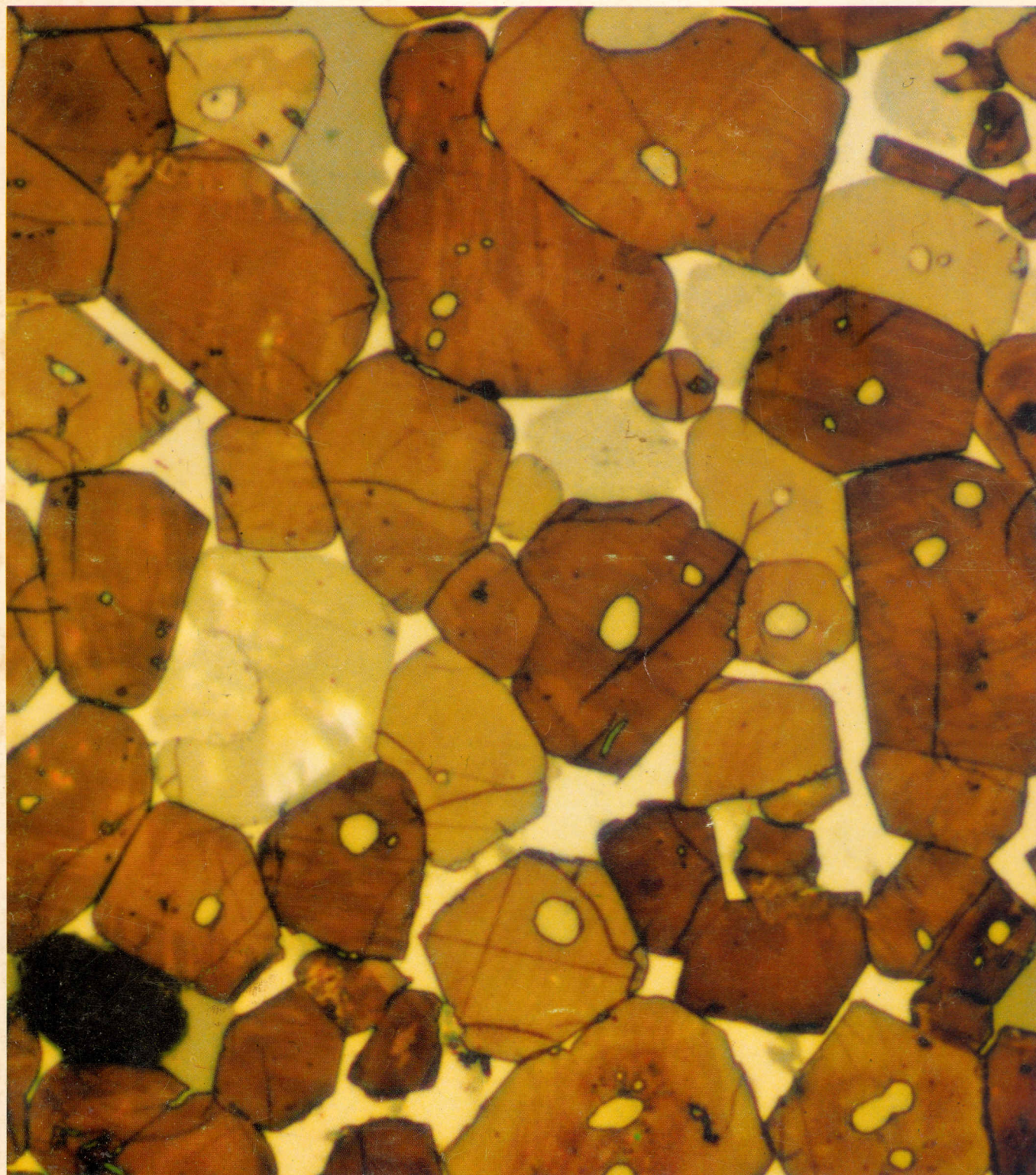


# Cerâmica

ÓRGÃO OFICIAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA — ANO XXXII — VOL. XXXII — Nº 200 SETEMBRO 1986



especial - trabalhos técnicos sobre cimento



# Cálculo de farinhas para clínquer de cimento portland comum usando microcomputador (\*)

ABRAHAM ZAKON

Departamento de Processos Inorgânicos

Escola de Química — Centro de Tecnologia

Ilha da Cidade Universitária

Universidade Federal do Rio de Janeiro

21910 Rio de Janeiro — RJ

RAKAMI PEDRO FERNANDES

Avenida Meriti, 361/202

21220 Vila Kosmos — RJ

## ABSTRACT

### Calculation of portland cement clinker raw mixes by microcomputer.

The raw mix for clinker formation is a sum of inorganic oxides and other substances. The moduli and factors of saturation are empirical relations, which range of acceptable values allow to find adequate proportions of raw materials thorough iterative methods. Hand calculations give one-at-time solution after 10 minutes of work. The dimensionless form of sum equations suggest one to draw proper graphics which may help the production engineer to avoid unsatisfactory results. Mathematical algorithms facilitate one to elaborate programs for microcomputers to obtain proportions of raw materials for clinker production from data of chemical analysis. Raw mixes composed by limestone, clay, iron materials with, or without, coal may be rapidly formulated and avoid loss of materials. Various mixes are tabulated in each printed output.

## A PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND COMUM

Qualquer processo de fabricação de cimento por via úmida, semi-úmida, seca ou semi-seca pode empregar a seqüência apresentada na Figura 1. A composição da farinha pode ser calculada a partir dos teores dos óxidos formadores fundamentais do clínquer: de cálcio (CaO), de silício (SiO<sub>2</sub>), de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Os cálculos estequiométricos estão interligados aos resultados analíticos do Controle Químico da Qualidade numa verdadeira seqüência iterativa.

A farinha constitui-se num somatório dos óxidos CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> contidos no calcário, argila e ferro (minério ou carepa ou sucata) que reagem para formar os silicatos e aluminatos de cálcio do clínquer, bem como estão presentes em quantidades mínimas outras substâncias restantes, aqui designadas em conjunto pela letra R, que seriam outros óxidos, traços de metais e não-metais, além de impurezas diversas (1). Pelas análises químicas, verifica-se que:

$$\text{Calcário: } F_1 = f_1 (\text{CaO, P.F., R}) \quad (I)$$

$$\text{Argila: } F_2 = f_2 (\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{P.F., R}) \quad (II)$$

$$\text{Óxido de ferro: } F_3 = f_3 (\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{R}) \quad (III)$$

$$\text{Cinzas de carvão: } F_4 = f_4 (\text{CaO, SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{R}) \quad (IV)$$

$$\text{Então: } F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = \text{Farinha} \quad (V)$$

$$F = m \sum \text{CaO} + n \sum \text{SiO}_2 + p \sum \text{Al}_2\text{O}_3 + q \sum \text{Fe}_2\text{O}_3 + R \quad (VI)$$

Nestas expressões matemáticas, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> representam seus respectivos teores percentuais nas matérias-primas e os somatórios correspondem aos teores na farinha F, sendo m, n, p e q fatores cujos valores podem variar entre zero e um. A perda ao fogo é representada por P.F..

## OS MÓDULOS CIMENTEIROS

Pela Equação: (VI), podemos obter:

$$\frac{F - R - m \sum \text{CaO}}{m \text{ CaO}} = \frac{n \sum \text{SiO}_2 + p \sum \text{Al}_2\text{O}_3 + q \sum \text{Fe}_2\text{O}_3}{m \text{ CaO}} \quad (VII)$$

Por inversão, obtém-se um módulo adimensional, M<sub>1</sub>:

$$M_1 = \frac{m \sum \text{CaO}}{n \sum \text{SiO}_2 + p \sum \text{Al}_2\text{O}_3 + q \sum \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (VIII)$$

Empregando tratamentos semelhantes, obtém-se:

$$M_2 = \frac{n \sum \text{SiO}_2}{p \sum \text{Al}_2\text{O}_3 + q \sum \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (IX)$$

$$M_3 = \frac{p \sum \text{Al}_2\text{O}_3}{q \sum \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (X)$$

Para cada expressão de M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> e M<sub>3</sub> pode corresponder um intervalo de valores aceitáveis correspondentes ao tipo de cimento produzido.

Nas expressões de M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> e M<sub>3</sub>, os fatores m, n, p e q podem assumir valores arbitrários ou convenientes ou empíricos. Por exemplo, M<sub>1</sub> foi definido por Kühl de "Fator de Saturação de cal" (FSC), através da relação abaixo:

$$\text{FSC} = \frac{\% \text{ CaO total}}{\% \text{ CaO máximo}} \quad (XI)$$

que relaciona o teor de CaO existente na mistura (farinha, pelotas ou pasta) e o teor de CaO máximo que reagiria com a argila para formar os silicatos e aluminatos de cálcio durante a clínquerização. Dessa concepção, surgiram diversas expressões para o teor de CaO máximo, como, por exemplo:

- a — CaO máx. = 2,8 SiO<sub>2</sub> + 1,1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,7 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Kühl)
- b — CaO máx. = 2,33SiO<sub>2</sub> + 1,65Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 1,05Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Hendrickx)
- c — CaO máx. = 2,8 SiO<sub>2</sub> + 1,65Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,35Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
(Guttman e Gille) (XII)
- d — CaO máx. = 2,8 SiO<sub>2</sub> + 1,18Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,65Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Lea e Parker)
- e — CaO máx. = 2,8 SiO<sub>2</sub> + 1,18Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,65Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,75MgO  
(Lea e Parker)

Tais concepções teóricas permitem o uso de diversas expressões dos módulos e fatores cimenteiros, por exemplo, relacionados na Tabela I.

## OS CÁLCULOS MANUAIS DA COMPOSIÇÃO DA FARINHA

A determinação do teor de cada componente na farinha depende essencialmente da composição química das matérias-primas.

Os procedimentos sem uso de computador consistem de: **a** — tabelar os dados analíticos numa mesma matriz (Tabela II); **b** — Atribuir valores iniciais para as proporções de cada matéria-prima e multiplicar estes pesos pelos respectivos dados analíticos contidos nas colunas; **c** — Tabelar

(\*) Trabalho apresentado ao XXIX Congresso Brasileiro de Cerâmica — Criciúma — SC, Abril — 1985.

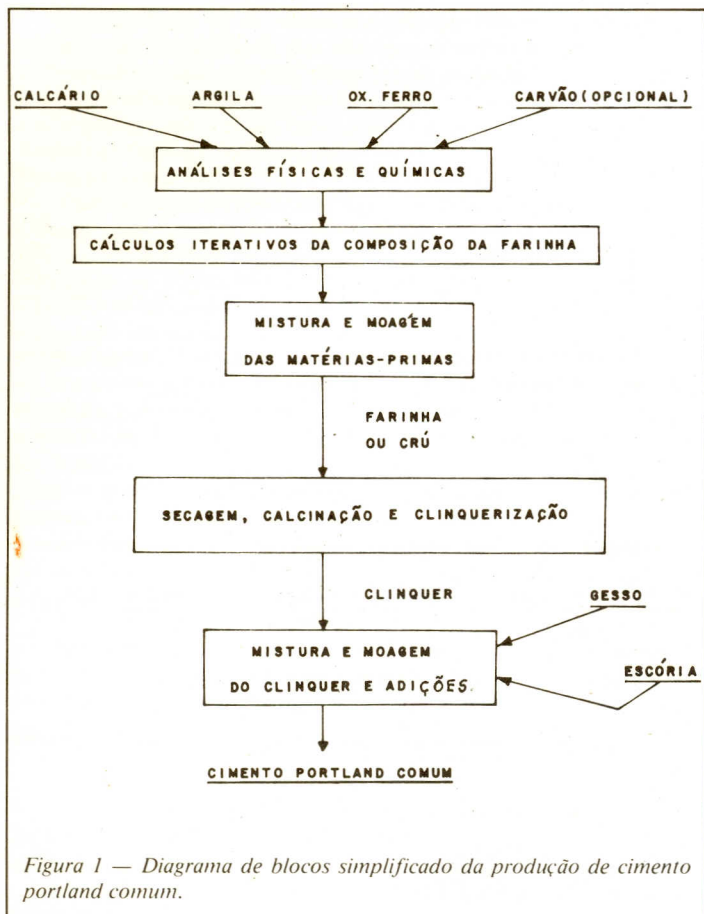


Figura 1 — Diagrama de blocos simplificado da produção de cimento portland comum.

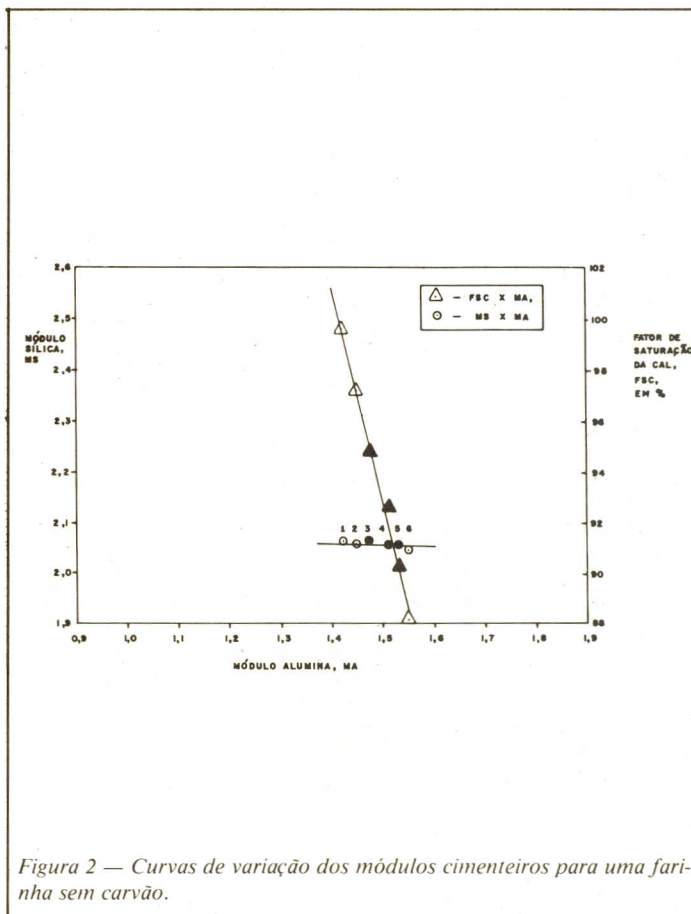


Figura 2 — Curvas de variação dos módulos cimenteiros para uma farinha sem carvão.

TABELA I — Módulos e fatores cimenteiros (2,3,4)

$$\text{Módulo Silica, MS} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

$$\text{Módulo Alumina ou Aluminoso, MA} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

$$\text{Módulo Hidráulico, MH} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

(Fórmula de Michaelis)

$$\text{Módulo de Kühl, MK} = \frac{\text{CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,1\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (*)$$

(ou Padrão de Cal I)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (*)$$

(Fórmula de Lea e Parker ou Padrão de Cal II)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8\text{Si}_2 + 1,65\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (*)$$

(quando MA > 0,64)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{100 \text{ CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,1\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (*)$$

(quando MA < 0,64)

$$\text{Fator de Saturação de Cal, FSC}_B = \frac{100 (\text{CaO} - 0,7\text{SO}_3)}{2,8\text{SiO}_2 + 1,2\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (*)$$

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{100 (\text{CaO} - 0,75 \text{MgO})}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (*)$$

(ou Padrão de Cal III, quando MgO ≤ 2%)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC} = \frac{(\text{CaO} - 1,5 \text{MgO}) 100}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (*)$$

(quando MgO > 2%)

$$\text{Fator de Saturação da Cal, FSC}_R = \frac{\text{CaO} - (1,65\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7(\text{SO}_3))}{2,8\text{SiO}_2} \quad (*)$$

(\*) expressões em termos de percentagens.

TABELA II — Análises químicas das matérias-primas

Matérias-Primas	Análises				
	Calcário	Argila	Ox. ferro	Carvão	Farinha
Dados Analíticos					
Perda ao Fogo (%)					
SiO <sub>2</sub> (%)					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)					
CaO (%)					
MgO (%)					
Na <sub>2</sub> O (%)					
K <sub>2</sub> O (%)					
SO <sub>3</sub> (%)					
Umidade (%)					
Mat. Volátil (%)					
Carbono Fixo (%)					

TABELA III — Composições de farinha para clínquer portland comum (p/p)

Matéria-prima	Sem carvão (%)	Com carvão (%)
Calcário	80 a 88	80 a 85
Argila	10 a 15	10 a 15
Ferro	1,5 a 2	1 a 2
Carvão	—	2 a 4







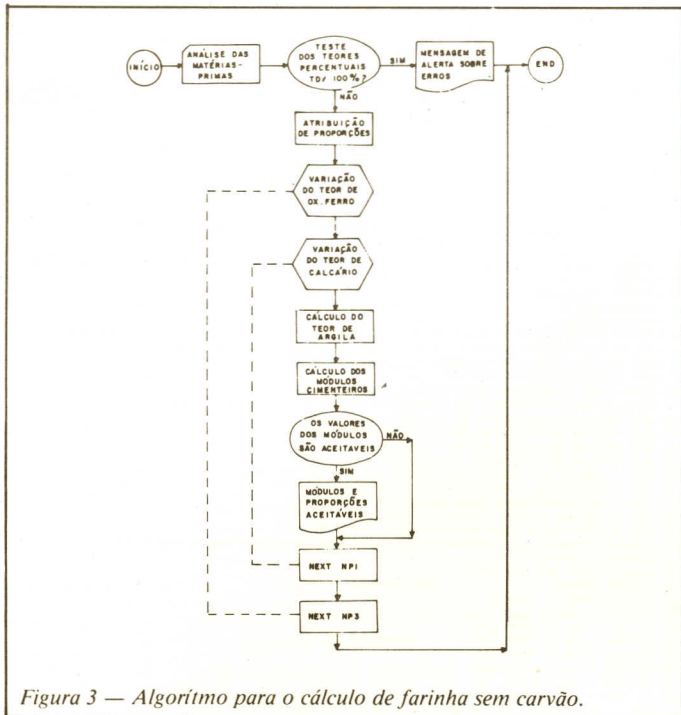


Figura 3 — Algoritmo para o cálculo de farinha sem carvão.

os resultados na mesma forma acima; **d** — Calcular os módulos cimenteiros pertinentes empregando os somatórios dos óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; **e** — Se os valores obtidos não forem aceitáveis atribuir novas proporções para as matérias-primas e repetir os cálculos.

Para a produção de Cimento Portland Comum, admite-se:

$$MS = \frac{\sum \text{SiO}_2}{\sum \text{Al}_2\text{O}_3 + \sum \text{Fe}_2\text{O}_3} \text{ variando entre 2 e 2,4} \quad (\text{XIII})$$

$$MA = \frac{\sum \text{Al}_2\text{O}_3}{\sum \text{Fe}_2\text{O}_3} \text{ variando entre 1,0 e 1,8} \quad (\text{XIV})$$

$$FSG = \frac{100 \sum \text{CaO}}{2,8 \sum \text{SiO}_2 + 1,18 \sum \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \sum \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

variando entre 90 e 95%

A busca de uma formulação para a mistura equivale a encontrar uma ou mais raízes de uma equação que pode ser escrita sob a forma  $F(x) = 0$ , conforme exposto por Zakon (5). A localização de raízes reais (teores dos componentes das misturas) pode ser efetuada numericamente a partir de varreduras num campo de existência pequeno (quando a faixa de valores dos parâmetros for conhecida) ou grande (quando houver desconhecimento prévio das condições desejáveis).

As iterações lineares aplicam o desdobramento de  $F(x) = 0$  num sistema de duas equações:  $F(x) = 0$  gera  $x = g(x)$ , que resulta em:

$$\begin{aligned} y &= x && \text{(uma reta)} \\ y &= g(x) && \text{(uma curva qualquer ou mesmo uma reta)} \end{aligned} \quad (\text{XVI})$$

É possível também efetuar outro desdobramento:  $F(x) = 0$  gera  $p(x) = q(x)$ , que resulta em:

$$\begin{aligned} y &= p(x) && \text{(uma curva qualquer)} \\ y &= q(x) && \text{(outra curva qualquer)} \end{aligned} \quad (\text{XVII})$$

Em ambos os casos, a intersecção das duas curvas ou retas geradas equivale a uma raiz da equação  $F(x) = 0$  no intervalo de existência de  $x$ .

Considerando-se os somatórios dos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  presentes nos denominadores dos Módulos Silica e Alumina e do Fator de Saturação de Cal, é possível localizá-los conforme a Figura 2, de modo que os seus respectivos valores sejam lançados após cada iteração. Cada intersecção das retas ou curvas geradas corresponde a uma formulação satisfatória para a farinha.

Para a formação da farinha de cimento portland comum os intervalos de existência ou de varredura estão indicados na Tabela III.

Os critérios para as varreduras estequiométricas envolvem:

**A** — Incrementos: Calcário — 0,5 em 0,5% ou 1,0 em 1,0%; Argila — variar de acordo com o calcário; Ox. ferro — 0,1 em 0,1% ou 0,2 em 0,2% ou 0,5 em 0,5% (varredura rápida); Carvão — 0,5 em 0,5%.

**B** — Prioridades: Farinhas sem carvão — Inicialmente, manter baixo e constante o teor de óxido de ferro; variar o teor de calcário partindo de valores elevados e adotar teores baixos para a argila. Farinhas com carvão — manter, a princípio, baixos e constantes os teores de carvão e argila e variar os de calcário e ferro.

É importante notar que tais critérios não são rígidos e podem ser modificados pelos interessados, principalmente se o número de matérias-primas for maior que três ou quatro.

### PROGRAMAS PARA MISTURAS SEM E COM CARVÃO

A Figura 2 representa os resultados de seis cálculos iterativos manuais onde apenas as terceira, quarta e quinta tentativas apresentaram resultados satisfatórios para misturas formadas por calcário, argila e óxido de ferro. Um programa de microcomputador elaborado em linguagem BASIC permite obter, por exemplo, em dois minutos, resultados satisfatórios para seis formulações. Isto é, o número de formulações só depende dos incrementos maiores ou menores adotados pelo calculista-programador. A coleção de tentativas manuais representadas no gráfico consumiu em torno de trinta minutos.

A Figura 3 apresenta o algoritmo para o cálculo de farinhas sem carvão. Os programas listados nas Tabelas IV e V foram usadas num microcomputador Itautec, doado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Os resultados fornecidos em cada listagem tornam desnecessário o uso de gráficos conforme os da Figura 2, adequados para orientar os cálculos manuais.

### CONCLUSÕES

Os cálculos manuais (mesmo usando calculadoras) são tentativos, trabalhosos e demorados. O uso de um gráfico adimensional para os módulos cimenteiros evita que o calculista se perca nas tentativas frustradas. A metodologia iterativa apresentada visa garantir a qualidade do Cimento Portland Comum produzido. Quanto maior o número de matérias-primas mais trabalhoso será o método e mais vantajoso o uso de microcomputador, pois cada listagem poderá apresentar tabelas de valores para orientar a produção e o controle da qualidade. O programador da produção deverá estar fortemente preparado em Química do Cimento e métodos iterativos e possuir sólidos conhecimentos de programação de computadores para poder julgar outras alternativas em problemas industriais ou de emergência. Tal metodologia pode ser adaptada para outros tipos de cimento e produtos cerâmicos, bem como para o cálculo de argamassas.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à: Cimento Irajá SA; Associação dos Ex-Alunos da EQ-UFRJ, DEQ-EPUSP; Engenheiro Volney do Nascimento Ribeiro; Engenheiro Álvaro de Sá; Prof. Dr. Bernardo José Guimarães Mascarenhas; Prof. Dr. Pêrsio de Souza Santos e Prof. Dr. Sérgio Rodrigues.

### REFERÊNCIAS

- (1) Zakon, A. — "Cimento", Notas de Aulas, Departamento de Processos Inorgânicos, Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1984.
- (2) Chatterjee, A.K. — "Cement raw materials and raw mixes: Part I" *Pit & Quarry*, September 1979, pp. 103-111.
- (3) Tavares, D. e Ribeiro, V.N. — "Cimento Portland" *Química*, Diretório Acadêmico da Escola Nacional de Química da Universidade do Brasil, 8(1), 21 (1952).
- (4) Lea, F.M. — "The Chemistry of Cement and Concrete", 3<sup>rd</sup> Ed. Edward Arnold (Publishers) Ltd., Glasgow, 1970.
- (5) Zakon, A. — "Métodos Tentativos, Aproximativos e Iterativos na Engenharia Química". *Revista Brasileira de Engenharia Química*, 5 (1), 11 (1981).

Registro na ABC: Trabalho nº 315.