



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND

3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO

São Paulo (SP), 8 a 12 de novembro de 1993

DMP

085 6433

3º CIMENTO PORTLAND ANAIS

VOLUME 1

CO-PATROCÍNIO:



COMPANHIA CIMENTO PORTLAND ITAÚ
CIMENTO PORTLAND MATO GROSSO S.A.
CIMENTO TOCANTINS S.A.
CIMENTO ARATU S.A.

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS MINERALÓGICOS NA MOABILIDADE E
DESENVOLVIMENTO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE
CLÍNQUERES PORTLAND BRASILEIROS**

**THE INFLUENCE OF MINERALOGICAL PARAMETERS IN PORTLAND
CLINKER GRINDABILITY AND STRENGTH DEVELOPMENT**

Yushiro Kihara^(), Sérgio Luiz Centurione e
Flávio A. da Cunha Munhoz*

*Associação Brasileira de Cimento Portland
Instituto de Geociências - USP^(*)*

RESUMO

A moabilidade do clínquer e o desenvolvimento de resistências mecânicas do cimento são fatores influenciados pelas características microestruturais e compostionais do clínquer portland.

A determinação das características texturais e mineralógicas do clínquer, complementada por um ensaio expedito de moabilidade, efetuada em moinho de disco, permitem uma avaliação da moabilidade do clínquer além da previsão da resistência mecânica do cimento aos 28 dias.

Estudos realizados em 43 amostras de clínqueres industriais e em 17 amostras de cimento experimentais mostraram que valores de "coeficiente mineralógico" ($KM = \frac{\%alita}{\%belita} \times 100 / \text{diâm. alita}$) superiores a 20 indicam clínqueres de fácil cominuição e com resistência mecânica à compressão, aos 28 dias, maiores ($>39 \text{ MPa}$), ao passo que aqueles com valores de KM inferiores a 10, são de difícil moagem e de resistências mecânicas mais baixas aos 28 dias ($<37 \text{ MPa}$).

ABSTRACT

Clinker grindability and cement strength development are influenced by clinker portland microstructure and compositions characteristics.

Mineralogical and textural characteristics obtained by microscopy, completed by expeditious test using laboratory disk mill make possible to estimate the potential clinker grindability and qualify the cement strength.

Results obtained in 43 industrial clinkers and 17 laboratory cements showed that alite and belite crystal size, distribution and content related through a mineralogical coefficient (KM) make possible to forecast the grindability and the potential development of clinker strength: clinkers with KM values higher than 20 are considered of good grindability ("soft clinker") with higher strength (39 MPa) and lower than 10 of difficult grindability ("hard clinker") with lower strength (37 MPa).

1. INTRODUÇÃO

A avaliação da moabilidade de um clínquer e a previsão de sua resistência mecânica aos 28 dias constituem temas de grande interesse tecnológico na indústria de cimento, pela sua importância prática e econômica. Importantes contribuições foram apresentadas por *SCHEUBEL & BALZER*¹, *ONO*², *KNÖFEL*³, *HARGAVE et al.*⁴, *BRUGGEMAN & BRENTROP*⁵, *SINHA et al.*⁶, *VENKATESWARAN & GORE*⁷, entre outros, que demonstraram que, além dos fatores compositionais do clínquer, as características texturais e a presença de elementos menores têm efeito significativo no processo de cominuição do clínquer e no desenvolvimento da resistência mecânica do cimento.

Estima-se que 1% da energia elétrica mundial é consumida pela indústria cimenteira. Esse consumo representa aproximadamente 12% da energia total requerida por essa indústria, sendo o restante suprido pela energia térmica⁸. Nesse contexto, o processo de moagem do clínquer consome a terça parte (próximo a 45kWh/t) da energia elétrica necessária à fabricação de uma tonelada de cimento portland comum⁹. Nos cimentos com adição, o consumo de energia tende a aumentar com o teor de escória (até 80kWh/t) e diminuir nos cimentos com pozolanas de cinzas volantes.

A baixa eficiência dos moinhos (10% em relação à energia de fissuração) e o custo crescente da energia elétrica têm suscitado um grande interesse no desenvolvimento e aperfeiçoamento dos sistemas de moagem e na otimização da moabilidade do clínquer portland, pela investigação dos fatores inerentes à mineralogia do clínquer que influem na cominuição¹⁰.

A resistência mecânica final do cimento portland depende de sua capacidade como ligante (qualidade do cimento), da porosidade e do sistema de poros da pasta¹¹. A possibilidade de expressar matematicamente a resistência mecânica do cimento está fundamentada nos parâmetros relacionados à qualidade, dentre os quais se destacam a proporção das fases mineralógicas, a composição química e a finura do cimento.

Nesse trabalho são apresentados e discutidos os resultados obtidos através de um método expedito de moabilidade do clínquer e também os valores do coeficiente mineralógico (KM) calculados com base em alguns parâmetros mineralógicos do clínquer, obtidos por microscopia óptica. Esses ensaios representam uma maneira rápida e simplificada de previsão do grau de moabilidade do clínquer portland e da resistência mecânica potencial do cimento após 28 dias de cura.

2. FATORES QUE ATUAM NA MOABILIDADE E NO DESENVOLVIMENTO DAS RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

O comportamento de um clínquer à fragmentação é determinado pela energia específica de ruptura, dimensão das microfissuras existentes e características das fases mineralógicas constituintes (*REGOURD & HORNAIN, 1980*)¹². A porosidade, a granulometria e a textura do clínquer são também fatores que atuam na sua moabilidade.

Dentre os componentes mineralógicos do clínquer, a alita (C_3S) é a fase mais frágil, seguida de C_3A , C_4AF e belita (C_2S)¹². As zonas de C_2S constituem as feições mais difíceis de serem moidas no clínquer, representando um dos fatores mais significativos na comunicação¹³. *SCHEUBEL & BALZER (1983)*¹ verificaram que o conteúdo e a dimensão dos

cristais de alita e belita têm um papel importante na moabilidade.

A fase intersticial (C_3A e C_4AF), a cal livre e o periclásio atuam também na moabilidade do clínquer, mas de modo menos pronunciado que os silicatos (alita e belita), sendo possivelmente mascarados por outros parâmetros mais significativos.

Os clíqueres porosos, usualmente considerados como mais fáceis de serem cominuídos, têm a sua influência restrita à faixa de granulometria grosseira, até uma finura de 120 a 200 $\mu\text{m}^2/\text{kg}$ ^{14,15}. Por outro lado, a presença de *finos* do clínquer, decorrentes de problemas de nodulização ou de condições rápidas de resfriamento, dificultam a moabilidade, aumentando o consumo de energia¹⁵.

O desenvolvimento de resistências mecânicas do cimento depende fundamentalmente das características composticionais e mineralógicas do clínquer portland. Todas as fases apresentam contribuições para a evolução da resistência mecânica, mas a magnitude de seus efeitos variam no tempo e na intensidade entre essas fases. O efeito dos silicatos, mais particularmente do C_3S , se pronuncia em todas as idades^{in 11}.

KNÖFEL (1978)³ demonstrou que existe uma boa correlação estatística da resistência mecânica aos 28 dias com a composição mineralógica (*FATOR DE KNÖFEL*: $(3C_3S + 2C_2S + C_3A - C_4AF)$). Cristais de alita pequenos ($30 - 35\mu\text{m}$) e bem formados (idiomórficos) favorecem a moabilidade e o desenvolvimento de resistências mecânicas aos 28 dias^{in 11}.

A finura do cimento determina significativamente a cinética de reação e, consequentemente, o desenvolvimento das resistências mecânicas. O aumento da finura proporciona um aumento da superfície de reação determinando uma maior taxa

de hidratação. Em relação à distribuição granulométrica, verifica-se que quanto mais cerrada, isto é quanto mais próximos estiverem os extremos da distribuição, maior será a resistência mecânica.

Diferentes autores^{5,11} têm proposto métodos de previsão da resistência mecânica fundamentados na combinação de parâmetros químicos (composição de Bogue, álcalis solúveis, sulfatos, etc), mineralógicos (composição, dimensão das fases, birrefrigerância, etc) e físicos (finura, fator água/cimento, etc). Dada a complexidade das reações de hidratação e da interação de vários parâmetros que agem na reatividade dos componentes do cimento, não existe unanimidade quanto à seleção dos parâmetros mais adequados à previsão da resistência mecânica aos 28 dias. Grande parte dos métodos propostos têm pouca aplicação em caráter rotineiro, dada a diversidade e complexidade dos ensaios.

3. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA MOABILIDADE DE MATERIAIS

Por ser a moabilidade a finura gerada por unidade de energia gasta, qualquer procedimento experimental para a sua determinação consistirá, basicamente, na quantificação desses dois parâmetros. A finura produzida na moagem experimental é obtida pela diferença entre a medição da finura inicial e a resultante. Já a energia despendida normalmente é bem mais difícil de ser quantificada, sendo algumas vezes determinada indiretamente medindo-se a potência e o tempo durante o qual ela foi utilizada¹⁶.

Existem cerca de 15 métodos de laboratório para a medição da moabilidade do cimento sendo os mais utilizados os de *Bond* e *Zeisel*^{in 16}. O método de *Bond*, denominado índice de trabalho (*Work Index*) é o mais difundido, sendo obtido pelo consumo energético em kWh gasto para reduzir uma tonelada de material a um tamanho tal que 80% de sua

massa passe por uma peneira de malha quadrada com abertura de 100 μm . Por esse método são considerados "clíqueres moles" aqueles com índice de trabalho de 10 a 18kWh/t, "médios" de 18 a 21kWh/t e "duros" entre 21 e 24kWh/t. Já o método de *Zeisel* é uma variante do método de *Hardgrove* (utilizado para carvão e coque) que consiste na obtenção da moabilidade de um material utilizando-se valores do consumo energético, da massa do material ensaiado e da finura final obtida. Comparativamente ao índice de trabalho de *Bond*, o método de *Zeisel* é mais simples e abrangente, pois permite o trabalho com finuras variáveis e, consequentemente, possibilita uma melhor correlação do método de laboratório com o processo industrial.

4. ENSAIO EXPEDITO DE MOABILIDADE E COEFICIENTE MINERALÓGICO KM

Um ensaio expedito de moabilidade foi desenvolvido em laboratório para avaliar, de forma rápida e simplificada, o poder de cominuição de um clíquer, sendo esse procedimento complementado por estudos microscópicos das condições de fabricação do clíquer, com base no coeficiente mineralógico KM dado por:

$$KM = \frac{\% \text{ alita} \times 100}{\% \text{ belita} \times \text{alita} (\mu\text{m})}$$

O ensaio de moabilidade consiste da homogeneização de 2kg de clíquer, reduzindo essa quantidade para 0,5kg por quarteamento. Posteriormente processa-se uma pré-britagem do material de tal forma que a granulometria dos fragmentos seja inferior a 4,8 mm. Esse material é acondicionado em estufa para secagem a 100°C por 2 horas. Retira-se então 150g dessa amostra e efetua-se a cominuição da mesma durante 5 minutos em moinho de disco *HERZOG*, com capacidade

útil de 350cm³, sem o corpo moedor central. A finura de moagem da amostra é determinada através do resíduo de peneiramento (>37µm), obtido em peneirador ALPINE.

A determinação do coeficiente mineralógico (KM) é efetuada através do estudo microscópico de luz refletida de uma seção polida confeccionada com material pré-britado (fração entre 2,4 a 0,6mm). Os teores de alita (C₃S) e belita (C₂S) são determinados pela composição mineralógica dos clíqueres através da contagem de 3000 pontos ao microscópio, enquanto a dimensão média da alita (C₃S) é obtida pela média de, no mínimo, 20 cristais médios dessa fase mineralógica.

Um esquema simplificado¹⁷ do método expedito de moabilidade e dos procedimentos de determinação do coeficiente mineralógico KM é apresentado na *Figura 1*.

5. ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO

As amostras de cimentos experimentais com 4% de gesso foram preparadas a partir de 5kg de material, previamente britado (<0,2cm) e cominuído em moinho de bola, até a obtenção de uma finura Blaine previamente definida (364 ± 10m²/kg).

Corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro por 100mm de altura foram confeccionados, curados, e rompidos, segundo a norma NBR 7215/81, para a obtenção das resistências aos 3, 7 e 28 dias. O traço utilizado foi de 1:3 e o fator água/cimento de 0,48.

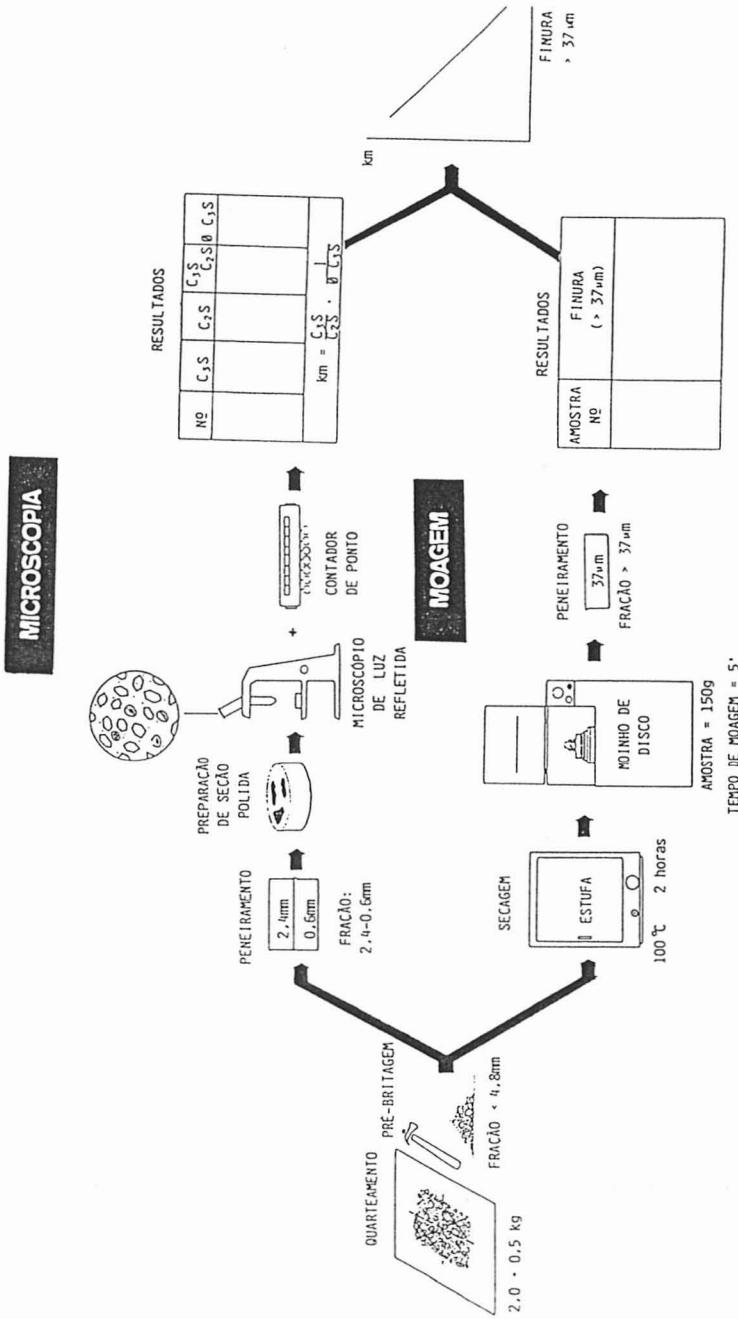


FIGURA 1 - Esquema simplificado dos procedimentos de determinação do KM e do método expedito de moabilidade.

6. PARTE EXPERIMENTAL

Foram selecionadas e estudadas 43 amostras de clínquer portland procedentes de 17 unidades de fábricas, produzidas a partir de matérias-primas com diferentes características químicas e geológicas. As amostras foram coletadas na saída dos resfriadores, em quantidades próximas a 20 kg.

A microscopia óptica de luz refletida foi utilizada para o estudo da microestrutura e determinação da composição quantitativa das fases mineralógicas, observadas em seções polidas de grãos de clínquer portland. Os resultados dos estudos de microestrutura de clínquer, referentes às condições de moagem da sílica da matéria-prima e à dimensão dos cristais de alita (C_3S), juntamente com a composição mineralógica determinada pelo método de contagem de pontos, são apresentados na *Tabela 1*. Nessa tabela são ainda apresentados os resultados de finura de moagem (resíduo na peneira $>37\mu m$) juntamente com os valores do coeficiente mineralógico (KM) e com os resultados de *finos* do clínquer (fração $<4,8mm$).

Os estudos de correlação estatística (*Tabela 2* e *Figura 2*) entre a finura de moagem e os parâmetros mineralógicos e granulométricos (*finos*), permitiram constatar que os parâmetros de maior influência são a dimensão da alita, a relação alita/belita e a freqüência de *finos*. Nos estudos de correlação estatística, três amostras não foram consideradas por estarem muito afastadas da média e apresentarem características mineralógicas muito diferenciadas: alto KM (A5 e E23) e baixo conteúdo de C_3A e C_4AF (M38).

TABELA 1 - Análise Microscópica, Coeficiente Mineralógico,
Fração Fina e Finura das Amostras Estudadas

Amostra nº	Condições de moagem da sílica	ϕ da alita (μm)	Composição mineralógica						Coeficiente mineralógico (KM)	Fração fina ($<4,8 \mu\text{m}$)	Finura de moagem (fração $>37\mu\text{m}$)
			Alita	Belita	C ₃ A	C ₄ AF	Cal livre	Periclásio			
A-1	I	30	68,2	9,3	3,8	12,1	1,8	4,8	24,4	33	28,7
A-2	N	35-40	69,8	6,3	4,2	14,2	0,3	5,2	29,5	4	23,5
A-3	I	30	67,5	11,3	3,6	12,1	1,3	4,2	19,9	32	27,7
A-4	N	30-35	72,9	6,1	2,8	14,1	0,1	4,0	36,8	21	21,7
A-5	N	35	74,3	3,7	3,3	12,8	0,9	5,0	57,4	18	23,7
A-6	I	30-35	72,2	7,8	3,5	12,3	0,2	4,0	28,5	14	26,3
B-7	I	40-45	67,0	11,0	4,3	13,1	1,1	3,5	14,3	31	30,2
B-8	I	50	64,6	10,4	5,3	15,4	1,3	3,0	12,4	45	32,8
B-9	D	50	59,8	16,7	6,9	12,2	1,1	3,3	7,2	53	33,7
B-10	D	55-60	64,1	13,0	5,0	14,4	0,8	2,7	8,6	36	31,2
B-11	D	45-50	54,2	22,2	3,0	14,2	3,0	3,4	5,1	47	32,0
B-12	I	50	70,3	7,4	4,6	13,6	1,0	3,1	19,0	36	27,8
B-13	D	55	60,6	17,1	16,6	-	1,7	4,0	6,4	76	35,1
B-14	D	40-45	57,9	20,1	15,9	-	1,8	4,3	6,8	76	34,6
C-15	I	30	67,8	9,8	6,6	11,3	3,3	1,2	23,1	21	26,7
C-16	I	35-40	70,2	7,3	5,1	14,9	1,6	0,9	25,7	40	26,3
C-17	I	35-40	70,8	7,9	4,6	14,0	2,1	0,6	23,9	53	27,1
C-18	I	35	62,3	15,0	8,6	12,4	0,1	1,6	11,9	37	29,2
D-19	I	50-55	63,7	17,6	2,7	14,6	0,4	1,0	6,9	62	32,8
D-20	D	40-45	37,9	43,5	16,1	-	1,0	1,5	2,0	75	36,5
D-21	I	45	65,1	12,3	19,0	-	2,8	0,8	11,8	70	30,7
D-22	D	40	55,5	22,6	17,3	-	2,9	1,7	6,2	57	32,2
E-23	N	40-45	76,5	3,6	17,6	-	0,5	1,8	50,0	25	21,5
E-24	N	30	72,6	8,6	8,5	7,0	0,7	2,6	28,0	5	23,6
F-25	I	25-30	65,0	21,6	5,8	6,3	1,3	-	10,9	62	28,5
F-26	N	25	76,7	9,4	5,5	7,1	1,3	-	32,6	56	21,8
G-27	N	70-80	57,8	21,5	3,3	15,8	0,4	1,2	3,6	41	35,8
H-28	I	25-30	67,1	12,2	4,7	8,7	2,1	5,2	20,0	15	28,7
H-29	I	35	63,0	16,6	2,8	11,8	0,9	5,5	10,8	12	30,0
H-30	I	25-30	67,2	10,2	1,3	12,4	1,8	7,1	24,0	19	24,7
H-31	I	27	66,5	13,0	4,7	10,8	1,1	3,9	18,8	15	26,6
H-32	I	29	70,7	8,8	7,7	12,3	0,5	-	27,7	0	22,2
H-33	N	28	71,4	8,8	3,9	10,1	0,8	5,0	28,9	22	22,2
I-34	N	50	74,7	6,7	15,8	-	0,9	1,9	22,3	12	30,3
J-35	I	35	72,1	8,6	4,9	9,0	2,1	3,2	23,9	17	24,7
K-36	I	30-35	56,8	23,7	10,4	6,7	1,0	1,4	7,4	80	29,2
L-37	I	40-45	59,3	17,8	8,7	11,2	0,2	2,8	7,8	23	31,3
M-38	D	34	61,4	28,4	8,6	1,3	0,3	-	6,4	13	23,1
M-39	D	55	45,9	30,7	5,7	13,6	3,9	0,2	2,7	57	35,4
N-40	I	65	63,1	14,7	6,7	15,2	0,6	-	6,7	20	29,3
O-41	N	70	70,4	8,3	3,0	16,6	0,3	1,4	12,1	6	28,5
P-42	N	35	17,9	61,0	7,6	11,0	0,1	2,4	0,8	5	36,8
Q-43	I	35	86,2	13,8	-	-	-	-	17,8	37	28,9

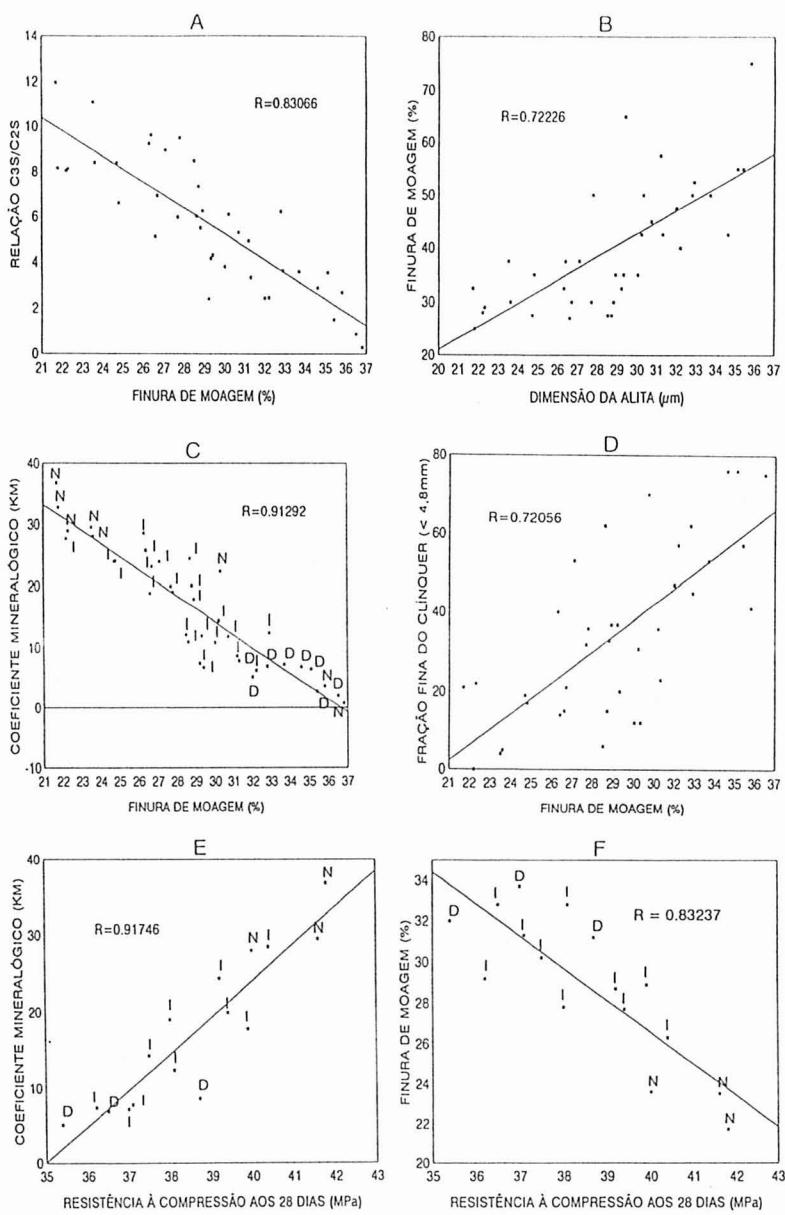


FIGURA 02 - Gráficos de análises de regressão linear correlacionando a finura de moagem e a resistência mecânica à compressão aos 28 dias com parâmetros mineralógicos e "finos" do clínquer.
Obs.: moagem da sílica: N = Normal; I = Insatisfatória; e D = deficiente

TABELA 2

Correlação estatística da finura de moagem (resíduo <37µm) com:	Nº de dados	Coeficiente de correlação linear (R)
Dimensão da alita	37	0,72226
alita/belita	39	0,83066
C ₃ A/C ₄ AF	33	0,07541
zonas de belita	15	0,67917
Finos do clínquer (fração <4,8mm)	37	0,72056
Coeficiente mineralógico KM	40	0,91292

Cálculos de correlação linear múltipla entre a finura de moagem do clínquer, obtida no ensaio expedito de moabilidade, o coeficiente mineralógico KM e a porcentagem de finos, em um universo de 37 amostras, compreendendo 14 unidades de fabricação, apresentaram um coeficiente de correlação R = 0,93 expresso na seguinte equação:

$$\text{Finura} = 32,8737 - 0,3252 \text{ KM} + 0,043 \text{ Finos}$$

Os coeficientes de regressão parciais padronizados são -0,758 e 0,236, respectivamente, para o coeficiente mineralógico KM e a porcentagem de finos, indicando a influência significativa do coeficiente mineralógico na moabilidade.

A correlação obtida em 7 amostras de clínquer entre o coeficiente mineralógico KM e o índice de trabalho (*Work Index*), determinado pelo método de *Bond* é apresentado na Figura 3. Verifica-se que, clíqueres com índice de trabalho entre 10 e 18kWh/t, considerados de fácil moagem, correspondem, pela correlação obtida, a clíqueres com KM superiores a 12, e clíqueres duros, que segundo *Bond* são aqueles com índice de trabalho entre 21 e 24kWh/t, correspondem a um valor de KM inferior a 6.

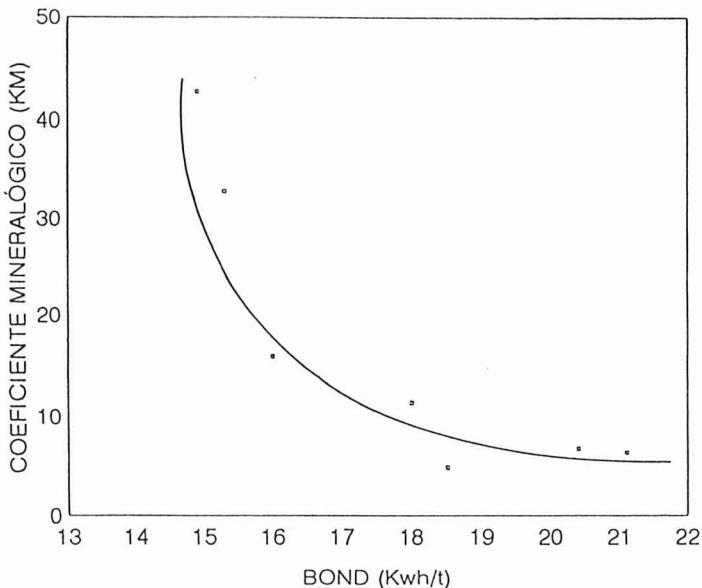


FIGURA 3: Gráfico de correlação entre o coeficiente mineralógico KM e o índice de trabalho (BOND)

A influência de alguns parâmetros mineralógicos e físicos no desenvolvimento da resistência mecânica do cimento foi investigada por KIHARA et alii¹⁸. Estudos estatísticos de correlação de parâmetros de resistência com a finura de moagem, o coeficiente mineralógico(KM), o fator de KNÖFEL e a relação de finura com o tempo de moagem (blaine/t) indicaram que os resultados de resistência aos 28 dias são os que apresentam os melhores índices de correlação e que quanto melhor a moabilidade do clínquer, melhor é o desempenho mecânico do cimento.

Os estudos de correlação estatística entre a resistência mecânica aos 28 dias e os parâmetros obtidos no ensaio de moabilidade (*Tabela 3*), desenvolvidos em um universo mais restrito de amostra (16) e de fábricas (7), são apresentados nas *Figuras 2E e 2F*. A amostra A5, com alto KM (57.4), não foi considerada no estudo, por estar muito afastada da média.

TABELA 3 - Resultados de Finura e de Resistência à Compressão de Cimentos Laboratoriais, Complementados com Valores de Moabilidade do Clínquer

Amostra nº	Coeficiente mineralógico (KM)	Finura de moagem (> 37µm)	Blaine (m ² .kg ⁻¹)	Resistência à compressão (MPa)		
				3 dias	7 dias	28 dias
A-1	24,4	28,7	367	27,6	33,6	39,2
A-2	29,5	23,5	374	30,3	35,5	41,6
A-3	19,9	27,7	366	28,8	33,9	39,4
A-4	36,8	21,7	369	33,4	35,8	41,8
A-5	57,4	23,7	360	32,7	36,6	42,2
A-6	28,5	26,3	358	29,4	33,9	40,4
B-7	14,3	30,2	362	27,4	33,2	37,5
B-8	12,4	32,8	358	27,4	32,8	38,0
B-9	7,2	33,7	355	27,4	32,5	37,0
B-10	8,6	31,2	372	30,2	33,0	38,7
B-11	5,1	32,0	372	26,2	30,5	35,4
B-12	19,0	27,8	370	27,2	32,2	38,0
D-19	6,9	32,8	346	21,8	28,0	36,5
E-24	28,0	23,6	352	28,2	34,4	40,0
K-35	7,4	29,2	380	23,5	27,1	36,2
L-37	7,8	31,3	355	23,2	29,9	37,1
Q-43	17,8	28,9	362	27,4	34,0	39,9

Estudos estatísticos de correlação linear múltipla entre a resistência aos 28 dias de 16 amostras de cimento experimental e os parâmetros selecionados (finura de moagem KM) resultaram na seguinte equação:

$$\text{Resist.}_{28} = 34,121 + 0,1891 \text{ KM} + 0,0412 \text{ Finura de moagem,}$$

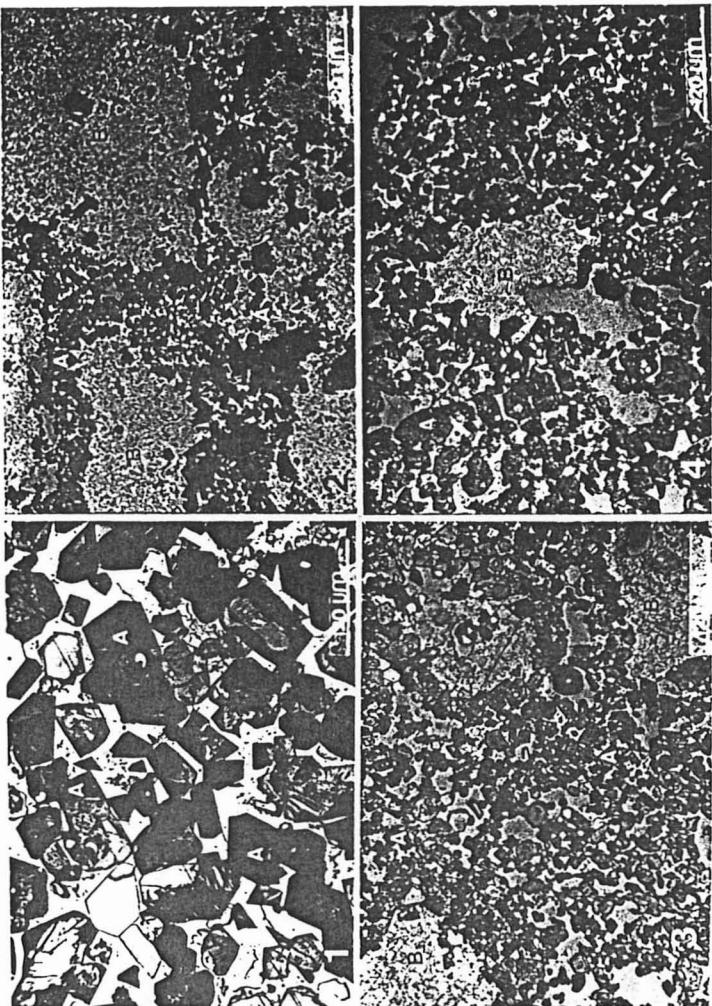
onde o coeficiente de correlação obtido é $R = 0,92$ e os coeficientes de regressão parciais padronizados são de 0,989 e 0,078, respectivamente, para a finura de moagem e o coeficiente mineralógico (KM).

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos estudos estatísticos permitem observar que mesmo em uma gama muito variada de amostras, a

moabilidade dos clínqueres pode ser avaliada, fundamentando-se nos parâmetros mineralógicos representados pelo coeficiente mineralógico KM e nos valores de finura obtidos no ensaio expedito de moabilidade proposto. Os resultados obtidos permitem as seguintes considerações:

- a) a moabilidade do clínquer é favorecida pelo aumento do coeficiente mineralógico KM. Entretanto, a correlação não é linear para valores de KM superiores a 40 (*Figura 1C*);
- b) a freqüência de *finos* do clínquer (fração <4,8mm) tem influência restrita na moabilidade, não atuando significativamente nos resultados de finura obtidos (*Figura 1D*);
- c) a granulometria inadequada da sílica na matéria-prima, condiciona a formação de zonas belíticas (C_2S) e a diminuição da relação C_3S/C_2S , (*fotomicrografias 1, 2, 3 e 4*) refletindo negativamente na moabilidade. Na *Figura 2*, as condições de moagem da sílica são visualizadas pelos símbolos D (Deficiente), I (Insatisfatória) e N (Normal) onde os valores mais altos de resíduo (fração >37 μm) são correlacionáveis com as condições de moagem deficiente da sílica;
- d) clínqueres com valores de KM superiores a 20 apresentam condições de moagem da sílica normais e são considerados de fácil moabilidade, enquanto que aqueles com valores inferiores a 10 apresentam condições de moagem deficiente da sílica e são considerados de difícil moabilidade; e,
- e) embora de modo restrito, pode-se sugerir que clínqueres moles, com índice de trabalho (*Bond*) menor que 18kWh/t, correspondem a clínqueres com KM



FOTOMICROGRAFIAS 1, 2, 3 e 4: Feições de clinqueres com valores variados de KM. Foto 1 = KM alto (dimensão e elevada da alita); Foto 2 = KM alto (freqüência de zonas de belita); Foto 3 = KM baixo (pequenos cristais de alita); e Foto 4 = KM médio (cristais médios de alita)

superiores a 12. Por outro lado, clínqueres duros, com índice de trabalho (*Bond*) maior que 21kWh/t, correspondem a clínqueres com KM inferiores a 6.

No tocante às resistências mecânicas, constatou-se que embora em um universo mais restrito de amostra (16), a utilização de parâmetros mineralógicos e de finura permite uma avaliação do porcentual de desenvolvimento de resistência mecânica do clínquer. A análise de valores obtidos possibilitam as seguintes considerações:

- a) a moabilidade do clínquer, representado pela finura de moagem (%<37 μ m) desempenha um importante papel no desenvolvimento da resistência do cimento: quanto melhor a moabilidade, maior a finura e maior a resistência (*Figura 2F*);
- b) o coeficiente mineralógico KM, tem também influência no desenvolvimento da resistência: relação alita/belita mais elevadas e dimensão menor dos cristais de alita, representados por valores altos de KM, são fatores favoráveis à resistência (*Figura 2E*);
- c) a previsão da resistência mecânica aos 28 dias pode ser determinada pela equação da regressão múltipla.

$$R_{28} = 34,121 + 0,1891 \text{ KM} + 0,0412 \text{ Finura de moagem}$$

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os parâmetros analisados nesses estudos (químicos, mineralógicos e granulométricos) as características mineralógicas das fases silicáticas

mostraram uma melhor inter-relação com o processo de moabilidade do clínquer.

A maior freqüência e a menor dimensão dos cristais de alita (C_3S) favorecem a moabilidade, ao passo que a maior freqüência de belita (C_2S), principalmente agrupadas em zonas, dificulta este processo. O coeficiente mineralógico (KM) sintetiza a influência desses parâmetros, verificando-se que valores de KM superiores a 20 indicam clínqueres potencialmente de fácil cominuição (*moles*) e aqueles inferiores a 10, clínqueres de moabilidade mais difícil (*duros*). A correlação com o método de *Bond* é menos significativa e indica que clínqueres com KM maior que 12 correspondem a clínqueres de fácil moabilidade (<18kWh/t).

As características mineralógicas que influenciam a moabilidade do clínquer desempenham um importante papel na finura do cimento: quanto maior o coeficiente mineralógico KM, melhor a moabilidade e maior a finura, e, portanto maior o desenvolvimento de resistência mecânica.

A aplicação do método expedito de moabilidade constitui uma importante ferramenta de apoio à otimização da moabilidade do clínquer e à avaliação do potencial de desenvolvimento de resistência mecânica, tendo como características favoráveis o seu baixo custo e a maior rapidez de ensaio.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. SCHEUBEL, B. & BALZER, H.J. Microscopic examinations of cement clinker using the linear traverse technique for determination of clinker grindability. *Zement-Kalk-Gips*, v.34, n.11, p.624-627. nov. 1983.

02. ONO, Y. Microspical estimation of burning condition and quality of clinker. In: INTERNATIONAL Congress on the Chemistry of Cement, 7^o, v.2, I-206-11. Paris, 1980.
03. KNÖFEL D. Relationship between chemism, phase content and strength in portland cements. Zement-Kalk-Gips, v.32, n.9, p.448-54, set.1979.
04. HARGAVE, R.V., VENKATESWARAN, D., DESHMUKH, V.V. & CHATTERJEE, A.K. Quantification of OPC clinker microstructure - An approach for prediction of cement strength. In: INTERNATIONAL Congress on the Chemistry of Cement, 8^o, v.2, p.167-172, Rio de Janeiro, 1986.
05. BRUGGEMAN, H. & BRENTTRUP, L. Correlation between mineralogical clinker parameters and cement strenght. In: Proceedings of the Eleventh International Conference on Cement Microscopy, p.226-245, 1989.
06. SINHA, S.K., RAO, L.H. & AKHOURI, P.K. Rapid estimation of 28 day compressive strength of clinker by optical microscopy. In: Proceedings of the 13th International Conference on Cement Microscopy, p.30-37, Tampa, 1991.
07. VENKATESWARAN, D. & GORE, V.K. Application of microstructural parameters to the grindabildy prediction of industrial clinkers. In: Proceedings of the 13th International Conference on Cement Microscopy, p.60-70, Tampa, 1991.
08. MARCIANO Jr., E. Influênciados parâmetros texturais e mineralógicos na moabilidade do clínquer. Boletim Informativo de Microscopia, São Paulo: ABCP, nº 23, p.2-4, jul/dez 1980.
09. GOUDA, G.R. Effect of clinker composition on grindability. Cement and Concrete Research, Elmsford, v.9, n.2, p.209-18, 1979.
10. KIHARA, Y. Estudo crítico dos parâmetros que atuam na moabilidade do clínquer: influência das zonas de belita. Boletim Informativo de Microscopia, São Paulo: ABCP, nº 24, p.2-6, jan/jun 1991.
11. ODLER, I. Strength of cement (final report). Materials and Structure, v.24, n.141, p.143-157, mars 1991.
12. HORNAIN, H & REGOURD, M. Fissuration et broyabilité du clinker. In: INTERNATIONAL Congress on the Chemistry of Cement, 7^o, v.2, I-276-81, Paris, 1980.

13. DORN, J.D. The influence of coarse quartz in kiln feed on the quality of clinker and cement. In: Proceedings of the Seventh International Conference on Cement Microscopy, p.10-23, 1985.
14. DECKER, M. The grindability of cement clinker. Zement-Kalk-Gips, Wiesbaden, v.25, n.9, sept. 1972, p.445-48.
15. BUCHAMAN, C.E.Jr. & BAYLES, H.J. Effects of clinker size on grindability. In: Proceedings of the Seventh International Conference on Cement Microscopy, p.196-212, 1985.
16. BUCHER, M.R.E. Moabilidade do cimento e de suas matérias-primas. In: ANAIS da Reunião de Técnicos da Indústria de Cimento, 34º, São Paulo, julho de 1993 (Anexo 4).
17. KIHARA, Y. CENTURIONE, S.L & MUNHOZ, F.A.C. Método Expedito de Avaliação da Moabilidade do Clínquer Portland por Microscopia. In: ANAIS do Congresso Brasileiro de Cerâmica, 34º, p.1145-1156, 1993.
18. KIHARA, Y. CENTURIONE, S.L. & MUNHOZ, F.A.C. An approach to the prediction of portland clinker grindability and strength by microscopy. In: INTERNATIONAL Congress in the Chemistry of Cement, 8º, v.6, p.182-188, 1992.