



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA
DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL

**ESTUDO DE UM MÉTODO SIMPLIFICADO
PARA DETERMINAÇÃO DO "ÍNDICE DE TRABALHO"
E SUA APLICAÇÃO À REMOAGEM**

Série Tecnologia Mineral	Nº 36	Seção Beneficiamento	Nº 23	Brasília	1985
-----------------------------	-------	----------------------	-------	----------	------

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA

Antonio Aureliano Chaves de Mendonça - Ministro de Estado

DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL

José Belfort dos Santos Bastos - Diretor Geral

DIVISÃO DE FOMENTO DA PRODUÇÃO MINERAL

Sylvio Baeta Neves - Diretor

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Roberto Cerrini Villas Bôas - Superintendente

Autores: Hedda Vargas Figueira *
Luiz Antonio Pretti **
Luiz Roberto Moura Valle ***

ESTUDO DE UM MÉTODO SIMPLIFICADO PARA DETERMINAÇÃO DO "ÍNDICE DE TRABALHO" E SUA APLICAÇÃO À REMOAGEM

Execução e elaboração do trabalho pelo
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM
Através do convênio DNPM/CPRM

* Eng^a Química
** Eng. Metalúrgico, estagiário do CETEM
*** Eng. Metalúrgico, estagiário do CETEM

Publicação do Departamento Nacional da Produção Mineral
Setor de Autarquias Norte
Quadra 01 - Bloco B - Telex (061)1116
70000 - Brasília (DF) - Brasil

Copyright 1985
Reservados todos os direitos
Permitida a reprodução, desde que mencionada a fonte

Depósito Legal
Biblioteca Nacional do Rio de Janeiro
Instituto Nacional do Livro

Brasil. DNPM

Estudo de um método simplificado para determinação do "índice de trabalho" e sua aplicação à remoagem/Hedda V. Figueira, Luis A. Pretti e Luiz R. M. Valle. - Brasília, 1985.

...p. il. - (Brasil.DNPM. Série Tecnologia Mineral; 36. Seção Beneficiamento; 23)

"Trabalho executado pelo Centro de Tecnologia Mineral, através do convênio DNPM/CPRM.

Bibliogr.

1. Tecnologia Mineral - Brasil. I. Figueira, H.V. II. Pretti, L.A. III. Valle, L.R. IV. Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro.

V. Título. VI. Série

CDD 622.7

CDU 622.2 (81)

Resumo

Abstract

1. INTRODUÇÃO	01
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	03
3. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE ÍNDICE DE TRABALHO	05
4. DETERMINAÇÕES REALIZADAS PELO MÉTODO DIRETO OU MÉTODO DE BOND	09
5. MÉTODO SIMPLIFICADO	10
5.1. Equipamento Utilizado	10
5.2. Procedimento Operacional	10
5.2.1. Preparação da Amostra para o Teste	10
5.2.2. Teste de Moabilidade	11
5.2.3. Determinação da Constante de Calibração	11
5.2.4. Cálculo do Índice de Trabalho Simplificado	12
6. APLICAÇÃO DO MÉTODO SIMPLIFICADO PARA MOAGEM	13
7. MÉTODO COMPARATIVO APLICADO À MOAGEM	14
7.1. Preparação das Amostras	15
7.2. Testes de Moabilidade	15
7.3. Determinação do Índice de Trabalho Comparativo à Remoagem	16
8. MÉTODO SIMPLIFICADO APLICADO À REMOAGEM	17
8.1. Metodologia Desenvolvida	17
8.1.1. Amostra do Teste	17
8.1.2. Teste de Moagem	20
8.1.3. Determinação do Tempo Ótimo de Moagem	20
8.2. Resultados Obtidos	25
9. CONCLUSÕES	25
10. BIBLIOGRAFIA	27

RESUMO

A determinação do Índice de Trabalho (Wi) pelo método de Bond, além de necessitar de um moinho padrão, é trabalhosa e demorada. Por isso, alguns autores desenvolveram métodos mais simples que, usando a equação de Bond, permitem o cálculo do Wi. No presente trabalho estudou-se o método desenvolvido por Jauregui, que utiliza um moinho comum de laboratório, para o qual se determina um fator a partir de dados obtidos em curvas de moagem de minérios, cujos Wi são determinados no moinho de Bond. A determinação do Wi no moinho calibrado é simples e rápida, e permite acompanhar as variações do minério em moagens industriais e também determinar o Wi onde não haja moinho de Bond. Estudou-se também a utilização do moinho calibrado para cálculo do Wi de remoagem, que constitui problema, já que pelo método de Bond não é possível determiná-lo, e os métodos comparativos usados são sempre questionados.

ABSTRACT

The work index (Wi) determination by Bond's method is difficulty and slow; moreover it needs a standard mill. Some authors has developed simples methods that, using Bond's equation, permit to calculate the Wi. This work presents the method developed by Jauregui, that utilize a usual laboratory mill, of which we determine a factor since data, obtained by ore grinding curves, whose Wi are determined in Bond's mill. The Wi determination in the calibrated mill is simple and fast, and permits to accompany the ore variation in industrial millings and, likewise, to determine the Wi where is no Bond's mill. Also it was studied the utilization of calibrated mill to calculate the Wi of re-grinding, that is a question, why it is impossible to determine it by Bond's methods and always are quarreling with comparative methods.

1. INTRODUÇÃO

A determinação de uma relação que permitisse o cálculo da energia necessária à fragmentação de um material, e tornasse possível o dimensionamento de sistemas de moagens industriais, há muito tempo interessa ao cientista e ao técnico.

Das teorias enunciadas, a mais utilizada para o dimensionamento de equipamentos industriais é a de Bond, que estabelece que a energia necessária para a fragmentação de um material homogêneo é inversamente proporcional à raiz quadrada do diâmetro das partículas moídas, sendo a constante de proporcionalidade conhecida por Índice de Trabalho (W_i), específico do material.

A determinação do W_i pelo método de Bond, além de exigir um moinho padrão, está sujeita a muitos erros. Vários métodos de mais fácil execução, e dispensando o moinho padrão, têm sido estudados.

Jauregui utilizou um moinho de bolas de laboratório para determinação do W_i . Neste método, alguns minérios de W_i conhecidos são submetidos à moagem no moinho de bolas e determinados os W_i operacionais que, comparados aos W_i de Bond, permitem o cálculo de uma constante de calibração que capacita o moinho para determinações de W_i de qualquer minério. Neste trabalho usou-se o método de Jauregui para calibrar um moinho de laboratório, e testou-se a sua aplicação em outros minérios.

A metodologia de Bond não permite que se determine o W_i com a finalidade de fornecer dados para o dimensionamento de moinhos para a remoagem, devido à granulometria fina da alimentação. Alguns autores têm desenvolvido métodos para determinar o W_i na faixa de tamanhos necessária para remoagem. Desses métodos, o mais empregado é o de Berry e Bruce, que usa os valores de P_{80} do minério como sendo do material a ser removido. Esses valores são obtidos das curvas de moagem, determinan

do-se graficamente a granulometria do minério moído. Relacionando os tamanhos da alimentação, do produto e do W_i do minério, e a granulometria do material de remoagem, obtém-se o valor do W_i de remoagem.

Neste trabalho estudou-se também uma metodologia simplificada para determinar o W_i de remoagem usando um moinho de laboratório calibrado.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A teoria da cominuição está ligada com a relação energia-tamanho de partículas do produto, a partir de um determinado tamanho de alimentação.

Existem três teorias que quantificam esta energia: a de Rittinger, a de Kick e a de Bond.

A teoria de Rittinger é a mais antiga, datada de 1867. Ela postula que o trabalho útil realizado em britagem e moagem é diretamente proporcional à nova área superficial produzida e, portanto, inversamente proporcional ao diâmetro do produto. Posteriormente ela foi ampliada para incluir o conceito de energia superficial, e Gaudin⁽¹⁾ a definiu como: "A eficiência de uma operação de cominuição é a razão entre energia superficial produzida e a energia cinética gasta". Usando valores mais precisos de energia superficial, verificou-se que cerca de 99% da energia requerida para a britagem e moagem são perdidos, sendo apenas uma fração muito pequena desta energia usada para a quebra.

A segunda teoria, a teoria de Kick de 1885, está baseada em diagramas tensão-deformação de cubos sob compressão. Ela estabelece que: "A energia requerida para produzir variações análogas no tamanho de corpos geometricamente semelhantes é proporcional ao volume destes corpos".

Visto que as teorias citadas não satisfaziam a todos os casos práticos, e a indústria necessitava de algumas regras para classificar os materiais segundo suas respostas à cominuição, Bond postulou uma lei empírica que é chamada muitas vezes de 3ª Lei da Fragmentação: "A energia consumida para reduzir de tamanho um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho do produto".

A equação básica da terceira lei é:

$$E = 10Wi \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (1)$$

onde: E é a energia gasta em kWh/t curta;

F e P são os diâmetros da abertura da tela, em micrômetros, por onde passam 80% da alimentação e do produto, respectivamente;

Wi é o índice de trabalho, específico do material.

O índice de trabalho é o parâmetro de cominuição que expressa a resistência do material à britagem e moagem. Numericamente, é igual ao trabalho requerido para reduzir o material de um tamanho teoricamente infinito até 80% passante em 100µm.

Se o material for homogêneo, na redução de tamanho o valor de seu índice de trabalho será constante para todos os estágios de redução. Entretanto, é comum encontrar estruturas heterogêneas em rochas e, neste caso, quando se deseja fragmentar abaixo do tamanho do grão natural, o valor do Wi será maior. Determinações de Wi em laboratório mostraram variações na resistência à quebra nos diversos tamanhos testados; por esta razão, os testes de laboratório devem, preferencialmente, ser realizados próximos ao tamanho do produto requerido na moagem comercial.

Em 1937, uma série de autores encabeçados por Walker⁽³⁾ chegou à conclusão que as relações de Rittinger, Kick e Bond podem ser obtidas pela solução de uma mesma equação diferencial.

$$d\hat{E} = - C \frac{dx}{x^n} \quad (2)$$

onde: \hat{E} = energia por unidade de área

n = parâmetro dependente do material e equipamento de cominuição

x = tamanho de partícula

C = constante

Fazendo $n = 1$, e integrando entre x_0 e x_1 , tamanhos inicial e final das partículas, tem-se a equação de Kick:

$$d\hat{E} = -C \frac{dx}{x} \dots \hat{E} = C \ln \frac{x_1}{x_0} \quad (3)$$

Fazendo $n = 2$, a equação de Rittinger:

$$d\hat{E} = -C \frac{dx}{x^2} \dots \hat{E} = C \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_0} \right) \quad (4)$$

e, fazendo $n = 3/2$, a equação de Bond:

$$d\hat{E} = -C \frac{dx}{x^{3/2}} \dots \hat{E} = \frac{1}{2} C \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_0} \right) \quad (5)$$

3. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE ÍNDICE DE TRABALHO

Vários métodos foram derivados da 3ª Lei de Fragmentação para determinar os valores do índice de trabalho, a partir de diversos tipos de testes de laboratório.

O mais importante destes métodos é o padronizado por Bond⁽⁴⁾, também conhecido como "método direto". Este método utiliza o teste de moabilidade para moinhos de bolas e visa calcular, através de um circuito fechado de moagem, com uma determinada carga circulante, a quantidade de produto menor que uma malha pré-determinada (denominada malha-teste, em geral 100 malhas), produzida por um número calculado de rotações do moinho de bolas, em períodos consecutivos, até atingir o equilíbrio (Figura 1).

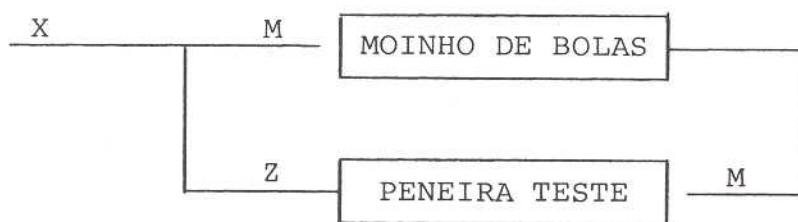


Figura 1. - Esquema do Teste de Bond

onde: M = alimentação total (constante)
X = alimentação a ser adicionada
Y = produto menor que a malha-teste
Z = produto maior que a malha-teste (retido)

Ao ser atingido o equilíbrio, isto é, quando $X = Y$, o circuito estará em regime para a sua carga circulante, e o índice de trabalho (W_i) poderá ser calculado pela equação 6:

$$W_i = \frac{44,5}{(P_i)^{0,23} \cdot (G_{bp})^{0,82}} \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)^{-1} \quad (6)$$

onde: P_i = abertura da malha-teste, em micrômetros;
 G_{bp} = variável que define a moabilidade do minério, em gramas por rotação;
 P e F = diâmetros da abertura das peneiras, em micrômetros, por onde passam 80% do produto e da alimentação, respectivamente.

O teste de moabilidade de Bond tem sido usado com sucesso na avaliação dos requisitos de energia para moinhos de bolas, de barras, e para a escolha do equipamento de cominuição em escala industrial. Este teste proporciona uma medida acurada da moabilidade do minério, porém é necessário cerca de 8 horas para realizá-lo, e em avaliações de eficiência de moagem industrial é desejável um processo que consuma menos tempo e tenha a mesma precisão.

O método descrito por Berry e Bruce⁽⁵⁾ foi desenvolvido para estimar índice de trabalho de Bond em um tempo menor. Este método necessita de um minério-referência, com W_i conhecido. Utilizando a equação (1), o W_i desconhecido de um minério-teste pode ser determinado.

No uso deste método, supõe-se que: as amostras têm o mesmo peso, aproximadamente as mesmas distribuições de tamanho na alimentação, são moídas no mesmo moinho sob idênticas condições de tempo, carga de bolas, percentagem de sólidos, velocidade etc. Deste modo, o trabalho necessário (W) se

rã o mesmo para ambos os minérios. Igualando-se os valores de W para o minério-referência (R) e o minério-teste (T), obtém-se:

$$W = Wi_R \left(\frac{10}{\sqrt{P_R}} - \frac{10}{\sqrt{F_R}} \right) \quad (7)$$

$$W = Wi_T \left(\frac{10}{P_T} - \frac{10}{F_T} \right) \quad (8)$$

$$Wi_T = Wi_R \frac{P_R^{-0,5} - F_R^{-0,5}}{P_T^{-0,5} - F_T^{-0,5}} \quad (9)$$

O método de Berry e Bruce é um processo relativamente simples para a determinação do Wi de um material, e é chamado de "Método Comparativo de Determinação do Parâmetro de Moabilidade". De fato, o que se faz é uma comparação dos parâmetros de distribuição de tamanhos de um minério desconhecido e de um minério de referência, moídos sob condições idênticas até a granulometria desejada, no mesmo moinho de laboratório. Uma vez determinado o Wi do minério desconhecido, este pode ser utilizado como minério-referência contra outros minérios a serem comparados. O método comparativo também pode ser utilizado para o cálculo do Wi em produtos a serem remoídos, onde o minério "in natura" é o material de referência.

Jauregui⁽⁶⁾ também estudou um método simplificado, de mais fácil execução, e que dispensa o uso do moinho padrão de Bond. Este método, aqui denominado método simplificado, utiliza o teste de moagem em bancada desenvolvido em um moinho de bolas de laboratório. Ao contrário dos outros procedimentos citados, este método não necessita de um minério referência para comparação cada vez que o teste é feito, mas utiliza uma constante de calibração para cada moinho e condições especificadas.

Supondo que o índice de trabalho operacional de bancada (Wi_{oper}) é proporcional ao índice de trabalho determinado pelo "método direto" de Bond, tem-se que:

$$W_i = \alpha W_{i_{oper}} = \alpha \frac{44,5}{(P_i)^{0,23} (Gbp)^{0,82}} \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)^{-1} \quad (10)$$

onde α é a constante de calibração.

Considerando a energia específica líquida (\hat{E}) fornecida durante o teste de bancada, em kWh/t:

$$\hat{E} = \frac{44,5}{(P_i)^{0,23} (Gbp)^{0,82}} \quad (11)$$

logo:

$$W_i = \frac{\alpha \hat{E}}{10} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-1} \quad (12)$$

Mantendo-se as condições de moagem (velocidade, carga de bolas etc) de cada minério testado num mesmo moinho, pelo método simplificado, então a energia específica fornecida será a mesma. Daí, define-se a constante de calibração do moinho:

$$K = \frac{\alpha \hat{E}}{10} \quad (13)$$

Deste modo, o W_i pode ser calculado diretamente a partir de:

$$W_i = K \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \quad (14)$$

Quando uma mesma distribuição granulométrica da alimentação é usada para diferentes minérios, a dureza relativa dos mesmos será refletida pelo afastamento das curvas de distribuição granulométrica do produto e da alimentação.

Desde que o teste de bancada seja feito sob condições bem controladas, boa reprodutibilidade é obtida. Portanto, o método reflete com precisão a dureza relativa do minério.

Neste trabalho, estudou-se alguns minérios

submetidos a moagem em moinho de bolas de laboratório. Através de curvas de moagem, determinaram-se os W_i operacionais que, comparados com os W_i de Bond, também determinados, permitiram o cálculo da constante de calibração que capacita esse moinho para determinações de W_i de qualquer outro minério.

Os minérios utilizados neste trabalho para calibrar o moinho estão apresentados na Tabela 1.

AMOSTRA	MINÉRIO	PROCEDÊNCIA
1	Oxidado de zinco (calamínico)	Mineração Areiense S.A.
2	Oxidado de Zinco (willemítico)	Mineração Areiense S.A.
3	Itabirito	CVRD
4	Polissulfetos auríferos	Vale do Ribeira
5	Sulfeto de cobre	CVRD (Carajás)
6	Sulfetos auríferos	Itapetim (PE)
7	Quartzo aurífero	MIBASA

Tabela 1. - Minérios usados para a calibração do moinho de laboratório.

4. DETERMINAÇÕES REALIZADAS PELO MÉTODO DIRETO OU MÉTODO DE BOND

Utilizando o moinho de Bond e a metodologia estabelecida pelo Projeto de Norma Técnica em tramitação na ABNT, determinou-se o W_i dos sete minérios utilizados neste trabalho, e os resultados encontram-se na Tabela 2.

AMOSTRA	MINÉRIO	W_i (kWh/t)
1	Calamínico	12,89
2	Willemítico	19,42
3	Itabirito	7,82
4	Polissulfetos auríferos	15,71
5	Sulfeto de cobre	15,44
6	Sulfetos auríferos	14,33
7	Quartzo aurífero	19,02

Tabela 2. - W_i determinado pelo método direto ou de Bond.

5. MÉTODO SIMPLIFICADO

5.1. Equipamento Utilizado

Para este teste foi usado o moinho da GALI GHER descrito anteriormente, a uma velocidade de 89rpm (93% da velocidade crítica), com uma carga de 143 bolas de aço pesando 12,6kg, e obedecendo à seguinte distribuição:

Nº DE BOLAS	TAMANHO EM POLEGADA	PESO (kg)	% PESO
53	1 1/4	6,78	58,3
75	1	5,08	40,3
15	7/8	0,74	5,9

Tabela 3. - Carga de bolas usadas no moinho de laboratório.

5.2. Procedimento Operacional

5.2.1. Preparação da amostra para o teste

Toda a amostra deve ser cominuída, através de britagem, de modo que todo o minério a ser utilizado esteja numa granulometria menor que 10 malhas. Considerando que a ma lha teste de moabilidade é 100 malhas, retira-se então a fração abaixo de 100 malhas, por peneiramento a úmido. Deve-se ter o cuidado em manter pequena a quantidade de material a -100 ma lhas na alimentação: menos de 3% seria o ideal. Após secagem do material em estufa, faz-se uma pilha de homogeneização de forma prismática, de onde são retiradas duas amostras de 1 qui lograma: uma para análise granulométrica da alimentação e outra para moagem.

5.2.2. Teste de moabilidade

O moinho é alimentado com 1kg de material, que é moído a 50% de sólidos por um período de 10 minutos. Faz-se a análise granulométrica a seco da alimentação, e a umido do produto moído. Estes resultados são colocados em gráfico log-log, a fim de se obter a abertura em malha na qual passam 80% da alimentação (F) e do produto (P).

Este procedimento foi repetido para os sete minérios citados anteriormente, para os quais já fora determinado o W_i de Bond (Tab. 4). No anexo I e II (Tabela 1 e Gráfico 1) estão apresentados os resultados referentes à amostra 1, a título de exemplo.

5.2.3. Determinação da constante de calibração

A determinação da constante K de calibração é baseada na informação fornecida por vários minérios testados pelo método direto de Bond e pelo simplificado. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com os sete diferentes materiais, moídos de acordo com o procedimento operacional descrito no item anterior e no circuito fechado de Bond. A constante K pode ser calculada a partir da fórmula fornecida por Jauregui⁽⁶⁾.

$$K = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)_j^{-1}}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)_j^{-2}} \quad (15)$$

MINÉRIO	P (µm)	F (µm)	$\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right)^{-1}$	$\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right)^{-2}$	Wi BOND (kWh/t)
1	210	1050	26,2151	687,2339	12,89
2	350	1175	41,1874	1696,4047	19,42
3	125	1200	16,5084	272,5274	7,82
4	270	1075	32,9399	1085,0350	15,71
5	315	1500	32,7614	1073,3092	15,44
6	260	1250	29,6445	878,7950	14,33
7	340	1150	40,4135	1633,2488	19,02

Tabela 4.- Dados para o cálculo da constante de calibração.

A constante de calibração é calculada substituindo-se os valores da Tabela 4 na equação 15.

$$K = \frac{3483,6599}{7326,5540} = 0,4755 \text{ kWh/t}$$

5.2.4. Cálculo do índice de trabalho simplificado

Usando-se a equação 14 como valor de K de terminado, e os valores de P_{80} e F_{80} retirados das curvas de moagem, calcularam-se os valores do Wi simplificado que estão apresentados na Tabela 5.

$$Wi = 0,4755 \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right)^{-1} \quad (16)$$

MINÉRIO	P (μm)	F (μm)	Wi SIMPLIFICADO	Wi BOND	ERRO (%)
1	210	1050	12,47	12,89	3,26
2	350	1175	19,58	19,42	0,82
3	125	1200	7,85	7,82	0,38
4	270	1075	15,66	15,71	0,32
5	315	1500	15,58	15,44	0,91
6	260	1250	14,10	14,33	1,61
7	340	1150	19,22	19,02	1,05

Tabela 5. - Valores do Wi simplificado e do Wi de Bond.

Pode-se observar pela Tabela 5 que os valores do Wi obtidos pelo método simplificado são bem próximos dos obtidos pelo método direto (Bond), e o maior erro encontrado foi de 3,26%. São, portanto, determinações bem confiáveis.

6. APLICAÇÃO DO MÉTODO SIMPLIFICADO PARA MOAGEM

A fim de testar o uso do moinho calibrado, realizou-se a determinação do Wi de alguns minérios em estudo no CETEM.

APLICAÇÃO I: Com 2kg de calcário já britados a -10 malhas, foi possível determinar o índice de trabalho pelo método simplificado. O material -100 malhas foi retirado a úmido, e 1kg do material -10 + 100 malhas foi moído de acordo com as especificações de procedimento. Após a determinação, através de curva log-log do P_{80} e F_{80} , foi calculado o Wi:

$$P_{80} = 200\mu\text{m}$$

$$F_{80} = 1225\mu\text{m}$$

$$K = 0,4755 \text{ kWh/t}$$

$$\text{Portanto, } Wi_s = 0,4755 \left(\frac{1}{\sqrt{200}} - \frac{1}{\sqrt{1225}} \right)^{-1}$$

$$Wi_s = 11,3 \text{ kWh/t}$$

O valor do índice de trabalho determinado pelo método padrão de Bond foi 11,9 kWh/t. Portanto, o erro associado ao método foi de 5%.

APLICAÇÃO II: Utilizou-se um minério sulfetado de níquel e cobre (trincheira) já britado a -14 malhas. Determinou-se o índice de trabalho pelo método de Bond (alimentação fora do especificado no método padrão) e o valor encontrado foi de 20,2 kWh/t. Procedeu-se a determinação do índice de trabalho pelo método simplificado, cujos valores estão a seguir:

$$P_{80} = 335\mu\text{m}$$

$$F_{80} = 1040\mu\text{m}$$

$$Wi_s = 0,4755 \left(\frac{1}{\sqrt{335}} - \frac{1}{\sqrt{1040}} \right)^{-1}$$

$$Wi_s = 20,1 \text{ kWh/t}$$

O erro associado foi apenas de 0,5%.

7. MÉTODO COMPARATIVO APLICADO À REMOAGEM

Para determinar os índices de trabalho para materiais mais finos, necessários para os cálculos de moinhos de remoagem, costuma-se empregar o método de Berry e Bruce ⁽⁵⁾, já descrito no item 3 deste trabalho. Usou-se este método para determinar o Wi de remoagem de alguns minérios, a fim de se comparar com a metodologia que se estava desenvolvendo, empregando

o moinho calibrado.

7.1. Preparação das Amostras

O minério-referência foi britado a -10 malhas e, em seguida, homogeneizado em uma pilha prismática. Desta, retiraram-se 5 amostras de 1kg, sendo uma delas para análise granulométrica da alimentação e as restantes para os testes de moagem em diferentes tempos.

O minério-teste foi moído a -65 malhas e homogeneizado em pilha prismática, da qual retiraram-se também 5 amostras de 1kg, uma para análise granulométrica da alimentação e as demais para os testes de remoagem.

7.2. Testes de Moabilidade

Para a realização destes testes utilizou-se o mesmo equipamento que no método simplificado, já descrito no capítulo 5.

O procedimento dos testes é o mesmo para o minério-referência e o minério-teste, alterando-se apenas os tempos de moagem. As moagens foram realizadas com polpa de 50% de sólidos e com os tempos de 20, 30, 45 e 60 minutos para o minério referência, e 5, 10, 15, 30 e 45, para o minério teste.

As análises granulométricas dos produtos moídos foram realizadas a úmido.

Os dados obtidos nos testes foram lançados em gráficos log-log, determinando-se os valores por onde passam 80% da alimentação e do produto para cada tempo (Gráficos I, II, III, IV e V).

7.3. Determinação do Índice de Trabalho Comparativo de Remoagem

No teste comparativo, os valores de F_R e F_T (tamanho da abertura por onde passam 80% da alimentação do minério-referência e do minério-teste, respectivamente), devem ser iguais. Como os minérios referência e teste têm diferentes granulometrias de alimentação, torna-se necessário uma correlação. Esta é feita colocando-se em gráfico mono-log os valores do tamanho 80% passante do minério-referência e do minério-teste, nos diversos tempos de moagem, obtendo-se uma curva para cada material (Gráficos 1 e 2).

Igualando-se F_R e F_T no tempo zero, obtém-se então para F_R os seguintes valores (ponto A):

- i) MIBASA $F_R = F_T = 187\mu\text{m}$, após 16,5 minutos de moagem (ponto B)
- ii) ITAPETIM $F_R = F_T = 175\mu\text{m}$, após 15 minutos de moagem (ponto B)

O valor de P_T é previamente determinado, e representa a granulometria do minério-teste a ser trabalhado. Nestes testes, $P_T = 74\mu\text{m}$ (200 malhas). Este valor é colocado no gráfico (ponto C), obtendo-se então o tempo gasto para diminuir o minério-teste de F_T a P_T (ponto D). Como o teste comparativo impõe as mesmas condições de operação, o tempo gasto de F_T até P_T deve ser o mesmo para o minério-referência ir de F_R até P_R . Então, partindo-se do ponto B, soma-se o tempo obtido em D, verificando-se na curva do minério-referência o valor de P_R correspondente ao tempo de moagem (ponto E).

$$\text{MIBASA } P_R = 72\mu\text{m}$$

$$\text{ITAPETIM } P_R = 71\mu\text{m}$$

Substituindo-se os valores encontrados na equação 9, tem-se:

$$i) \text{ MIBASA} \quad W_{i_c} = 19,02 \frac{\sqrt{72} - \sqrt{187}}{\sqrt{74} - \sqrt{187}} = 19,7 \text{ kWh/t}$$

$$ii) \text{ ITAPETIM: } W_{i_c} = 14,33 \frac{\sqrt{71} - \sqrt{175}}{\sqrt{74} - \sqrt{175}} = 15,2 \text{ kWh/t}$$

Estes valores serão depois comparados com os W_i obtidos com a metodologia desenvolvida neste trabalho, no moinho calibrado.

8. MÉTODO SIMPLIFICADO APLICADO À REMOAGEM

A determinação do índice de trabalho com a finalidade de fornecer dados para o dimensionamento de moinhos, para a remoagem, constitui um problema, já que não é possível calculá-lo usando a metodologia de Bond, devido à granulometria fina da alimentação.

Alguns autores têm desenvolvido métodos que, pela equação de Bond (equação 1), permitam o cálculo do W_i na faixa de tamanho necessária para a remoagem. Destes métodos, o mais empregado é o comparativo, descrito no item 7, embora não seja amplamente aceito.

Neste trabalho procurou-se estudar uma metodologia que permitisse usar o moinho da GALIGHER, que foi calibrado pelo método simplificado, para determinar o índice de trabalho de remoagem.

8.1. Metodologia Desenvolvida

8.1.1. Amostra do teste

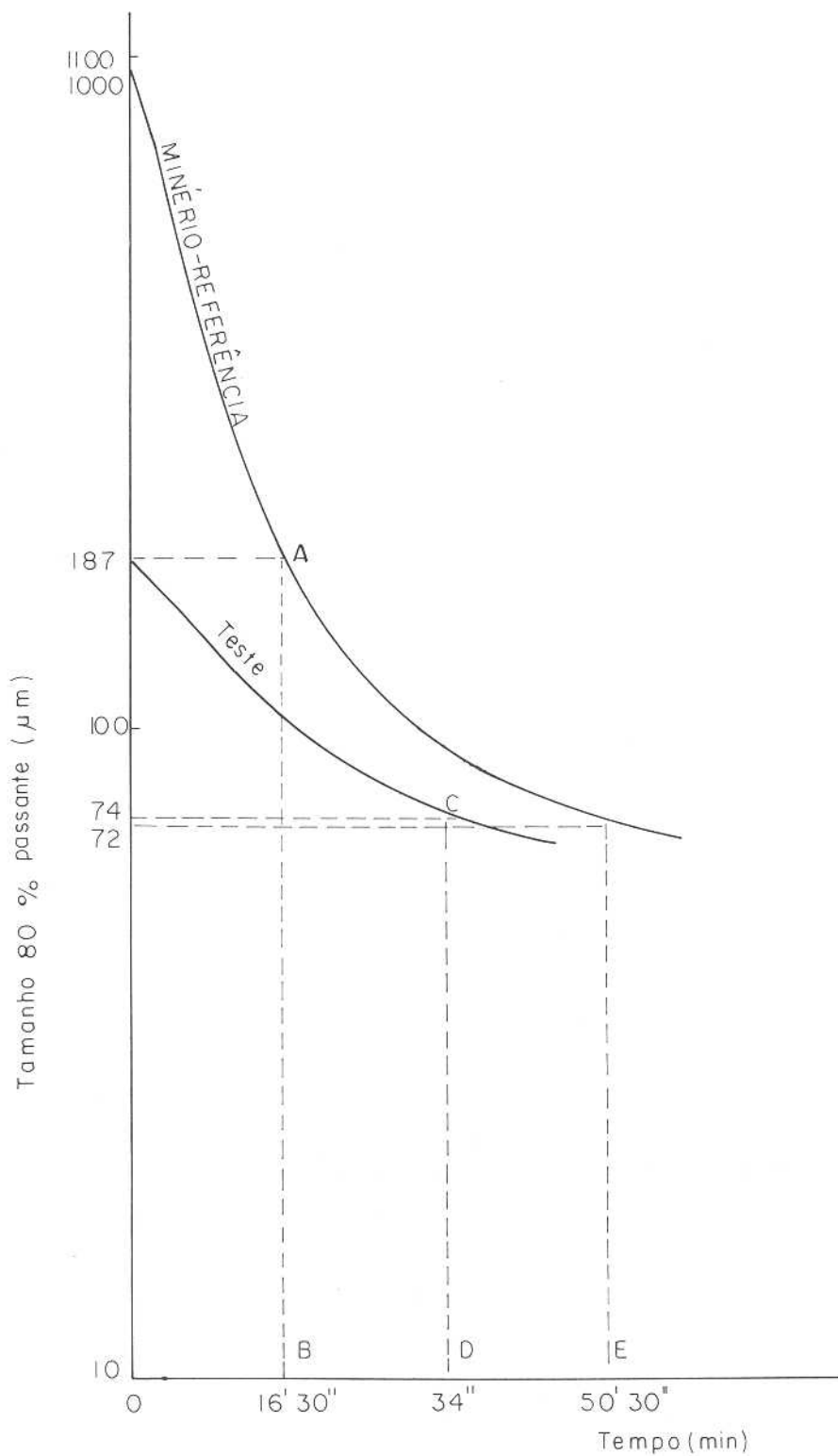


Gráfico I - Tamanho 80 % passante (μm) em relação ao tempo de moagem, para o material teste e o de referência, no teste comparativo (MIBASA)

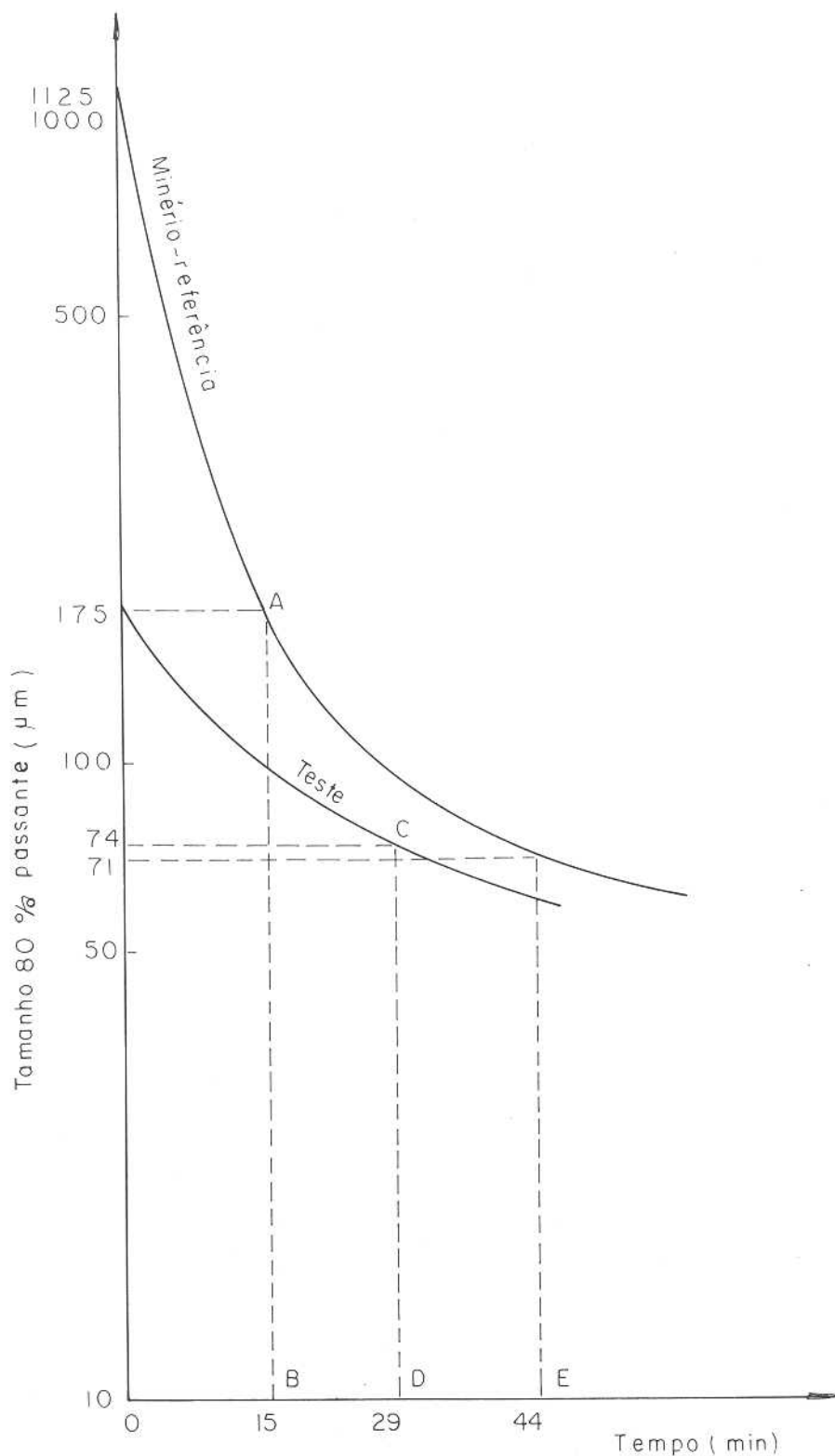


Gráfico 2 - Tamanho 80 % passante (μm) em relação ao tempo de moagem, para o material teste e o de referência, no teste comparativo (ITAPÉTIM)

O material de alimentação para este teste foi preparado moendo-se o minério a -65 malhas, e removendo-se, por peneiramento a úmido, a fração -200 malhas.

Com o material nesta granulometria, fez-se uma pilha de homogeneização de forma prismática, de onde foram retiradas 4 amostras de 1kg de minério: uma para determinar a distribuição granulométrica da alimentação inicial e as outras para os testes de moagem em vários tempos.

8.1.2. Teste de moagem

Nos testes de moagem utilizou-se o moinho calibrado, a mesma carga de bolas, velocidade e percentagem de sólidos usados nos testes de W_i simplificado.

O moinho foi alimentado com 1kg de minério e 1ℓ de água para o 1º período de moagem, que foi de 15 minutos para o minério de Itapetim, e 20 minutos para o minério da MIBASA e para o calcário. A seguir fez-se a análise granulométrica do produto a úmido, e os resultados foram colocados num gráfico log-log. Repetiu-se o procedimento para outros tempos, previamente escolhidos de acordo com os resultados obtidos no 1º período de moagem. Os resultados estão apresentados nos gráficos VI, VII e VIII do anexo.

8.1.3. Determinação do tempo ótimo de moagem

Utilizando-se os valores de P e F, obtidos nos diversos períodos de moagem de cada minério, e a equação 16, pode-se calcular um suposto W_i para cada tempo de moagem, de acordo com as Tabelas 6, 7 e 8.

MIBASA				
TEMPO (minutos)	P (µm)	F (µm)	$\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right)^{-1}$	Wi _s
20	118	198	47,6405	22,7
30	103	198	36,4086	17,3
40	87	198	27,6668	13,2

Tabela 6. - Valor de Wi para cada tempo de moagem.

ITAPETIM				
TEMPO (minutos)	P (µm)	F (µm)	$\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right)^{-1}$	Wi _s
15	140	208	65,8853	31,3
20	123	208	48,0090	22,8
30	97	208	31,0587	14,8

Tabela 7. - Valor do Wi para cada tempo de moagem.

CALCÁRIO				
TEMPO (minutos)	P (µm)	F (µm)	$\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right)^{-1}$	Wi _s
20	101	183	39,0906	18,6
25	89	183	31,1743	14,8
30	80	183	26,3983	12,6

Tabela 8. - Valor do Wi para cada tempo de moagem.

Com os dados das Tabelas 6, 7 e 8 traçou-se os gráficos 3, 4 e 5, nos quais se determinou o tempo que resultaria no valor de Wi encontrado para os mesmos minérios, pelo método comparativo. Desta maneira, determinou-se que o tempo de 30 minutos seria conveniente para a moagem no moinho calibrado, para o teste simplificado de remoagem a 200 malhas.

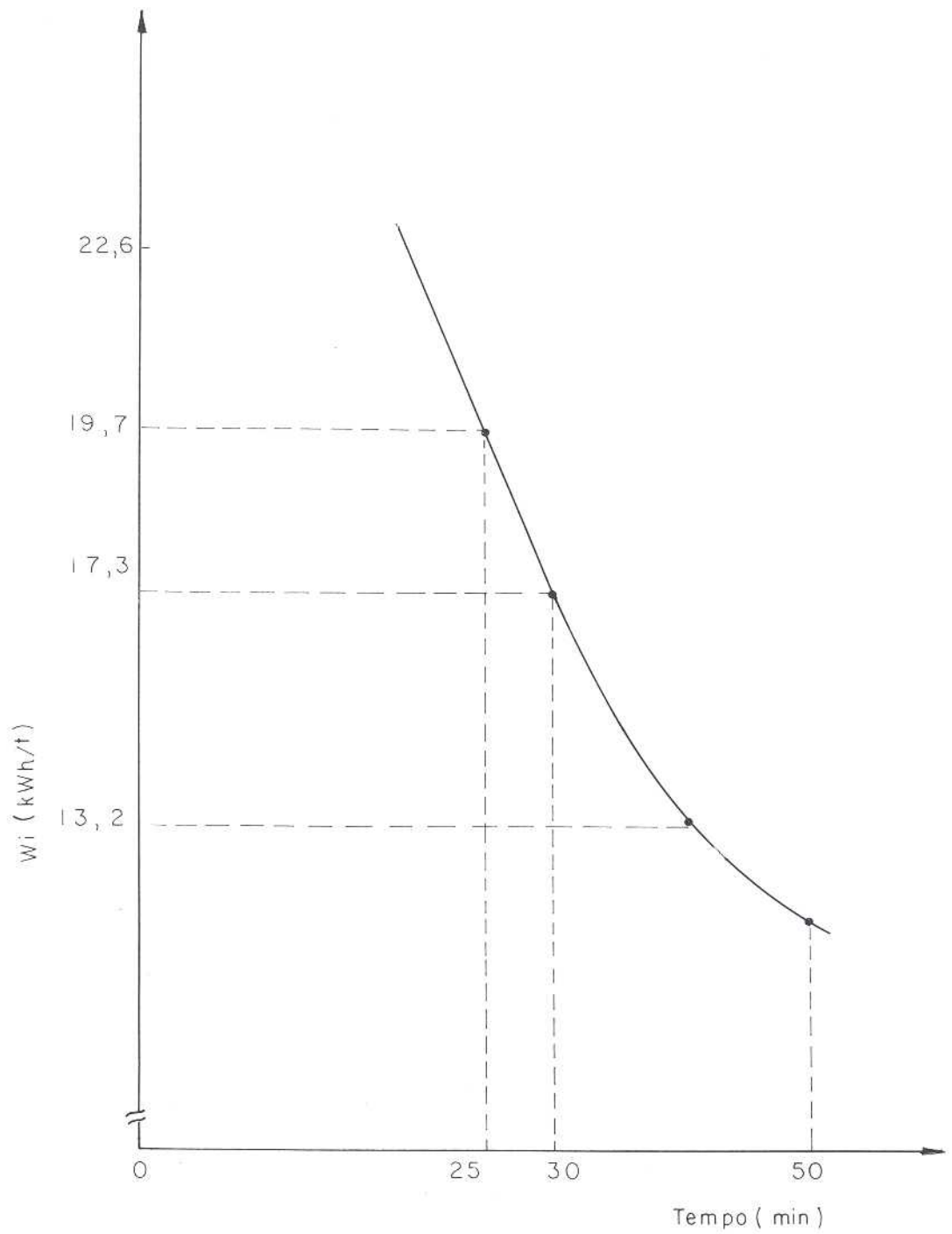


Grafico 3 - MIBASA W_i x tempo

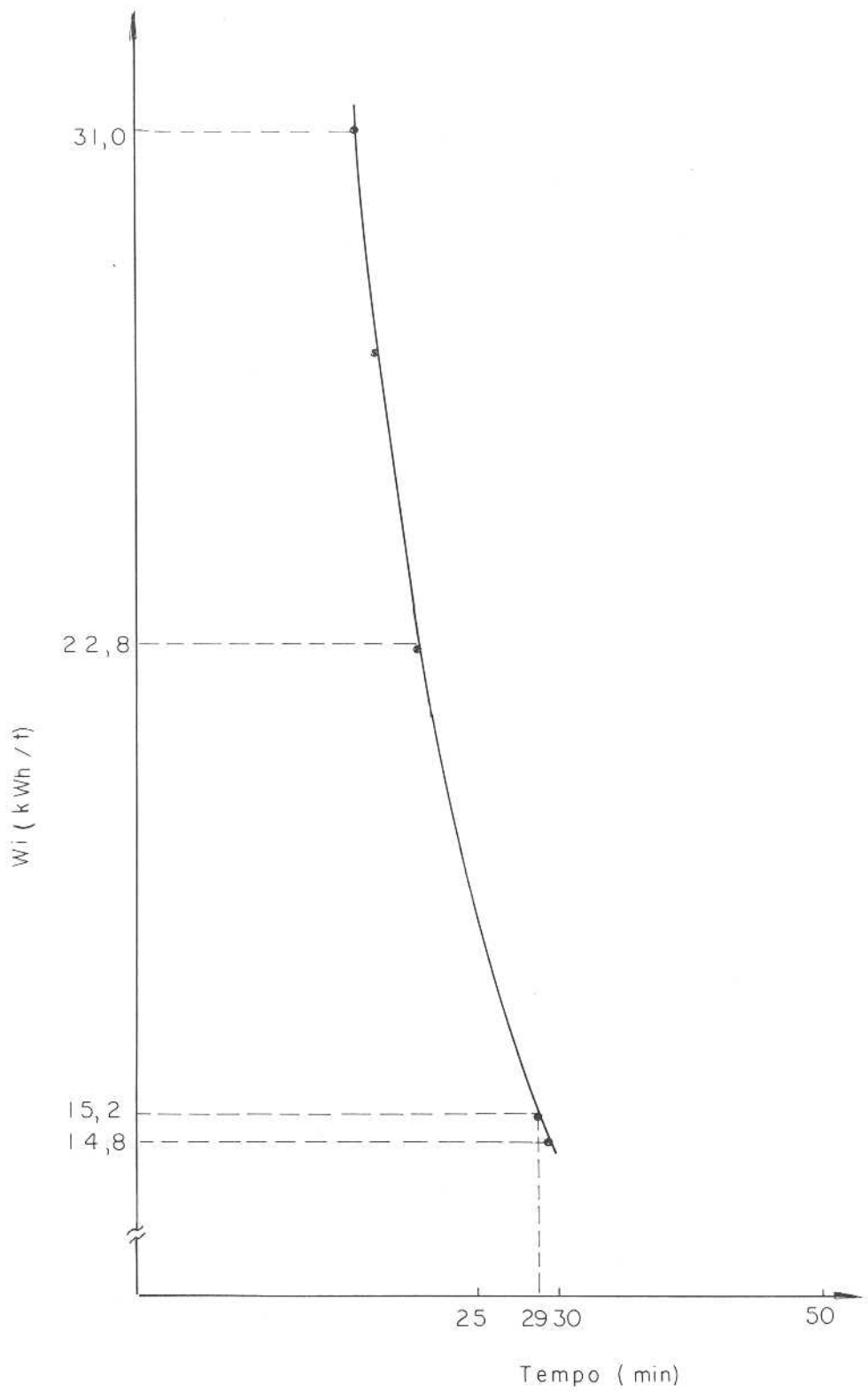


Gráfico 4 - ITAPETIM Wi x tempo

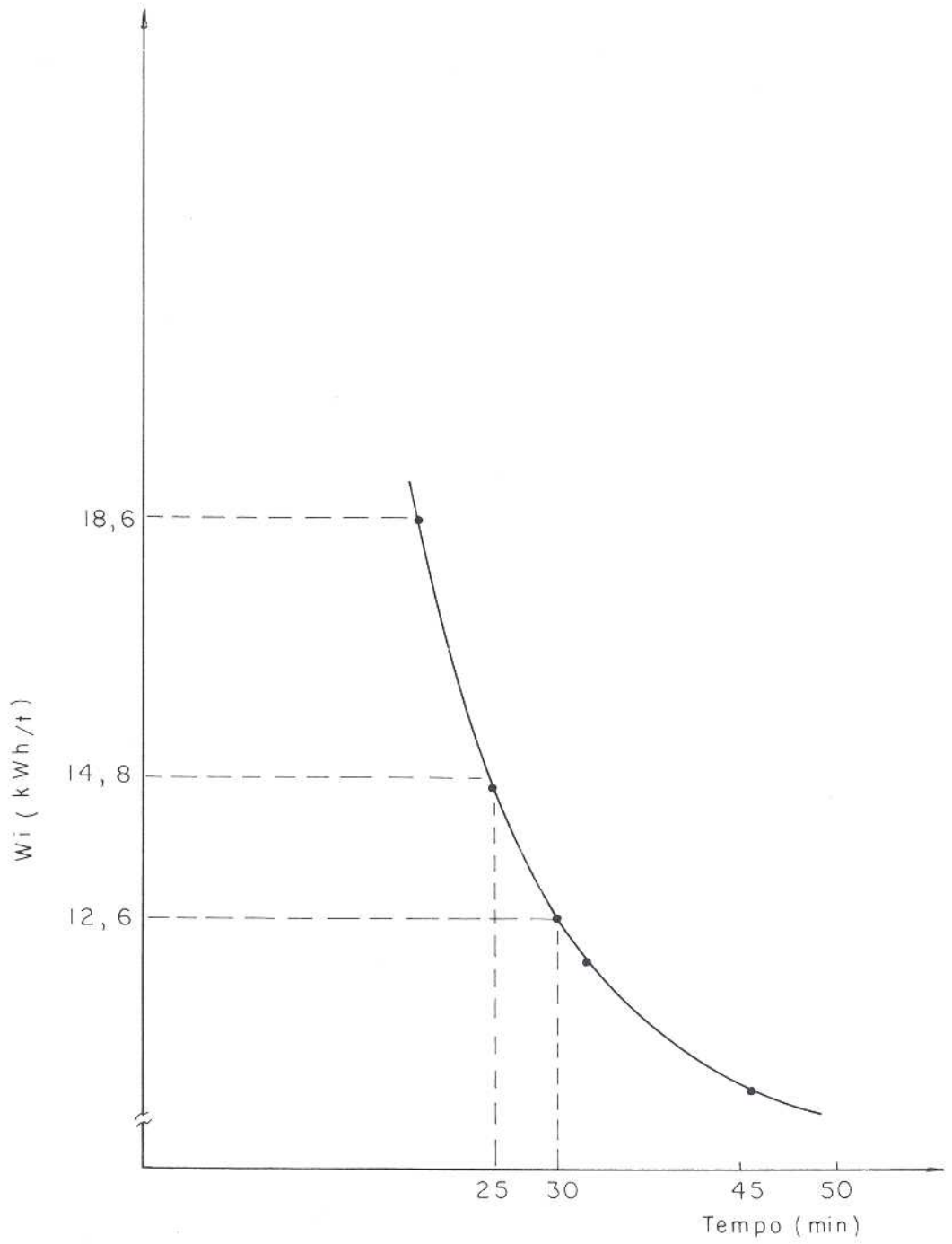


Gráfico 5 - Calcário W_i x tempo

8.2. Resultados Obtidos

Os dados obtidos para o W_i de remoagem, pelo método comparativo e pelo método simplificado desenvolvido neste trabalho, encontram-se na Tabela 9.

MINÉRIO	W_i COMPARATIVO	W_i SIMPLIFICADO
Itapetim	15,2	14,8
MIBASA	19,2	17,3
Calcário	12,7	12,6

Tabela 9. - Resultados de W_i obtidos no método comparativo e no simplificado.

Os dados da Tabela 9 mostram que o método simplificado, realizado no moinho calibrado, fornece resultados do W_i de remoagem bastante semelhantes aos obtidos pelo método comparativo, com a vantagem de ser um método mais rápido, desde que se possua um moinho calibrado.

9. CONCLUSÕES

O método simplificado provou ser muito útil, prático e flexível em diferentes aplicações, fornecendo um grau de precisão comparável aos melhores métodos.

As maiores vantagens deste método são:

- um moinho cilíndrico de laboratório pode ser calibrado e depois usado para determinações do índice de trabalho;
- a determinação feita neste moinho calibrado é mais rápida do que a determinação pelo método de Bond;
- nesse método há necessidade de apenas dois quilogramas de amostra, permitindo o uso de testemunhos de sondagem para determinação do W_i .

O índice de trabalho para a remoagem pode ser determinado por esse método. Ensaio realizados mostraram que existe um tempo apropriado para o teste de remoagem, dependendo da granulometria desejada. A metodologia para remoagem a 200 malhas produziu bons resultados.

10. BIBLIOGRAFIA

01. GAUDIN, A.M. Principles of mineral dressing. TMM Edition, 1971.
02. BOND, C. The third theory of comminution. Mining Engineer ing, p. 484-494, May, 1952.
03. WALKER, D.R. & SHAW, M.C. A physical explanation of the empirical laws of comminution. AIME Trans., 199: 313-320, 1954.
04. BOND, FRED C. Crushing and grinding calculations. Allis Chalmers. Jan. 1961.
05. BERRY, T.F. & BRUCE, R.W. A simple method of determining the grindability of ores. Canadian Mining Journal, 87: 63-65, 1966.
06. JAUREGUI, R.). In: ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL SOBRE TECNOLOGIA MINERAL, I. Anais. v. 1, p. 358, 1982.
07. HORST, W.E. & BASSAREAR, J.H. Use of simplified ore grind ability technique to Evaluate Plant performance. Mining Engineering, p. 348-349, December, 1976.

A N E X O

MALHA	TAMANHO (mm)	PESO (g)	% PESO	% ACUM.	% ACUM. INV.
+14	1,180	141,6	12,9	12,9	87,1
14/20	0,841	209,0	19,0	31,9	68,1
20/28	0,595	190,8	17,3	49,2	50,8
28/35	0,420	202,3	18,4	67,6	32,4
35/48	0,297	122,6	11,1	78,7	21,3
48/65	0,210	133,8	12,2	90,9	9,1
65/100	0,149	100,3	9,1	100,0	0
-100	-	-	-	-	-
TOTAL	-	1.100,4	-	-	-

Tabela I. - Análise granulométrica da alimentação
Minério calamínico (Amostra 1).

MALHA	TAMANHO (mm)	PESO (g)	% PESO	% ACUM.	% ACUM. INV.
+65	0,210	179,3	18,4	18,4	81,6
65/100	0,149	222,0	22,8	41,2	58,8
100/150	0,105	145,8	15,0	56,2	43,8
150/200	0,074	107,2	11,0	67,2	32,8
200/270	0,052	56,6	5,8	73,0	27,0
270/325	0,044	33,0	3,4	76,4	23,6
325/400	0,037	35,2	3,6	80,0	20,0
-400	-	193,2	20,0	100,0	0
TOTAL	-	972,3	-	-	-

Tabela II. - Análise granulométrica do produto
Minério calamínico (Amostra 1).

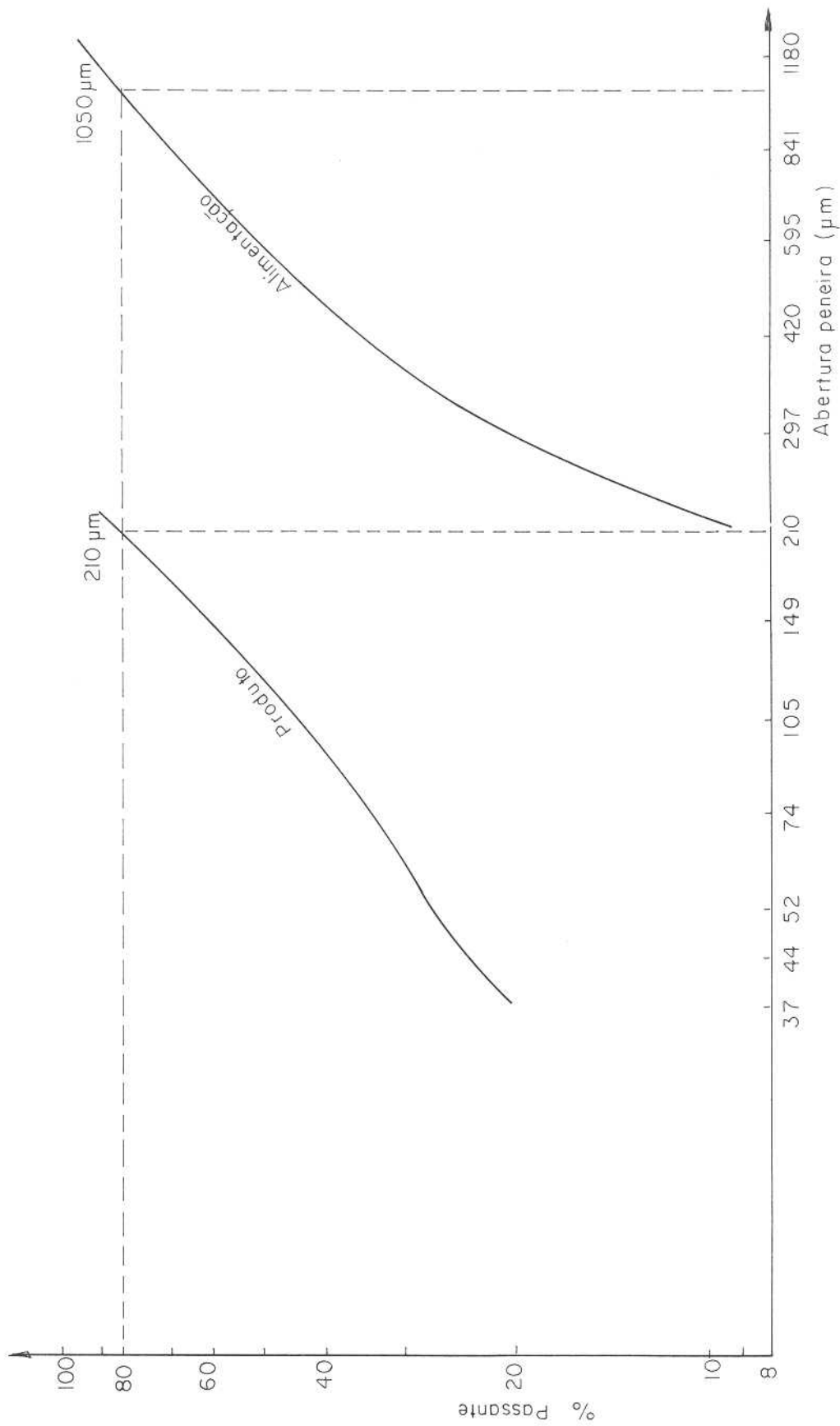


Gráfico I — Distribuição granulométrica da alimentação e do produto do minério calaminário

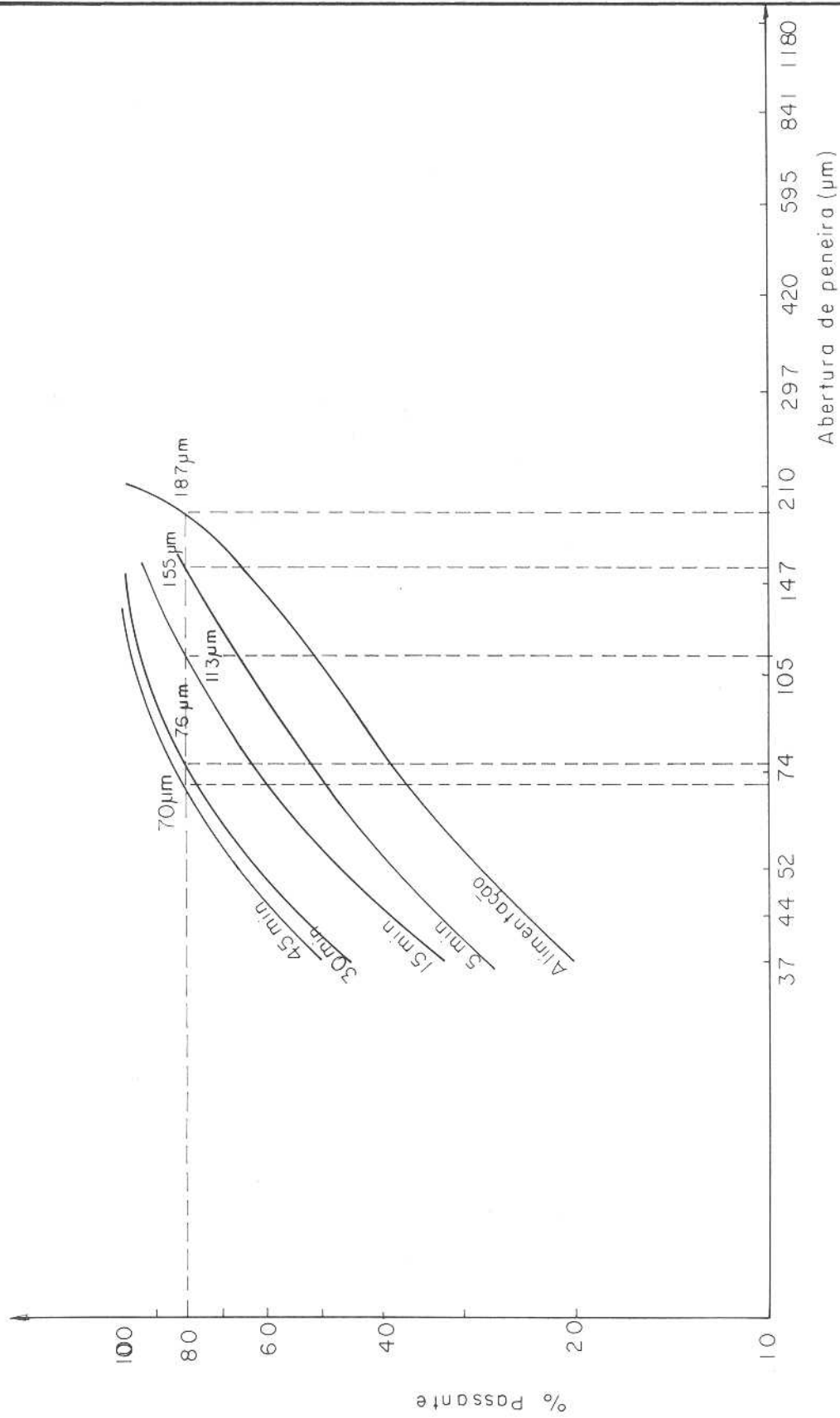


Gráfico II - Distribuição granulométrica do minério teste (MIBASA), em relação aos tempos de moagem, no teste comparativo

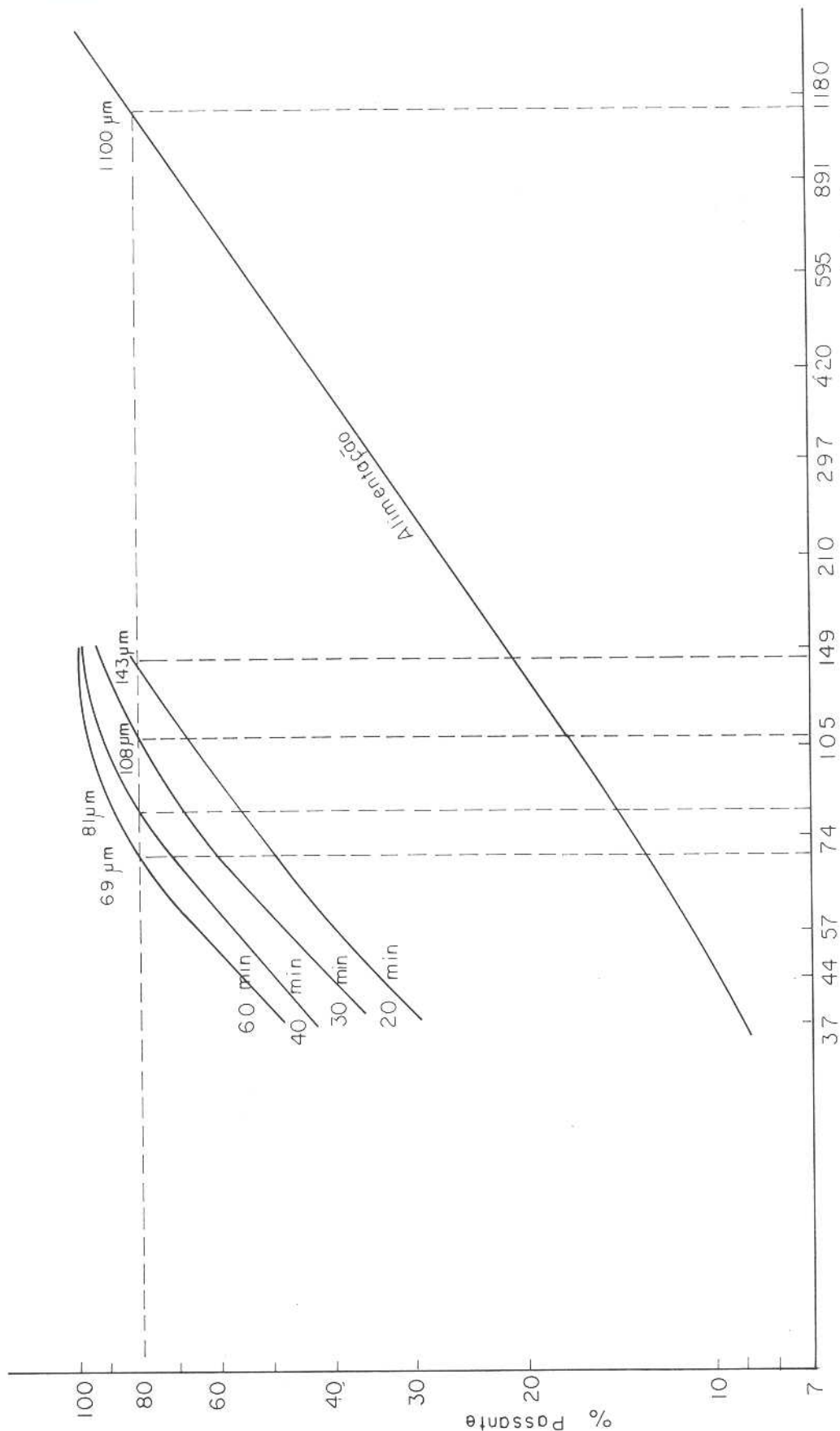


Gráfico III - Distribuição granulométrica do minério-teste referência (MIBASA), em relação aos tempos de moagem, no teste comparativo

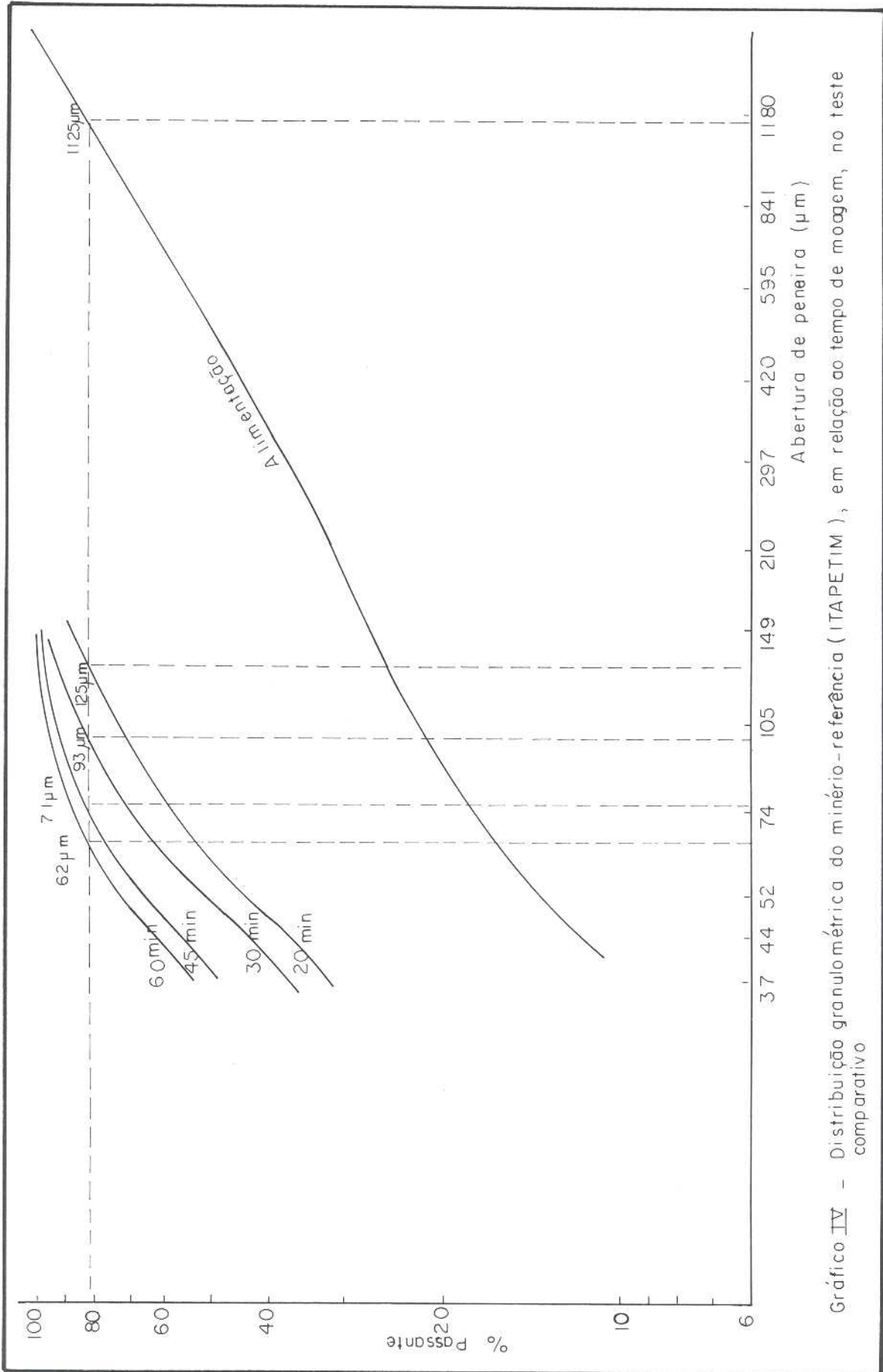


Gráfico IV - Distribuição granulométrica do minério-referência (ITAPETIM), em relação ao tempo de moagem, no teste comparativo

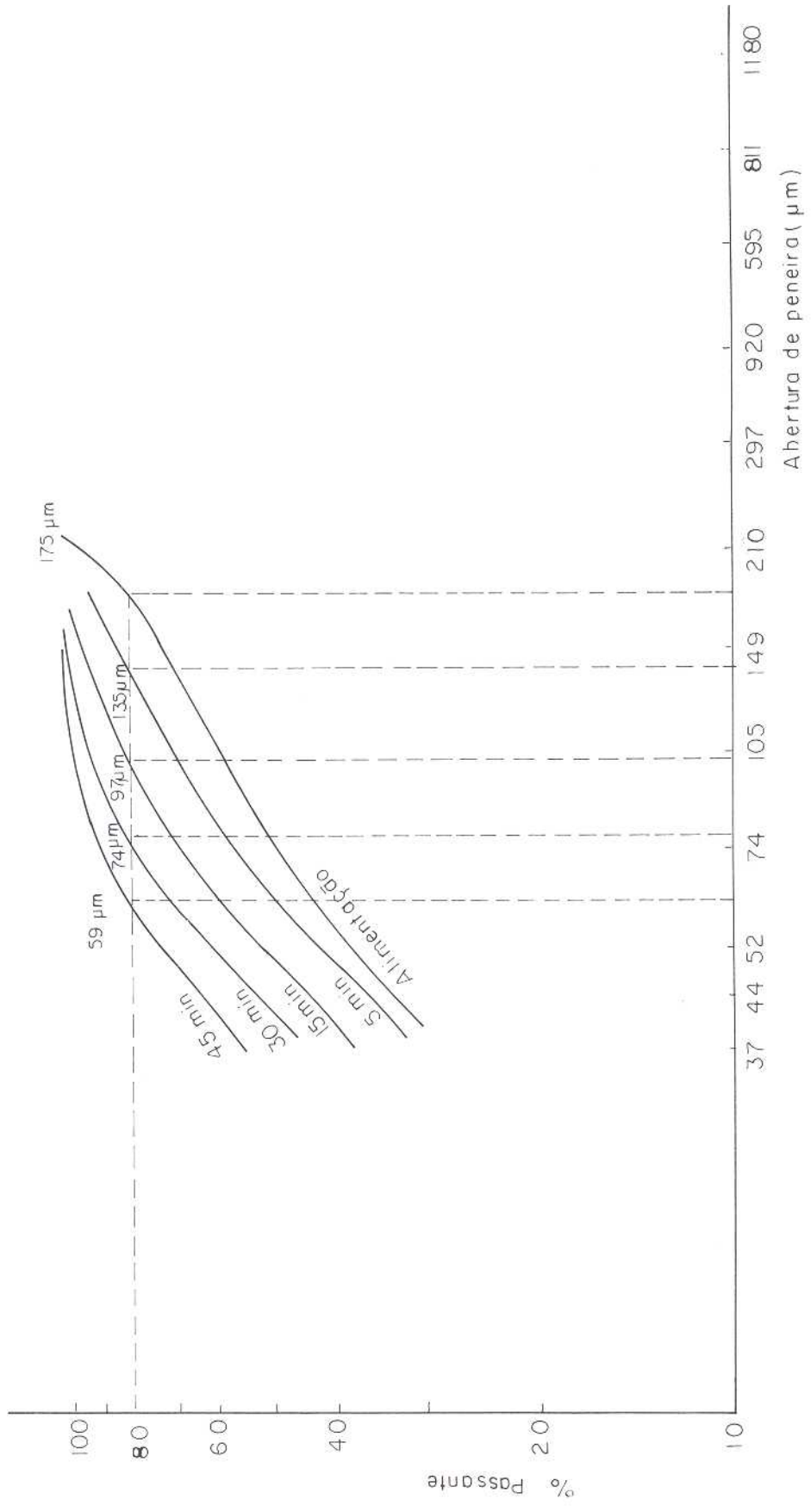


Gráfico V — Distribuição granulométrica do minério - teste (ITAPETIM), em relação aos tempos de moagem, no teste comparativo

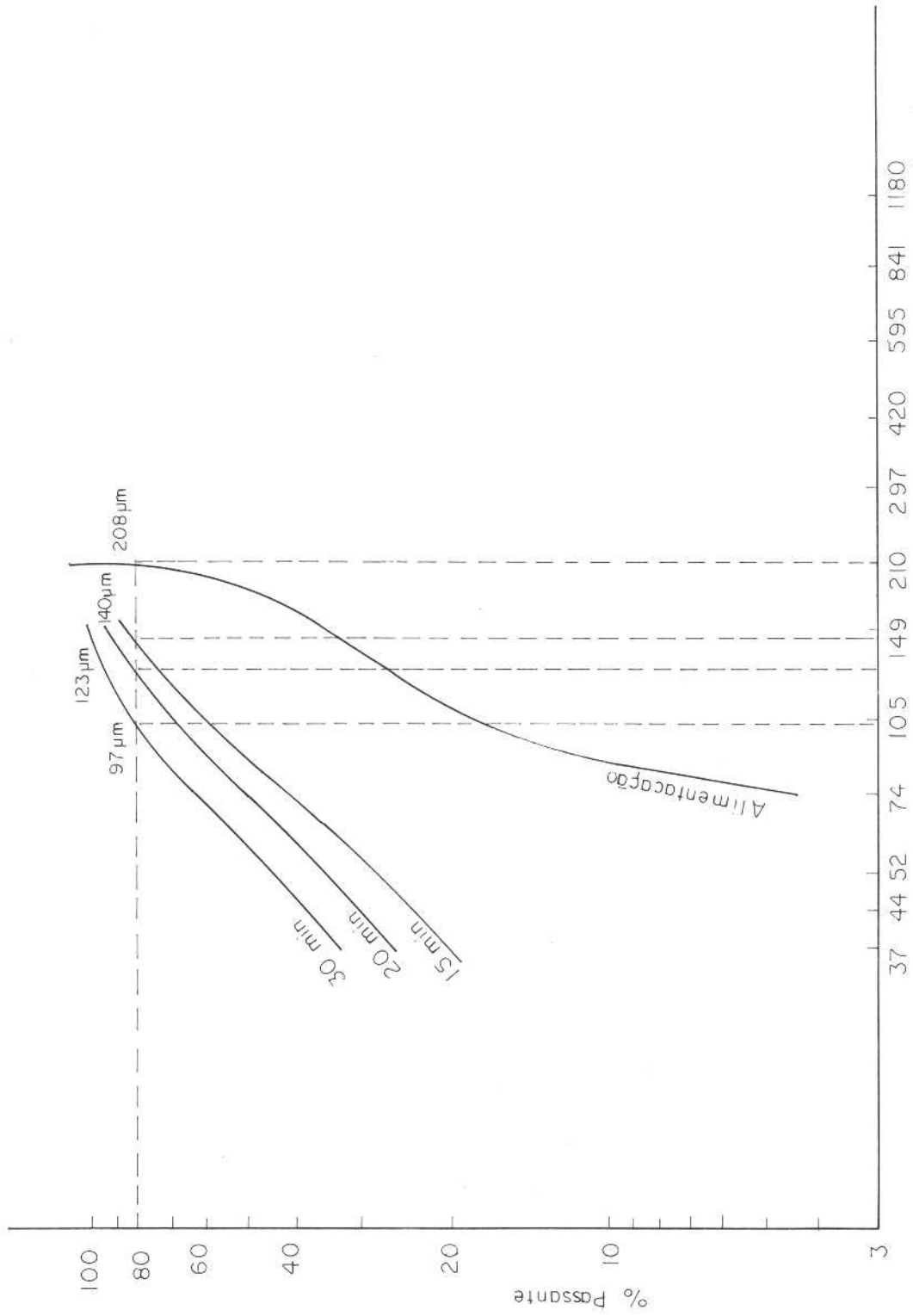
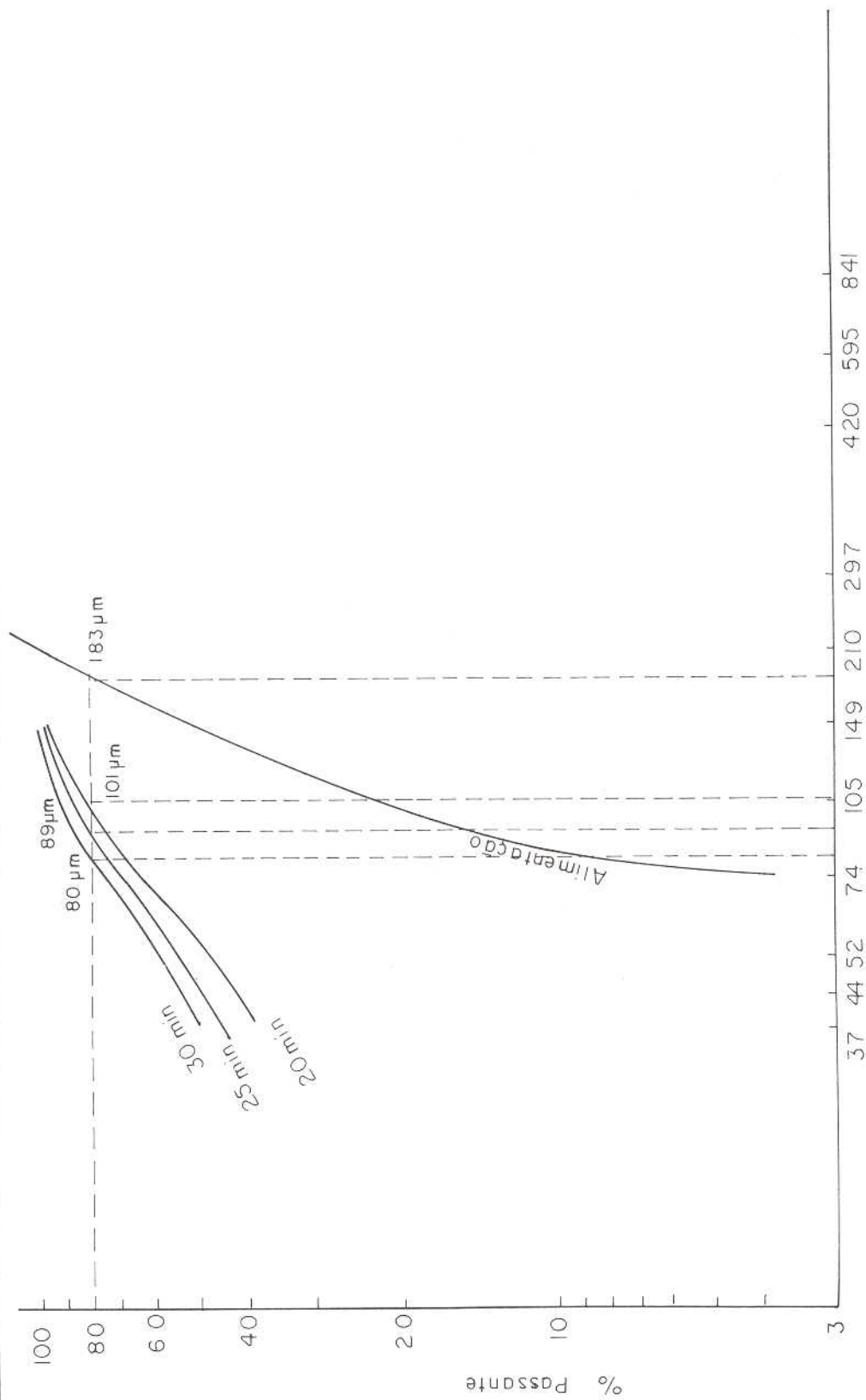


Gráfico VI - Distribuição granulométrica do minério ITAPETIM, em relação aos tempos de ramagem no teste simplificado.



Abertura de peneira (µm)

Gráfico VII - Distribuição granulométrica do minério CALCÁRIO, em relação aos tempos de remoagem no teste simplificado

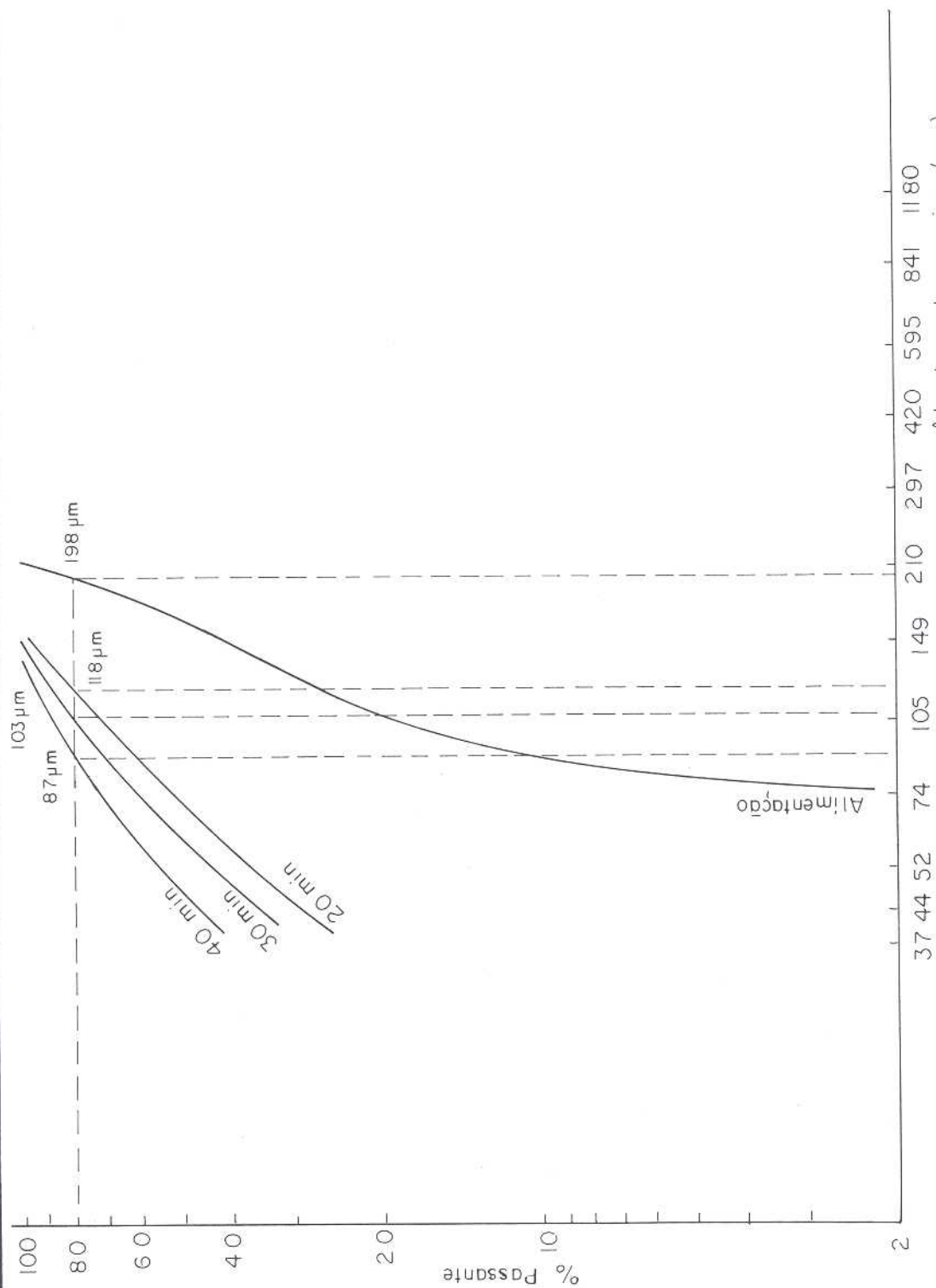


Gráfico VIII - Distribuição granulométrica do minério MIBASA, e em relação aos tempos de remoagem, no teste simplificado.