

INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DOS MINÉRIOS DE FERRO NA SUA MOABILIDADE

José Murilo Mourão (1)
Leonídio Stegmiller (2)

R E S U M O

Apresenta-se neste trabalho uma metodologia desenvolvida para classificar os finos de minério de ferro da Cia. Vale do Rio Doce, de acordo com o seu índice de moabilidade. São mostrados os resultados obtidos nos estudos microestruturais dos minérios e nos testes realizados em planta piloto que permitiram estabelecer a influência das partículas policristalinas na moabilidade e, conseqüentemente, na produtividade dos moinhos.

A B S T R A C T

It's presented in this paper the methodology developed for ranking Cia. Vale do Rio Doce's iron ore fines, in accordance to their grindability. The investigation on microscopic characteristics of the ores showed the influence of polycrystalline particles on grindability. Basing on the results of pilot plant tests it was possible to correlate the grindability indexes of the ores and productivity of the grinding mills.

(1) (2) Engenheiros Metalurgistas da Gerência Geral de Controle de Qualidade, Superintendência de Pelotização da Companhia Vale do Rio Doce.

1) INTRODUÇÃO

Para a produção de pellets de minério de ferro, os finos minerais têm que ser moídos intensamente, resultando um material pulverulento e com alta superfície específica. Para essa operação de moagem, a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) tem utilizado moinhos de bolas tubulares (17' x 34'), operando a úmido e em circuito fechado com hidrociclones.

Como é bastante conhecido, a performance dos moinhos industriais depende da moabilidade dos minérios processados.

A CVRD possui muitas minas localizadas em distintas regiões do país, as quais produzem finos de minério de ferro hematítico para pelotização, com diferentes características.

De forma a otimizar a produtividade da moagem das plantas de pelotização, um extenso programa de pesquisas foi elaborado de forma a caracterizar os diferentes finos quanto à moabilidade.

Assim, baseando-se na teoria de Rittinger, foi desenvolvido um ensaio de laboratório para essa caracterização dos minérios. Esse estudo foi complementado com a execução de análises

microestruturais e testes em planta piloto, tendo sido possível classificar os minérios em função do seu índice de moabilidade.

Classificados os diferentes finos minerais, foi possível otimizar o planejamento das pilhas de minério industriais, minimizando-se as flutuações na produtividade dos moinhos.

Procurou-se com a elaboração deste trabalho apresentar o plano de pesquisa desenvolvido e os resultados obtidos nessa investigação.

2) FUNDAMENTOS TEÓRICOS

DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO DE MOABILIDADE

Para a formação dos pellets de minério de ferro e sua posterior consolidação por processamento pirometalúrgico é necessário fragmentar as partículas minerais, obtendo-se um elevado grau de finura.

Apenas para exemplificar, os padrões estipulados para o produto moído na CVRD são os seguintes:

Superfície específica (Fisher) = 1800 ± 50 cm²/g

% passante em 325 meshes (0,044 mm) = 90 % (mín.)

Um dos grandes problemas enfrentado pelo pessoal de operação de grandes moinhos industriais é a heterogeneidade das misturas minerais, a qual provoca grandes flutuações na produtividade. Se esse problema ocorre quando se consideram frentes de exploração diferentes de uma mesma mina, ele se agrava sobremaneira quando o material de alimentação é composto por minerais de diferentes minas e por vezes com diferentes gêneses.

Dessa forma, é imprescindível a determinação da moabilidade dos minérios processados para que se possam estabelecer metas seguras de produtividade e manter sob controle a qualidade do produto moído.

No intuito de classificar os minérios da CVRD, para fins de pelletização, um ensaio de fácil execução e boa representatividade tinha de ser considerado.

Hukki, em 1961, verificou que as leis da cominuição tinham aplicação a certos intervalos de granulometria [1]. A figura 1 mostra a relação estabelecida por ele para o consumo de energia nas operações de cominuição, em função da granulometria do produto.

Esse gráfico mostra que as três teorias da cominuição desenvolvidas por Fick, Bond e Rittinger seriam aplicáveis, dependendo dos intervalos de tamanho considerados.

Nessa mesma figura encontra-se plotada a curva granulométrica típica do produto moído na CVRD, indicando-se um tamanho médio granulométrico da ordem de 0,020 mm (20 micra), ou seja, fora da faixa convencional de moagem e próximo do campo de Rittinger. Assim, como o principal parâmetro de controle do produto moído na CVRD é a superfície específica do material, decidiu-se desenvolver o ensaio com base na teoria de Rittinger, sendo assim enunciada [2, 3]:

" O trabalho consumido nas operações de fragmentação é diretamente proporcional à nova superfície produzida."

A expressão matemática desta lei poderia ser traduzida por:

$$E = C.(s_2 - s_1) = C.S \quad (1)$$

onde:

E = Energia consumida (wh)

C = Constante que depende das características do material

s_1 = Superfície específica inicial do material (cm²/g)

s_2 = Superfície específica final do material (cm²/g)

S = Variação da superfície específica (cm²/g)

Da equação (1), pode-se escrever:

$$K = 1/C = S/E \quad (\text{cm}^2/\text{g.wh}) \quad (2)$$

Assim, o fator K foi considerado para caracterizar os diferentes finos de minério de ferro, quanto à moabilidade, desenvolvendo-se o ensaio com base em alguns parâmetros conhecidos da operação de moagem industrial.

Para a padronização da metodologia, considerou-se o fino de minério de ferro de pior performance na operação de moagem. Como equipamento básico de testes, construiu-se um pequeno moinho cilíndrico (fig 2) em chapa de aço com eixos apoiados em mancais e conectado rigidamente a um conjunto motor-reductor. Para a medição do consumo de energia elétrica, adaptou-se um medidor. Como a moagem industrial é conduzida a úmido, com concentração de sólidos na polpa da ordem de 80% (densidade = 2,80), optou-se por adotar este mesmo valor para os testes de laboratório. Como meio moente, foram escolhidas bolas ligadas com cromo, de forma a minimizar o desgaste. O princípio básico adotado foi o de fixar as variáveis do ensaio, de forma a que o produto gerado após a moagem do minério mais duro (escolhido para referência), apresentasse a superfície específica padronizada para a moagem industrial, ou seja: $1800 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$. Após a realização de uma série de experimentos, foram definidas então as condições padrões da metodologia, quais sejam:

CARACTERÍSTICAS DO MOINHO

diâmetro interno = 317 mm

comprimento interno = 310 mm

volume interno = 24,5 l

superfície interna lisa, sem revestimento

velocidade crítica (Vc) = 75,1 r.p.m.

velocidade de operação = 50,0 r.p.m. (66,6% Vc)

MEIO MOENTE

Bolas de ferro fundido ligado com 25% de cromo e diâmetro de 30 mm. Peso total da carga igual a 40 kgf, correspondendo a um enchimento de 36%.

. ACESSÓRIOS

Conta-Giro, para totalização do número de revoluções.

Wattmeter, para medição do consumo de energia elétrica.

Permeâmetro Fisher, modelo 95, para medição da superfície específica do material.

Balança de precisão, filtro, peneirador, etc.

. PARÂMETROS DO ENSAIO

Peso de minério seco = 9560 g (80% sólidos)

Peso de água = 2337 g

Número total de revoluções = 5250

O ensaio é executado conforme mostra o fluxograma da figura 3.

Em linhas gerais, toma-se uma amostra do minério a testar, procedendo-se a sua secagem e determinando-se a sua superfície específica inicial (s_1). Em seguida, tomam-se os pesos de água (2337 g) e minério (9560 g) definidos, introduzindo-os no moinho com a carga de bolas. Liga-se o moinho e após totalizadas 5250 rotações o equipamento é desligado automaticamente. Descarrega-se, então, a polpa, procedendo-se a sua filtração, seguindo-se a secagem da torta. Daí, o material é analisado, determinando-se a sua superfície específica (s_2). Após a leitura referente ao consumo de energia elétrica no ensaio, (E), determina-se o índice de moabilidade da amostra testada, através da equação (2), ou seja:

$$K = (s_2 - s_1) / E \quad (\text{cm}^2/\text{g.wh})$$

Para informação complementar, são executadas análises químicas e granulométricas do fino de minério, antes e após o ensaio.

3) CARACTERÍSTICAS DOS MINÉRIOS ESTUDADOS

Desenvolvido o ensaio de moabilidade, foram então selecionados os finos de minério de ferro para o estudo. Na época do trabalho, eram utilizados nas plantas de pelotização 11 diferentes finos, procedentes de regiões e processamentos variados.

Esses minérios apresentavam características químicas e granulométricas bastante distintas, conforme pode ser verificado através da figura 4.

4) PROGRAMA DE ESTUDO

PROCEDIMENTOS

Definidos os minérios para o estudo, foi elaborado um plano de trabalho constando de execução de ensaios de moabilidade, testes de moagem em planta piloto e análises microscópicas dos minérios.

ENSAIOS DE MOABILIDADE

Visando a um levantamento de dados que possibilitasse a determinação dos valores médios dos índices de moabilidade de cada minério, bem como dos correspondentes desvios padrões, foi programada a execução de no mínimo 10 ensaios para cada fino. Ao final do estudo, foram realizados 134 ensaios, assim distribuídos:

Tipo de Fino	Nº de Ensaios
A	11
B	13
C	12
D	13
E	13
F	11
G	14
H	11
I	10
J	13
L	13
TOTAL	134

TESTES EM PLANTA PILOTO

De forma a estabelecer um confronto entre os índices de moabilidade determinados e a produtividade da moagem, foram realizados alguns testes em uma planta piloto, onde foram simuladas as condições vigentes no processamento industrial. Para tal, foram escolhidos os minérios A, B, D, G, J e L. Essa planta piloto possui um circuito de moagem a úmido, fechado com hidrociclone. O moinho de bolas tubular opera com potência instalada de 42 kw e apresenta dimensões internas de 1,3 m de diâmetro e 2,5 m de comprimento. O hidrociclone tem diâmetro de 100 mm.

Os testes de moagem com os minérios escolhidos foram conduzidos de forma a se obter um produto moído na faixa de $1800 \pm 50 \text{ cm}^3/\text{g}$.

ANÁLISES MICROESTRUTURAIS

O estudo contemplou também a execução de análises microscópicas (via microscópio eletrônico de varredura - MEV) dos diversos finos. Assim, amostras representativas dos minérios foram analisadas, determinando-se a ocorrência de partículas minerais policristalinas (figura 5), estimando-se o percentual de sua ocorrência. [4]

5) RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizados os ensaios de moabilidade com as diversas amostras de finos, foram calculados os valores médios dos índices e os seus desvios padrões, encontrando-se os valores mostrados na tabela I.

TIPO DE MINÉRIO	MOABILIDADE K (cm ² /g.wh)	DESVIO PADRÃO	VARIAÇÃO RELATIVA
A	1,160	0,091	1,00 (REFERÊNCIA)
B	1,204	0,066	1,04
C	1,251	0,080	1,08
D	1,435	0,080	1,24
E	1,731	0,314	1,49
F	1,872	0,240	1,61
G	1,983	0,106	1,71
H	2,158	0,304	1,86
I	2,331	0,066	2,01
J	2,623	0,769	2,26
L	3,084	0,169	2,66

TABELA I - Índices de moabilidade dos finos de minério de ferro

Conforme pode ser visto, os índices de moabilidade dos finos (K) variaram numa faixa bastante ampla, sendo que o minério mais mole (L) apresentou um valor superior a 2,5 vezes em relação ao minério mais duro (A). Os desvios padrões dos finos E, F, H e J mostraram-se consideravelmente mais altos que dos demais. Foi constatado que estes apresentaram maiores desvios na distribuição granulométrica, principalmente o minério J.

Os testes de moagem realizados na planta piloto apresentaram os resultados mostrados na tabela II.

TIPO DE MINÉRIO	PRODUÇÃO MOINHO (kg/h)	CONSUMO ENERGIA (kwh/t)	FINURA PRODUTO (cm ² /g)	DENSIDADE DA POLPA NO MOINHO	MOABILIDADE K (cm ² /g.wh)
A	1049	22,72	1837	2,78	1,156
B	1068	21,94	1809	2,83	1,188
D	1298	18,93	1805	2,81	1,371
G1	1590	15,11	1842	2,75	1,905
G2	1671	14,43	1795	2,76	2,051
J	2639	10,16	1860	2,75	3,008
L	2933	8,85	1789	2,75	3,180

TABELA II - Resultados dos testes de moagem em planta piloto

Vale mencionar que o minério tipo G foi moído, considerando-se duas amostras com características químicas diferentes (G1 e G2). Os dados referentes à produção horária e consumo específico de

energia elétrica foram correlacionados com os índices de moabilidade dos minérios, obtendo-se índices de correlação próximos da unidade, conforme mostra a figura 6. É importante destacar a grande redução no consumo específico de energia elétrica, observado com o aumento do índice de moabilidade.

As análises microestruturais dos minérios permitiram classificar os finos em 4 grupos, de acordo com a ocorrência de partículas policristalinas, conforme mostra a tabela III.

GRUPO	TIPO DE MINÉRIO	PARTÍCULAS POLICRISTALINAS
1	A	ABAIXO DE 30%
	B	
	C	
2	D	DE 30 A 50%
	E	
	F	
	G	
3	H	DE 50 A 70%
	I	
	J	
4	L	ACIMA DE 70%

TABELA III - Ocorrência de partículas policristalinas nos minérios de ferro

Baseando-se nestes dados e nos valores médios dos índices de moabilidade (tabela I), foi construído o gráfico da figura 7, mostrando de forma genérica o crescimento do índice com o aumento da porcentagem de partículas policristalinas.

As análises microestruturais mostraram ainda que "quanto menores eram os tamanhos das partículas analisadas, menor era a ocorrência das partículas policristalinas". Este fato veio justificar o porquê de "minérios muito mais grossos (H, I) apresentarem índices de moabilidade muito maiores que os mais finos (B, C)", embora fossem procedentes de mesmas minas.

Classificados os minérios de ferro, tornou-se mais fácil o planejamento das pilhas industriais. Atualmente, são calculados os

índices resultantes da mistura, através de uma média ponderada dos índices de moabilidade individuais, ou seja:

$$M = \left(\sum_{i=1}^n p_i \cdot K_i \right) / 100 ; \text{ sendo}$$

M = índice de moabilidade da pilha

n = número de minérios componentes

p_i = porcentagem de participação do minério i

K_i = índice de moabilidade do minério i

Os índices das pilhas, assim obtidos, já foram correlacionados com os índices de produtividade dos moinhos industriais, obtendo-se correlações bastante significativas, fugindo do escopo deste trabalho a apresentação dos resultados obtidos nessa investigação dos parâmetros industriais.

6) CONCLUSÃO

Através do estudo ora realizado, foi possível classificar os finos de minério de ferro hematítico da CVRD, em função dos seus índices de moabilidade. Foi constatada a grande influência das partículas policristalinas na moabilidade dos finos testados, mostrando a importância dos estudos microestruturais para a análise dos problemas relacionados à cominuição.

Dessa forma, o planejamento a curto, médio e longo prazos das pilhas de minério industriais foi otimizado, resultando em menores flutuações da produtividade dos moinhos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Beraldo, J. L. - Moagem de minério em moinhos tubulares, p. 16, Curso promovido pela ABM, agosto 1984.
- [2] Perry, H. J. - Chemical Engineers Handbook, p. 8-8, fourth edition, Macgraw-Hyll book company, Tokyo, 1964.
- [3] Mourão, J. M. e Stegmiller, L. - Moabilidade dos finos de minério de ferro da CVRD, trabalho interno da Superintendência de Pelotização da CVRD, 1986.
- [4] Pinheiro, P.; Souza Neto, A. N. - Exame dos minérios finos produzidos pela CVRD no Sistema Sul, trabalho interno da Superintendência de Tecnologia da CVRD, 1985.

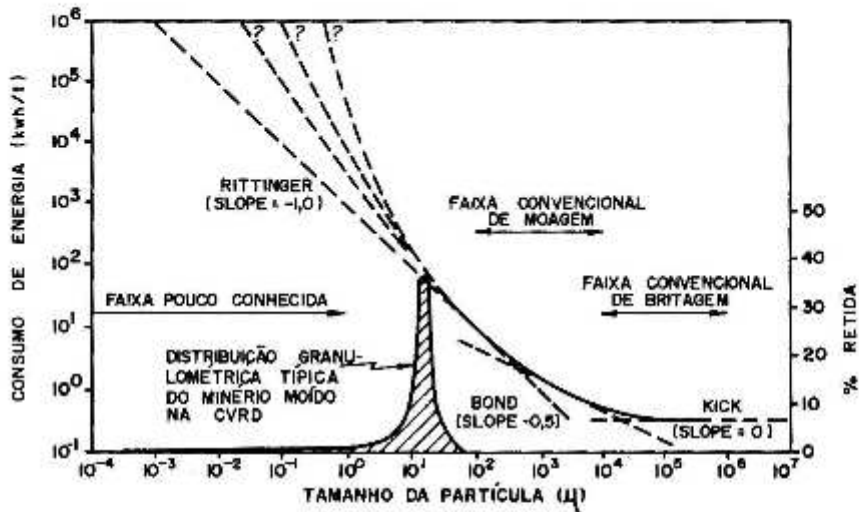


Fig 1- RELAÇÃO ENTRE ENERGIA FORNECIDA E TAMANHO DA PARTÍCULA DO PRODUTO NA COMINUIÇÃO (HUKKI, 1961).
CURVA GRANULOMÉTRICA TÍPICA DO MINÉRIO MOÍDO NA CVRD.

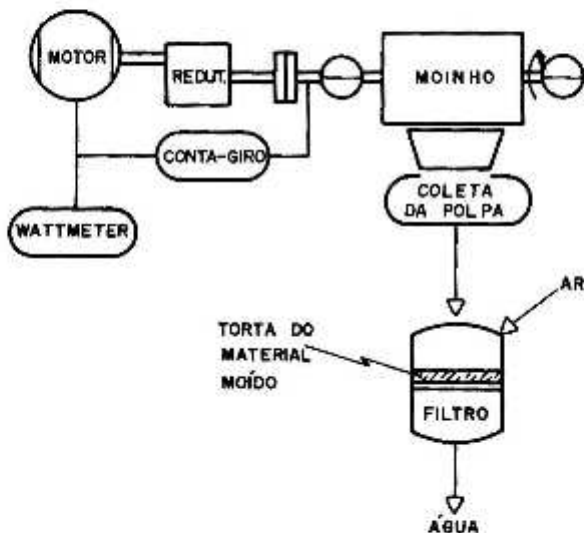


Fig 2 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO MOINHO USADO PARA OS ENSAIOS DE MOABILIDADE.

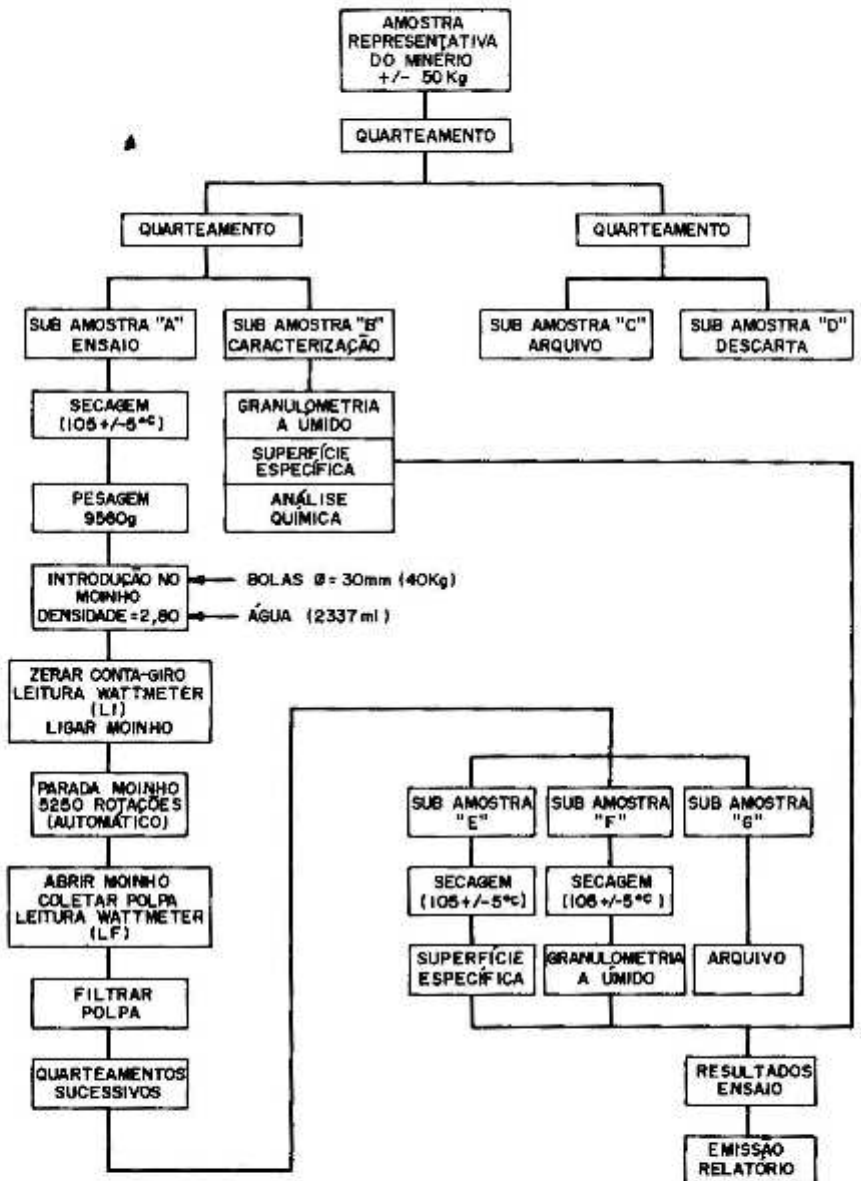


Fig. 3 - FLUXOGRAMA DO ENSAIO DE MOABILIDADE.

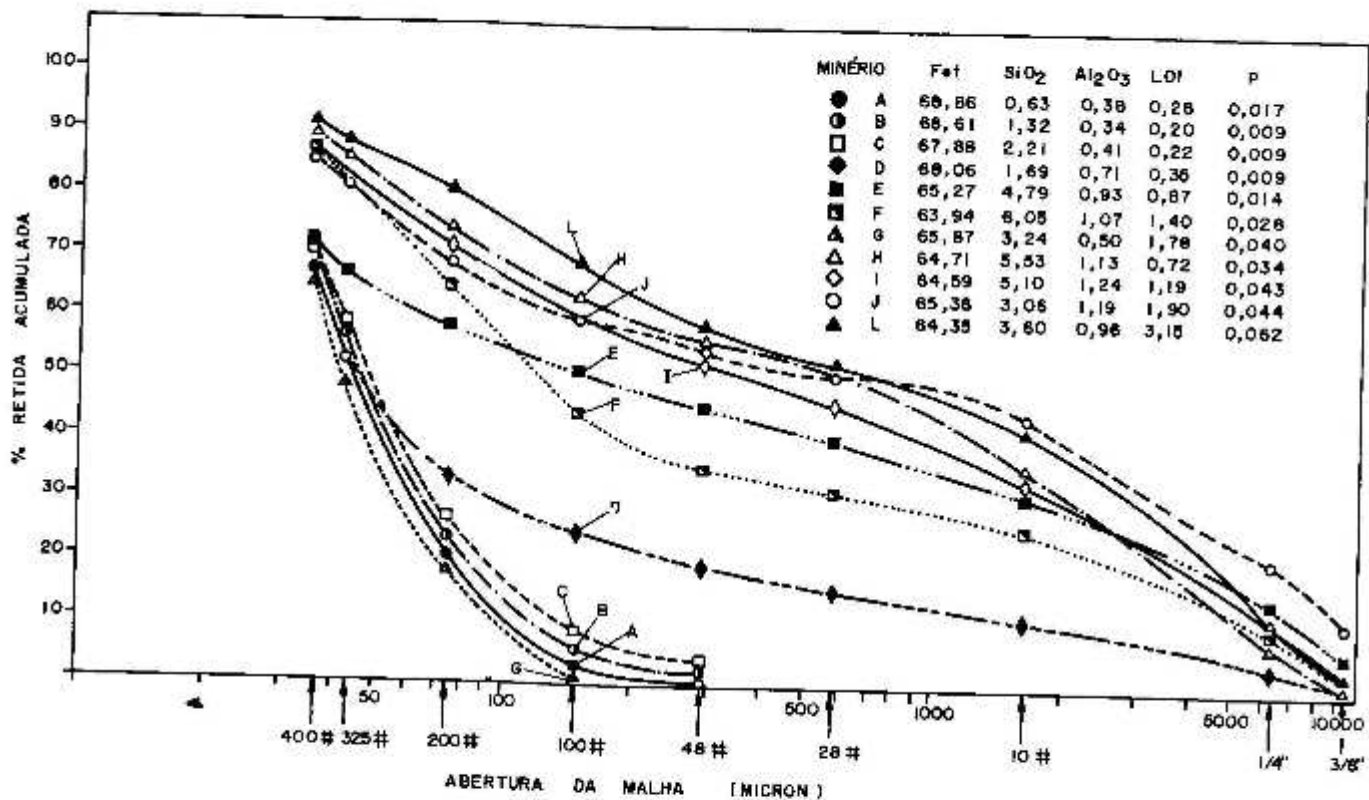


Fig. 4 - CARACTERÍSTICAS DOS FINOS DE MINÉRIO DE FERRO TESTADOS. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E CURVAS GRANULOMÉTRICAS MÉDIAS.

[MONOCRISTALINAS]



[POLICRISTALINAS]

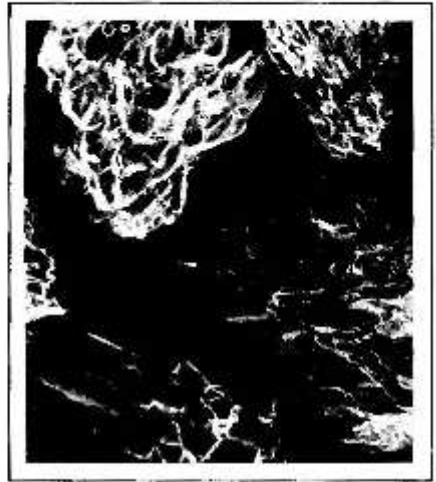


Fig. 5 - PARTÍCULAS MONO E POLICRISTALINAS DE MINÉRIO DE FERRO HEMATÍTICO (MEV).

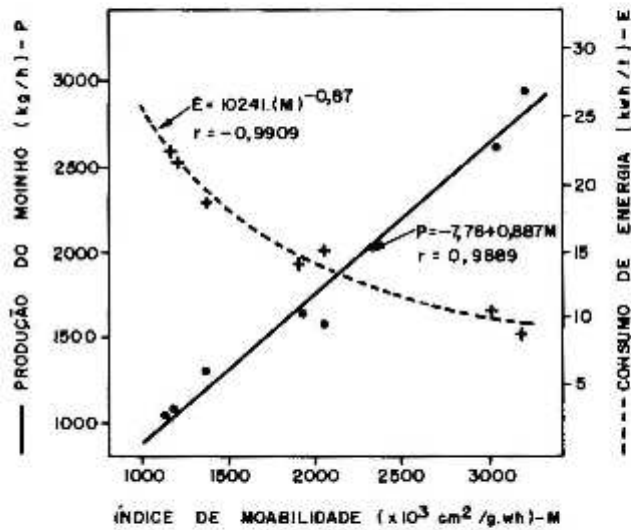


Fig. 6 - CORRELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE MOABILIDADE DOS MINÉRIOS, PRODUÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA DO MOINHO PILOTO.

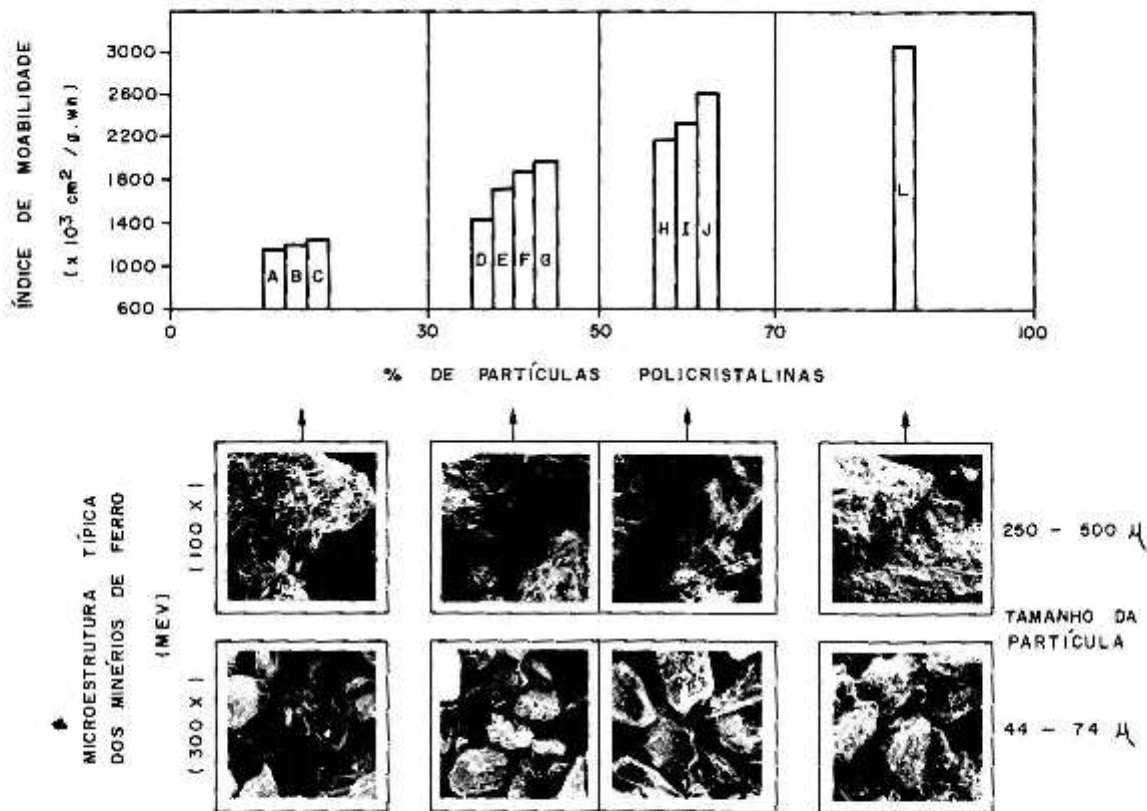


Fig. 7 - INFLUÊNCIA DAS PARTÍCULAS POLICRISTALINAS NA MOABILIDADE DOS MINÉRIOS DE FERRO. MICROESTRUTURA TÍPICA DOS FINOS MINERAIS.