa alimentada (centipoises).
 Q = Vazão volumétrica de polpa na alimentação do ciclone (m^3/h).
 B_p = Fração de água da alimentação recuperada no "underflow" do ciclone.
 P_{sa} = Porcentagem de sólidos em peso na alimentação do ciclone.
 P_{su} = Porcentagem de sólidos em peso no "underflow" do ciclone.
 P_{su}^* = Porcentagem de sólidos "equivalente" no "underflow" para um material de densidade $\rho_s = 2,65$.
 f_{ai} = Porcentagem retida simples na i -ésima malha, na alimentação do ciclone ($i = 1, 2, \dots, n$).
 Y_{ci} = Partição corrigida (fração em massa) para a i -ésima malha ($i = 1, 2, \dots, n$).
 α = Parâmetro característico do material submetido a operação de classificação.
 X_i = $d_i/d_{50(c)}$ = tamanho reduzido de partícula para i -ésima malha ($i = 1, 2, \dots, n$).
 d_i = Tamanho de partícula para i -ésima malha considerada (μm).
 N_c = Número de ciclones utilizados.
 V_s = Vazão em massa de sólidos obtidos no "underflow" (t/h).
 V_s^* = Valor equivalente a V_s , para $\rho_s = 2,65$ (t/h).

B-I-B-L-I-O-G-R-A-F-I-A

- Lynch, A. J., and Rao, T. C. : "The Operating Characteristics of Hydrocyclone Classifiers", Ind. J. of Tech., 6, p. 106, 1968;
- Lynch, A.J. and Rao, T. C. : "Modelling and Scale - up of Hydrocyclone Classifiers", 11 th. Int. Min. Processing Congress, Cagliari, 1975;
- Draper, N. Dredge, K. H., and Lynch, A. J. : "Operating Behaviour of an Automatic Control System for a Mineral Grinding Circuit", Paper 22, 9 th. Commonwealth IMM Cong. 1969;
- Plitt, L. R.: "A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier", CIM Bulletin, Dec. 1976, p. 114 - 123;
- Tarr, D. T. - Krebs Engineers, : "Practical Application of Liquid Cyclones in Mineral Dressing Problems", Krebs Bulletin, Oct. 1965.

FIG. -2- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS - ENSAIO 02
 CICLONE KREBS - 6 pol. DIÂMETRO
 MATERIAL = AREIA MONAZÍTICA ($f_s = 3,6$)
 ENSAIO DE CLASSIFICAÇÃO E ADENSAMENTO - USINA PILOTO

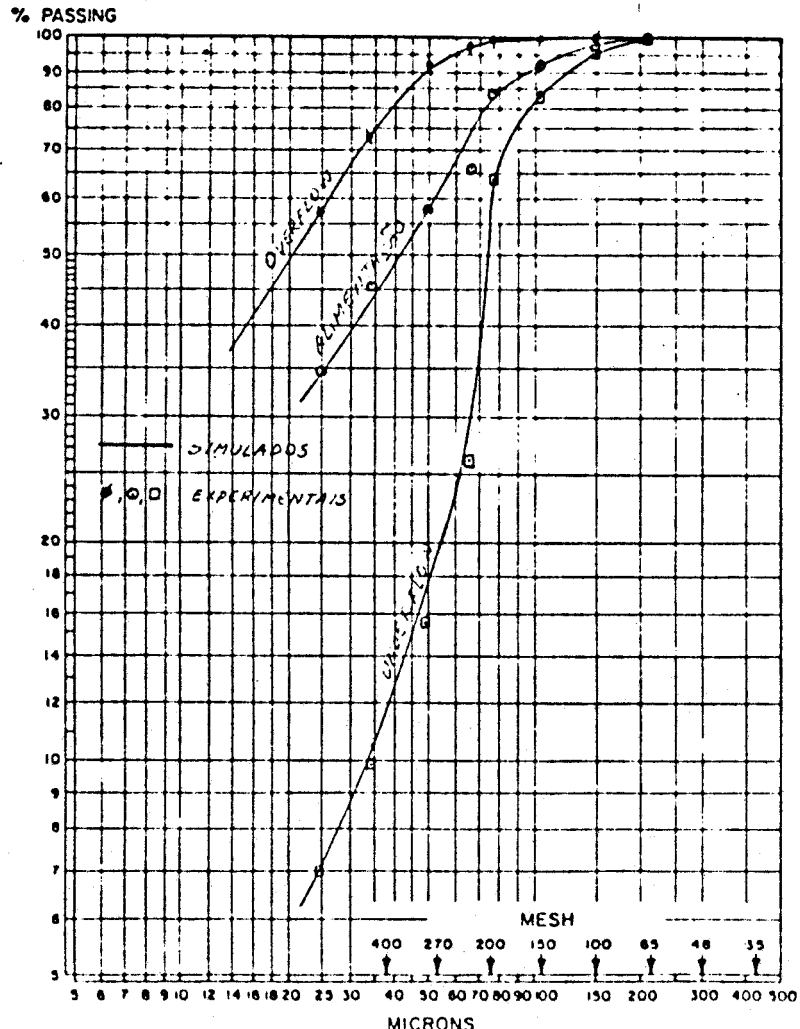


FIG. -1- RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS - ENSAIO 01
 CICLONE KREBS - 6 pol. DIÂMETRO
 MATERIAL = FOSFATO I ($f_s = 2,8$)
 ENSAIO DE DESLAMAGEM - USINA PILOTO

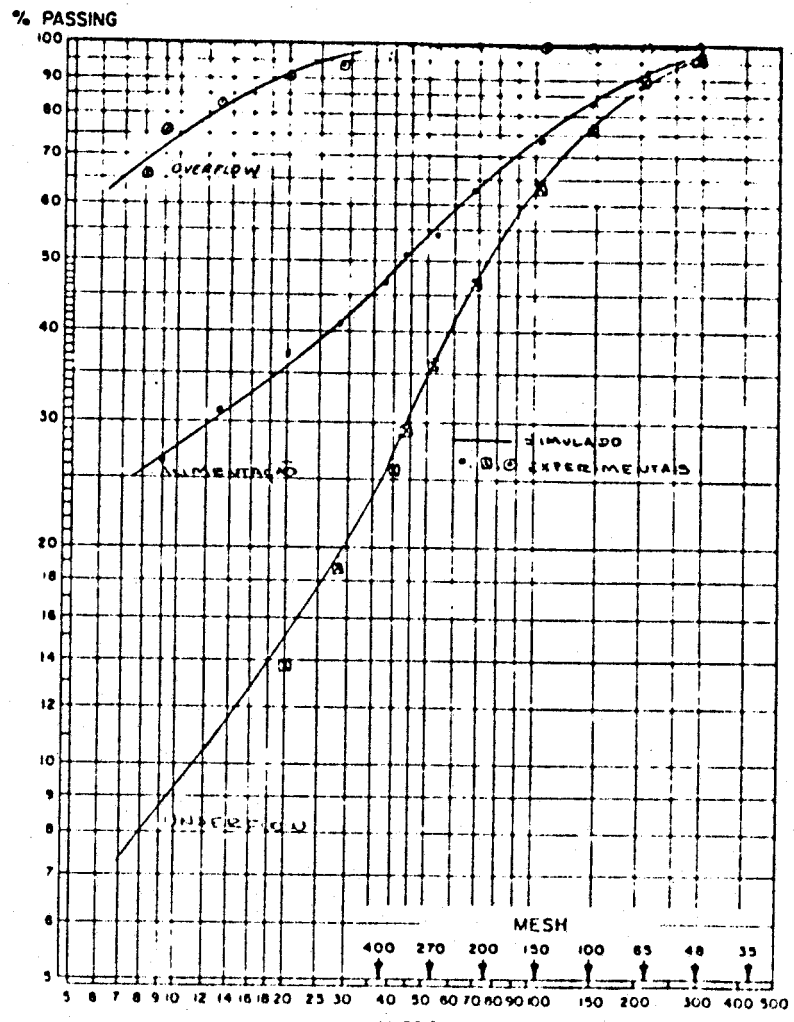


FIG - 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS - ENSAIO 04
 CICLONE KREBS - 20 pol. DIÂMETRO
 MATERIAL: FOSFATO II ($f_s = 3,2$)
 CIRCUITO INDUSTRIAL - DESLAMAGEM

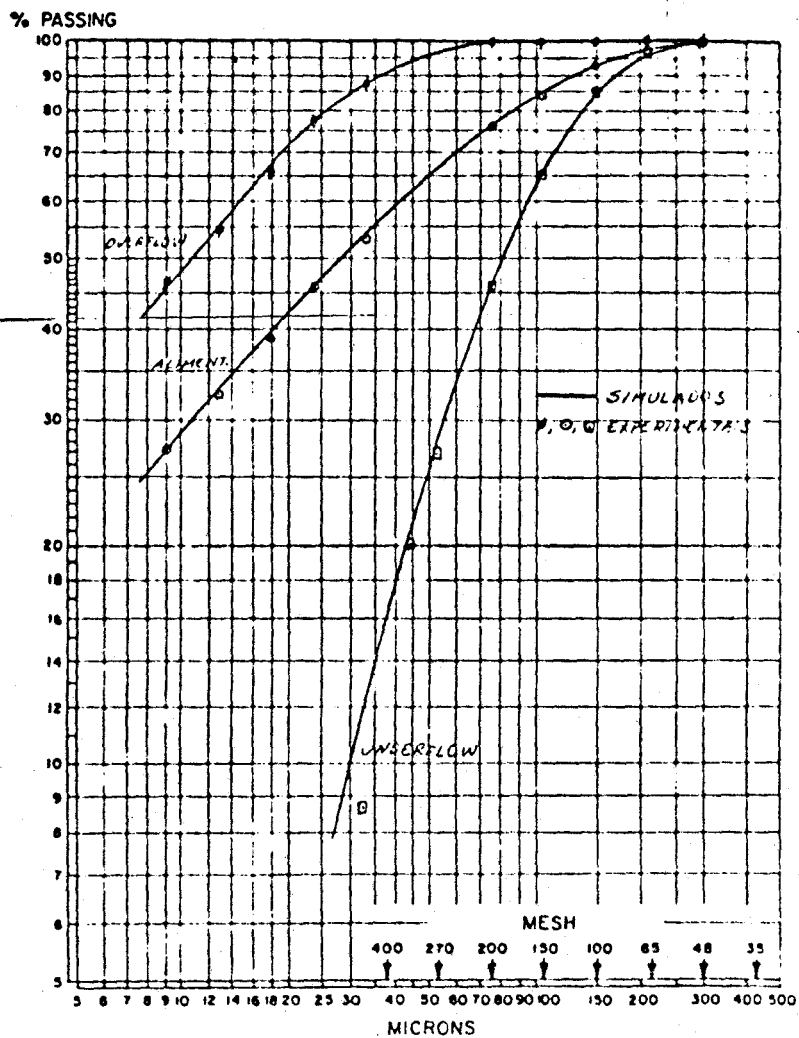
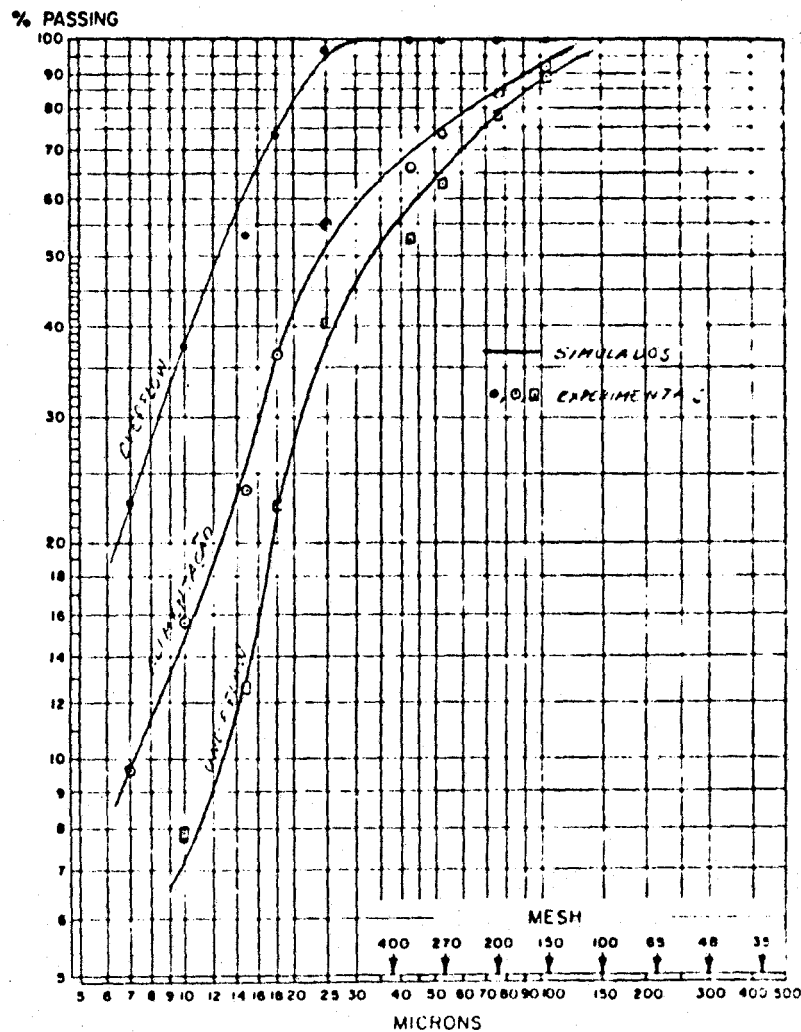


FIG. - 3 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS - ENSAIO 03
 CICLONE KREBS - 15 pol. DIÂMETRO
 MATERIAL: HEMATITA ($f_s = 5,0$) - MINÉRIO Fe
 ENSAIO DE DESLAMAGEM - CIRCUITO SEMI-INDUSTRIAL



%
Passante

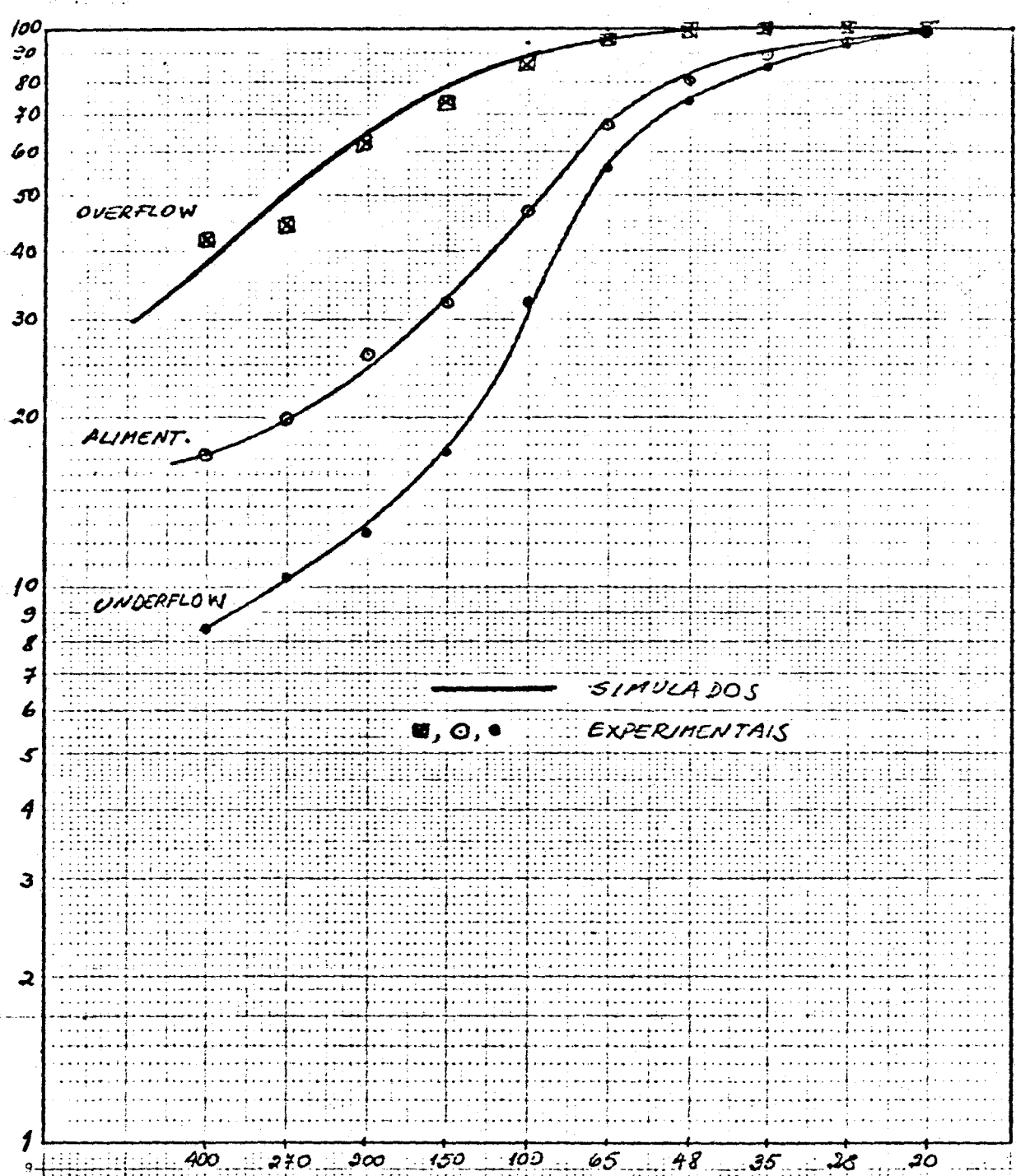


FIG. - 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E PREVISTOS - ENSAIO 05
 CICLONE KREBS - 26 pol. DIÂMETRO
 MATERIAL = FOSFATO II ($\rho_s = 3,2$)
 CIRCUITO INDUSTRIAL MOAGEM - CLASSIFICAÇÃO