



**Escola Politécnica
da Universidade de
São Paulo**

**Departamento de
Engenharia de
Minas**

**Moagem Diferencial de Minerais Para a Indústria de
Cimento**

Igor Di Beo
Aluno

Prof. Dr. Homero Delboni Jr.
Orientador

1998

TF-1998

B45m

Sigro 1452911

M1998B

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700005458

Sumário Executivo

O trabalho apresenta uma discussão sobre a moagem diferencial de matérias primas para a fabricação de cimento. Os resultados foram obtidos tomando-se como base os materiais utilizados na moagem de cimento da Cia Cimento Tocantins.

Primeiramente, foram executados os testes para o cálculo dos WI's individuais para cada componente, e a partir destes resultados, foi calculado um WI para a mistura a partir da média ponderada dos WI's de cada componente.

Para efeito de comparação, foi realizado um ensaio para determinação do WI da mistura, moendo-se todos os componentes juntos.

O WI experimental da mistura, levando-se em conta um erro experimental típico, foi 27% maior que o valor da média ponderada dos WI's dos componentes obtidos individualmente.

Esse fato foi interpretado como função das distribuições granulométricas das argilas, que já encontram-se no moinho com uma granulometria abaixo da necessária. Nestas condições, consomem energia não resultando em fragmentações.

INTRODUÇÃO

Moagem

A teoria da cominuição esta geralmente vinculada com a relação entre a energia fornecida e o tamanho do produto obtido a partir de um tamanho inicial.

A teoria mais antiga data de 1867, e foi formulada por Rittinger. Segundo seus estudos, a área da nova superfície produzida por moagem ou britagem é diretamente proporcional ao trabalho fornecido. A área de uma superfície contendo uma tonelada de partículas de tamanho uniforme d e a energia necessária para produzi-la são proporcionais a $1/d$. Entretanto, esse valor é aproximadamente igual a 1/1000 da energia necessária atualmente para os processos comerciais de moagem.

A segunda teoria foi formulada por Kick, em 1885. Sua teoria diz que o trabalho necessário para a cominuição é proporcional a redução de volume das partículas. Sendo f o diâmetro das partículas na alimentação e p o diâmetro do produto, a relação de redução e dada por $R_r = f / p$. De acordo com Kick, a energia necessária na cominuição por tonelada de produto e proporcional ao $\log R_r / \log 2$.

Como nenhuma destas duas teorias estava de acordo com os resultados observados em plantas industriais, em 1951, Fred C. Bond, baseado em resultados de operações industriais, desenvolveu sua teoria. Para cálculos práticos, o trabalho é proporcional ao diâmetro que 80% da alimentação e passante, ao diâmetro onde 80% do produto é passante e ao Work Index do material. O Work Index é o parâmetro de cominuição que expressa a resistência do material ao trabalho de moagem, nas condições estabelecidas por Bond. Numericamente, o WI é a energia específica (Kwh por tonelada) necessário para reduzir o material, teoricamente de tamanho infinito, para 80% passante em 100 micrômetros, equivalente a 67% passante em 200# Tyler. Portanto, a energia W requerida para moer um determinado material é:

$$W = 10 \cdot WI \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

onde: P é a malha na qual 80% do produto é passante

F é a malha na qual 80 % da alimentação é passante

Caso o material seja homogêneo para a redução de tamanho, o WI será constante durante todo o processo de cominuição. Entretanto, estruturas heterogêneas em rochas são muito comuns. Como exemplo, certos materiais possuem um tamanho natural dos grãos, e o seus valores de WI serão muito menores de que de grãos de tamanho maior deste material.

Outro fator que influencia no valor do WI e a eficiência o equipamento. Um minério com tamanho 80% passante em 100 # esta sendo moído em um moinho com bolas de 1,5". O WI operacional deste minério será menor do que se ele estivesse sendo moído em um moinho com bolas de 3".

O ensaio de Bond é uma moagem descontinuada, onde são padronizados o moinho, o número de rotações e os corpos moedores. O material é 100% passante em 6# Tyler e o ensaio é realizado até a carga circulante estabilizar-se em 250% da nova alimentação.

Cimento

O cimento Portland é definido como sendo o aglomerante obtido pela pulverização do clínquer resultante da calcinação até fusão incipiente de uma mistura íntima e convenientemente proporcionada de materiais calcários e argilosos, sem adições após a calcinação de outras substâncias, a não ser água e gesso.

Estudos realizados, revelaram que o cimento Portland encerra quatro componentes principais: o silicato tricálcico, o silicato bicálcico, o aluminato

tricálcico e o ferro-aluminato-tetracálcico, além de pequenas quantidades de cal livre e de magnésia.

O calcário fornece o óxido de cálcio, a argila fornece a sílica, o óxido de alumínio e o óxido de ferro. O gipso é um ingrediente adicionado ao clínquer e moído conjuntamente com o mesmo, tendo por finalidade retardar o tempo de pega do mesmo.

O calcário é a matéria prima mais difícil de se encontrar, nas condições exigidas para a fabricação do cimento. O calcário deve possuir teor elevado de carbonato de cálcio, convém ter pequena proporção de sílica, de óxidos de ferro e alumínio, sobretudo, baixo teor de carbonato de magnésio, que é um constituinte habitual do calcário.

As argilas adequadas ao processo de fabricação do cimento Portland, são facilmente encontráveis em vales de rios, planícies e encostas de morros, e quando necessitadas de correções, o problema em geral é solucionado. Procura-se na argila destinada à fabricação de cimento Portland, sílica para a formação do Silicato Tricálcico e do Silicato Bicálcico com o cálcio da calcário; a alumina para a formação do aluminato tricálcico, com óxido de cálcio do calcário, formarem o ferro-aluminato tetra-cálcico. Areia em grande proporção, compostos de cálcio, magnésio, manganês e titânio são impurezas indesejáveis.

Resultados

Os resultados encontram-se nas tabelas anexas

Composição do Material		
Componente	Massa (g)	%
Calcário Calcítico	5.301	53,00%
Matamarga C.A.C.E.	4.000	39,99%
Argila Fábrica	101	1,00%
Argila Canga	200	2,00%
Argila R. do Mato	201	2,01%
Solo Argiloso	200	2,00%
Total	10.003	100,00%

Distribuição Granulométrica Alimentação			
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante
8	173,0	21,66%	78,34%
10	402,3	50,37%	49,63%
14	516,8	64,71%	35,29%
20	583,4	73,04%	26,96%
28	627,7	78,59%	21,41%
35	663,7	83,10%	16,90%
48	685,5	85,83%	14,17%
65	699,5	87,58%	12,42%
100	728,1	91,16%	8,84%
150	739,0	92,53%	7,47%
200	761,2	95,30%	4,70%
270	790,1	98,92%	1,08%
325	797,8	99,89%	0,11%
-325	798,7	100,00%	-

Distribuição Granulométrica Produto				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
200	144,7	43,94%	56,06%	
270	220,2	66,87%	33,13%	
325	304,1	92,35%	7,65%	
-325	329,3	100,00%	-	

Período	Número de Rotações	Complemento da Carga	-M na Carga	Peso Retido Na Malha do Teste	Produto	Prod. Líquido	Prod. Líquido por Rotação	Média dos 3 Últimos Períodos	Carga Circulante
1	100	1.208,0	89,8	973,7	234,3	144,5	1,445		
2	226	234,3	17,4	919,0	289,0	271,6	1,202		
3	268	289,0	21,5	850,8	357,2	335,7	1,251		
4	254	357,2	26,5	860,7	347,3	320,8	1,264	331,17	264,77
5	252	347,3	25,8	873,1	334,9	309,1	1,228	346,47	248,66

P80 da Alimentação (μm)	2,403
P80 do Produto (μm)	0,090
Média dos 2 últimos Prod. Líq. por Rotação	1,246
Malha do Teste (μm)	0,105
WI (Kwh/t)	16,70 $\pm$ 0,85

Malha do Teste (µm)	0,105
Densidade do Material (lb/ft^3)	107,68
Fração Passante da Alimentação na Malha do Teste	7,47%
Carga do Moinho (g)	1208
IPP (g)	344

Distribuição Granulométrica Alimentação - R. do Mato				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
8	101,6	8,38%	91,62%	
10	250,0	20,61%	79,39%	
14	355,6	29,32%	70,68%	
20	455,2	37,54%	62,46%	
28	508,0	41,89%	58,11%	
35	569,5	46,97%	53,03%	
48	574,4	47,37%	52,63%	
65	584,7	48,22%	51,78%	
100	612,6	50,52%	49,48%	
150	624,1	51,47%	48,53%	
200	637,1	52,54%	47,46%	
270	655,0	54,02%	45,98%	
-270	1212,6	100,00%	0,00%	

Distribuição Granulométrica Produto - R. do Mato				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
200	7,5	3,18%	96,82%	
270	15,0	6,38%	93,62%	
325	20,0	8,48%	91,52%	
400	25,6	10,88%	89,12%	
-400	235,7	100,00%	-	

Argila R. do Mato

Malha do Teste (µm)	0,105
Densidade do Material	1,23
Fração Passante da Alimentação na Malha do Teste	48,53%
Carga do Moinho (g)	858,2
IPP (g)	245,2

WI (Kwh/t)	1,10 ± 0,05
------------	-------------

Distribuição Granulométrica Alimentação Metamarga				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
8	333,1	27,47%	72,53%	
10	649,3	53,55%	46,45%	
14	806,1	66,48%	33,52%	
20	927,6	76,50%	23,50%	
28	1000,2	82,49%	17,51%	
35	1049,5	86,55%	13,45%	
48	1086,8	89,63%	10,37%	
65	1114,5	91,92%	8,08%	
100	1139,4	93,97%	6,03%	
150	1144,0	94,35%	5,65%	
200	1150,1	94,85%	5,15%	
270	1154,9	95,25%	4,75%	
-270	1212,6	100,00%	0,00%	

Distribuição Granulométrica Produto - Metamarga				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
200	46,4	13,73%	86,27%	
270	94,7	28,01%	71,99%	
325	110,7	32,76%	67,24%	
400	129,1	38,19%	61,81%	
-400	337,9	100,00%	-	

Metamarga

Malha do Teste (µm)	0,105
Densidade do Material	1,73
Fração Passante da Alimentação na Malha do Teste	5,57%
Carga do Moinho (g)	1208,9
IPP (g)	345,4

WI (Kwh/t)	14,10 ± 0,70
------------	--------------

Distribuição Granulométrica Alimentação - Canga				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
8	207,1	16,35%	83,65%	
10	410,9	32,44%	67,56%	
14	531,7	41,98%	58,02%	
20	628,4	49,62%	50,38%	
28	694,1	54,81%	45,19%	
35	756,0	59,69%	40,31%	
48	795,2	62,79%	37,21%	
65	830,1	65,54%	34,46%	
100	911,7	71,99%	28,01%	
150	964,7	76,17%	23,83%	
200	1019,5	80,50%	19,50%	
270	1116,6	88,16%	11,84%	
-270	1266,5	100,00%	0,00%	

Distribuição Granulométrica Produto - Canga				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
200	60,2	19,56%	80,44%	
270	116,5	37,88%	62,12%	
325	137,1	44,58%	55,42%	
400	152,6	49,64%	50,36%	
-400	307,5	100,00%	-	

Argila Canga

Malha do Teste (µm)	0,105
Densidade do Material	1,57
Fração Passante da Alimentação na Malha do Teste	23,82%
Carga do Moinho (g)	1100,4
IPP (g)	314,4

WI (Kwh/t)	9,70 ± 0,49
------------	-------------

Distribuição Granulométrica Alimentação - Calcário				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
8	338,0	27,16%	72,84%	
10	649,7	52,21%	47,79%	
14	821,8	66,04%	33,96%	
20	942,1	75,70%	24,30%	
28	1011,2	81,26%	18,74%	
35	1057,9	85,01%	14,99%	
48	1097,5	88,20%	11,80%	
65	1120,0	90,00%	10,00%	
100	1134,9	91,20%	8,80%	
150	1144,6	91,98%	8,02%	
200	1151,0	92,50%	7,50%	
270	1161,1	93,31%	6,69%	
-270	1244,4	100,00%	0,00%	

Distribuição Granulométrica Produto - Calcário				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
200	51,6	14,43%	85,57%	
270	104,6	29,25%	70,75%	
325	129,2	36,13%	63,87%	
400	148,7	41,59%	58,41%	
-400	357,6	100,00%	-	

Calcário Calcítico	
--------------------	--

Malha do Teste (µm)	0,105
Densidade do Material	1,82
Fração Passante da Alimentação na Malha do Teste	8,02%
Carga do Moínho (g)	1276,8
IPP (g)	364,8

WI (Kwh/t)	11,20 ± 0,56
------------	--------------

Distribuição Granulométrica Alimentação - Fábrica			
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante
8	152,1	10,84%	89,16%
10	316,3	22,54%	77,46%
14	434,2	30,95%	69,05%
20	543,6	38,75%	61,25%
28	631,8	45,03%	54,97%
35	738,5	52,64%	47,36%
48	823,2	58,68%	41,32%
65	970,4	69,17%	30,83%
100	1134,6	80,88%	19,12%
150	1173,3	83,63%	16,37%
200	1238,6	88,29%	11,71%
270	1313,4	93,62%	6,38%
-270	1402,9	100,00%	0,00%

Distribuição Granulométrica Produto - Fábrica			
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante
200	15,2	6,48%	93,52%
270	46,6	19,89%	80,11%
325	58,9	25,17%	74,83%
400	68,8	29,41%	70,59%
-400	234,1	100,00%	-

Argila Fábrica

Malha do Teste (µm)	0,105
Densidade do Material	1,21
Fração Passante da Alimentação na Malha do Teste	16,37%
Carga do Moinho (g)	848,4
IPP (g)	242,4

WI (Kwh/t)	2,80 ± 0,14
------------	-------------

Distribuição Granulométrica Alimentação - Solo				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
8	179,5	13,44%	86,56%	
10	386,2	28,91%	71,09%	
14	534,0	39,97%	60,03%	
20	671,6	50,28%	49,72%	
28	764,5	57,24%	42,76%	
35	861,8	64,52%	35,48%	
48	947,8	70,96%	29,04%	
65	971,8	72,75%	27,25%	
100	1043,1	78,09%	21,91%	
150	1083,0	81,07%	18,93%	
200	1111,7	83,22%	16,78%	
270	1144,3	85,67%	14,33%	
-270	1335,8	100,00%	0,00%	

Distribuição Granulométrica Produto - Solo				
Malha #	Peso Retido Acumulado (g)	% Retida Acumulada	% Passante	
200	15,3	5,06%	94,94%	
270	37,4	12,33%	87,67%	
325	47,1	15,54%	84,46%	
400	55,2	18,21%	81,79%	
-400	303,1	100,00%	-	

Solo Argiloso

Malha do Teste (µm)	0,105
Densidade do Material	1,54
Fração Passante da Alimentação na Malha do Teste	18,92%
Carga do Moinho (g)	1075,2
IPP (g)	307,2

WI (Kwh/t)	1,80 ± 0,09
------------	-------------

Composição do Material			
Componente	Massa (g)	%	WI
Calcário Calcítico	5.301	53,00%	11,20
Matamarga C.A.C.E.	4.000	39,99%	14,10
Argila Fábrica	101	1,00%	2,80
Argila Canga	200	2,00%	9,70
Argila R. do Mato	201	2,01%	1,10
Solo Argiloso	200	2,00%	1,80
Total	10.003	100,00%	11,85

Análise de Dados

A média ponderada dos WI's dos componentes individuais foi calculada em $11,85 \pm 0,60$. O WI obtido para a mistura dos componentes foi $16,70 \pm 0,85$. Sobrepondo-se as faixas de erro, podemos concluir que WI da mistura calculado através da média ponderada dos WI's dos componentes é diferente do WI obtido pela moagem de todos os componentes juntos.

Esse resultado nos mostra que a energia utilizada para a moagem da mistura é 27,30% superior à energia utilizada para a moagem dos componentes separadamente. Com o custo estimado do MWh em US\$ 40, o custo para a moagem de 1 milhão de toneladas de cimento é de US\$ 474.000, se calculado através da média ponderada dos WI's individuais, e US\$ 668.000 se calculado através do WI da mistura. Portanto, uma diferença de US\$ 194.000 por 1 milhão de toneladas moídas.

O custo de extração do calcário é da ordem de US\$ 9 / t. Com uma produção de 1 milhão de toneladas, o custo é de US\$ 9 milhões. A diferença de consumo na energia, US\$ 194.000, representa 2,15% do custo total de extração do calcário.

Durante o ensaio do WI da mistura, foi observado que havia uma diferença de coloração nos produtos passantes na malha do teste. Após o primeiro ciclo de moagem, o material passante apresentava uma coloração avermelhada. Quanto mais avançados eram os ciclos, o material apresentava uma coloração mais acinzentada, provavelmente pela moagem da Metamarga e do Calcário.

A diferença nos resultados dos WI's, pode ser atribuída à granulometria da argila, que entra no moinho com uma grande quantidade passante na malha do teste (150 #). Portanto, quando presente na mistura, acaba consumindo energia para ser moída. Isso significa que a energia que poderia ser utilizada para cominuição do material que está acima de 150#, é gasta com uma material que não é necessário ser moído, aumentando portanto o consumo de energia.

Conclusão e Recomendações

Os resultados obtidos foram surpreendentes, pois esperava-se encontrar um WI inferior à 14,10, que é o Work Index referente à Metamarga C.A.C.E., o material mais resistente.

Do ponto de vista prático, o resultado é importante para uma estimativa do consumo de energia durante o processo de moagem. De acordo com o modo de estimar o WI da mistura, encontraremos um consumo de energia por tonelada de material diferente. Esse consumo pode representar um aumento significativo no custo de fabricação do cimento.

Como os resultados foram obtidos apenas pela realização de um ensaio, não foi possível obter uma estimativa de erro mais precisa, sendo recomendável a realização de novos ensaios.

Outra recomendação importante é em relação à diferença de coloração do material passante na malha do teste, sendo recomendável uma caracterização tecnológica para possíveis conclusões futuras.