

mineração metalurgia

ANO 50 — N.º 478 — JULHO DE 1997

ARCHER:

**“A lei de informática
foi feita para ajudar
e não para atrapalhar”**

**O computador e
sua aplicação no
setor mineral**

ANO DO CINQUENTENÁRIO
7.ª EDIÇÃO ESPECIAL

Cálculos de cimento Portland comum por microcomputadores para composição e fator de saturação da cal definidos

Abraham Zakon
Rakami Pedro Fernandes

Foi elaborado um programa em linguagem BASIC para apresentar as proporções de argila, calcário e minério (ou carepa) de ferro capazes de produzir cimento portland comum com teores de clínquer entre 85,5 e 93,5%, gesso de 1,5 até 4,5% e escória na faixa de 5 a 10%. O algoritmo efetua o cálculo das composições químicas teóricas do cimento, clínquer e farinha, comparando os resultados desta última com os dados analíticos das diversas possibilidades reais de misturas de matérias-primas para o cru, de modo a estabelecer formulações desejáveis. Fórmulas de custo podem ser incluídas e aumentar o poder de simulação do programa, útil para os setores de produção e controle de qualidade. O programa pode ser ampliado para misturas envolvendo carvão e outras matérias-primas.

A mBASIC program was written to give the proportions of clay, limestone and iron ore needed to produce "common" (Type I, ASTM) portland cement with 85.5 — 93.5% of clinker, 1.5 — 93.5% gypsum content and proportions of 5 to 10% for slag. The algorithm calculates the theoretical chemical compositions of cement, clinker and raw mix, and compares this last with the various possibilities of acceptable raw material proportions, in order to establish desirable formulations. Cost formula may be included and increase the simulations ability of program as a tool for production and quality control. The program may be adapted for mixes involving coal and other raw materials.

As histórias química e mineralógica do cimento

O cimento é um mineral artificial. O cimento portland comum é resultante da mistura de clínquer, escória e gesso e suas principais etapas de produção podem ser visualizadas na figura 1. Tanto o clínquer quanto a escória são minerais artificiais. Dependendo da localização da fábrica de cimento, o gesso pode ser oriundo de jazidas ou de indústrias de fabricação do ácido fosfóri-

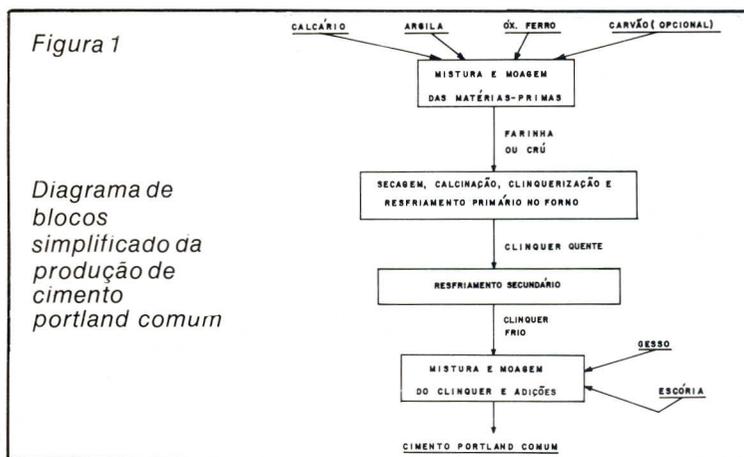


Tabela 1 — História química de um cimento

Materiais Dados Analíticos	Cal- cário	Ar- gila	Óx. Ferro	Fa- rinha	Clin- quer	Escó- ria	Ges- so	Ci- mento
	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	
Perda ao Fogo, %								
SiO ₂ , %								
Al ₂ O ₃ , %								
Fe ₂ O ₃ , %								
CaO, %								
MgO, %								
Na ₂ O, %								
K ₂ O, %								
SO ₃ , %								
Umidade, %								
Mat. Volátil, %								
Carbono Fixo, %								

Nota: A análise química do carvão (opcional) poderia ocupar uma coluna no quadro acima

co, como subproduto denominado "fosfogesso"

As técnicas de Análise Quantitativa Inorgânica fornecem as composições químicas das matérias-primas, clínquer, escória, gesso e cimento (e, quando for o caso, de outros materiais utilizados nas fábricas de cimento normalizados ou especiais), expressos em teores percentuais de óxidos de silício, alumínio, cálcio, ferro, sódio, potássio, magnésio, enxofre, carbono, bem como perda ao fogo, umidade, matéria-volátil e carbono fixo, em bases úmida e seca, conforme os critérios de cada fabricante. Com tais dados é possível compor a História Química do Cimento produzido (conforme indicado na Tabela 1).

A história química do cimento será completa se forem indicadas as proporções de cada matéria-prima componente da farinha, bem como do clínquer e das adições empregadas, as quais serão correspondentes ao forno usado. Clínqueres produzidos em diferentes fornos apresentam histórias semelhantes mas não necessariamente coincidentes, mesmo que sejam matérias-primas comuns.

Para produzir cimentos dentro de padrões de qualidade desejáveis é necessário contar com o apoio de geólogos ou engenheiros de minas para que sejam localizadas e corretamente exploradas as jazidas das matérias-primas naturais. Tal necessidade acarreta o emprego de técnicas de Análise Mineralógica para as matérias-primas que podem ser estendidas ao clínquer e às adições finais ao mesmo.

A Análise Mineralógica abrange conceitos e técnicas oriundas da Geologia, da Física e da Química, dividindo-se em Cristalografia e Mineralogias Física, Química e Descritiva (1). As téc-

Tabela II — História mineralógica de um cimento*

Matérias-Primas Aceitáveis	
Calcário Calcítico	CaCO ₃
Argila (Folhelhos, Taguás, Tilitos, Ardósias)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
Carvão Mineral (Cinzas)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , K ₂ O, Fe ₂ O ₃
Minério de Ferro, Carepa ou Ferro-Velho	Fe ₂ O ₃
Rochas Sílico-Calcárias (Margas Argilosas ou Massapês)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO
Possíveis Componentes do Clinquer	
Fases Majoritárias**	
Silicatos (Cristais)	— Alita, C ₃ S
	— Belita, C ₂ S — Alfa Beta — Belitas I, II, e III
Aluminatos (Massa Intersticial)	— Celita Escura — Retangular, C ₃ A
	— Prismática, C ₃ A e C ₅ A ₃
	— "Encastrada", C ₃ A ₅
Ferritos (Massa Intersticial)	— Soluções Sólidas de C ₄ AF, C ₆ AF ₂ , C ₂ F
Fases minoritárias Óxidos	— Cal livre, CaO, Primária e Secundária — Magnésia
Possíveis Adições ao Clinquer (ABNT)	
Gesso Natural (Gipsita)	CaSO ₄ .2H ₂ O
Artificial	CaSO ₄ .1/2H ₂ O
Escória	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, K ₂ O, Fe ₂ O ₃

* Portland Comum (ABNT)

** Descritas com a notação dos químicos de cimento.

nicas da Análise Mineralógica envolvem o uso de Microscopia Ótica e Eletrônica, Análise Térmica Diferencial, Difração de Raios-X e Eletrons, Espectrometria de Raios Infravermelhos e Análises Químicas para revelar a natureza dos compostos químicos das matérias-primas e, principalmente, daqueles formados nos processos de fusão, cristalização e vitrificação ocorridos na produção do clinquer (2,3,4).

Os óxidos CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ contidos nas matérias-primas reagem entre si e com outros óxidos no forno da clinquerização, dando origem a uma série de produtos químicos mais complexos (a maioria liquefeitos) e, com exceção de um pequeno resíduo de cal não-combinada que não teve tempo para reagir, é alcançado um estado de equilíbrio químico. No entanto, tal equilíbrio não se mantém no resfriamento. A velocidade do resfriamento irá afetar o grau de cristalização do clinquer frio gerando um sólido não-cristalino. As propriedades deste material vítreo diferem sensivelmente daquelas dos compostos cristalinos de composição química similar. Outra complicação resulta da interação da fase líquida do clinquer com os compostos cristalinos já presentes ainda no forno. Não obstante, considera-se o cimento em "equilíbrio congelado", ou seja, as fases líquidas e sólidas, depois de resfriadas, reproduzem o equilíbrio existente à temperatura de clinquerização(5).

De tais processos químicos, cristalográficos e vítreos, que ocorrem no forno de clinquerização e nos resfriadores primários e secundários, resultam compostos minerais artificiais, isto é, fases sólidas que podem ser iden-

tificadas por técnicas de Análise Mineralógica.

Do ponto de vista mineralógico, o clinquer de cimento portland pode ser considerado como uma rocha artificial de origem eruptiva ou ígnea (6). É considerado petrograficamente como um conglomerado de elementos cristalinos e de fase vítrea, formado pela consolidação do cru (ou farinha) parcialmente fundido após ser submetido a elevadas temperaturas de clinquerização. É possível observar-se que os componentes mineralógicos do clinquer apresentam-se divididos em três grupos bem definidos:

- silicatos — apresentam-se como cristais bem formados, os quais não chegaram a fundir durante o período de clinquerização;
- massa intersticial — é a fase em cujo seio estão distribuídos os cristais e que se solidifica posteriormente;
- óxidos — é o grupo minoritário que forma inclusões em pequenas quantidades disseminadas nos grupos anteriores.

A composição mineralógica de um clinquer é um re-

trato do "equilíbrio congelado" que se obteve. Com os dados das composições mineralógicas das matérias-primas, do clinquer e de suas adições é possível compor a *História Mineralógica do Cimento (Tabela II)*, a qual não é tão simples quanto a sua correspondente história química, mas constitui um valioso instrumento de diagnose da produção do clinquer e do cimento, partindo-se dos "retratos" obtidos nas amostras dos materiais ao longo do processo (6, 7).

As composições química, mineralógica e potencial

A história química do cimento é útil para os cálculos estequiométricos da produção do cimento mas é insuficiente para correlacionar a composição química real do mesmo com suas propriedades de desempenho. A história mineralógica do cimento permite estabelecer correlações entre as fases minerais presentes no produto e suas propriedades. Mas, para controlar o processo de fabricação do cimento é necessário traduzir quimicamente os resultados

da Análise Mineralógica, isto é, apresentar os teores das fases minerais como se fossem compostos pelos óxidos indicados pela Análise Química. Esta tradução é conhecida como "Composição Potencial". Desta forma, os Químicos do Cimento lidam com as seguintes composições:

química — fornece os teores percentuais dos óxidos inorgânicos dos metais presentes; perda ao fogo, umidade, matéria-volátil e carbono fixo, em base úmida ou seca;

mineralógica — apresenta os teores percentuais das fases minerais, naturais ou artificiais, indicando as estruturas cristalinas e vítreas resultantes no clinquer ou presentes nas matérias-primas e adições;

potencial — é um recurso estequiométrico tentativo que visa a correlacionar os teores de compostos sólidos cristalinos ou vítreos presentes nas fases minerais do clinquer com os óxidos inorgânicos apresentados pela composição química obtida por Análise Quantitativa. É também expressa em teores percentuais das fases sólidas presentes no clin-

quer resfriado. É calculada a partir dos teores de óxidos presentes no clínquer como se tivesse ocorrido a cristalização completa dos produtos do equilíbrio da clínquerização.

Segundo Calleja Carrete(8), o conceito físico-químico da composição potencial de um sistema, assim como o seu cálculo, estão baseados nas leis do equilíbrio térmico e, portanto, nas Regras das Fases. A composição potencial é a expressão quantitativa do conteúdo de espécies químicas bem definidas existentes ou de possível existência num sistema físico-químico em equilíbrio em determinadas condições.

O "cálculo potencial"

usado na química dos aglomerantes minerais hidráulicos para determinar a composição potencial do cimento portland é, na verdade, somente aplicável ao seu clínquer, e isto admitindo-se certas concessões. Pode aplicar-se também ao cimento portland, sem grandes erros, introduzindo-se uma correção devida à presença do agente retardador da pega(gesso) e considerando o produto como mistura exclusiva deste com o clínquer. No caso de aglomerantes mistos, com componentes secundários ou com adições, o cálculo potencial só é aplicável ao clínquer presente nos mesmos. Se neste último caso fosse aplicado o cálculo potencial

ao aglomerante total cometer-se-iam grandes erros quantitativos e de desempenho.

A composição potencial do clínquer e do cimento portland possuem relação com a composição mineralógica real, mas não coincide necessariamente com esta. Além da influência dos álcalis e dos sulfatos do clínquer é necessário considerar os demais componentes minoritários que podem formar soluções sólidas com os majoritários ou permanecer diluídos na fase vítrea, pela ação do tratamento térmico dentro do forno e durante o resfriamento na sua saída.

Prizkulnik(9) relaciona diversas formulações para o

cálculo da composição potencial a partir da análise química expressa conforme a Tabela I, as quais são:

- a) de R. H. Bogue;
- b) de R. H. Bogue; incluindo os teores de perda ao fogo e de pentóxido de fósforo;
- c) de F. M. Lea e T. W. Parker, adotando 1400.°C para a temperatura de clínquerização;
- d) de A. Glauser.

Para fins de simulação ou cálculos das composições de cimento e clínquer portland é mais simples adotar o método de R. H. Bogue, cujas fórmulas constam da especificação brasileira de cimento portland comum, premissa incluída em nosso programa.

FORNOS ELÉTRICOS BAIXA FREQUÊNCIA



Estufas e Fornos elétricos para todos os tipos de tratamento térmico, esmaltação, sinterização e fusão de metais não ferrosos com cadinho fixo e basculante.

Baixo custo operacional. Alto ponto de produtividade. Redução radical da contaminação dos materiais. Não polui o ambiente de trabalho nem a área de localização da indústria.

**Consulte nosso Departamento Técnico
financiamento próprio a longo prazo**

EQUIPAMENTOS TÉRMICOS

KARLOS

CARLOS SEP DE CARVALHO

**Rua Faxina n.º 45 — Esq. viaduto Tutóia
Vila Mariana - CEP 04008 - São Paulo/SP
Fone (011) 549.4430 - C. Postal 22058**

**COM 50 ANOS
SÓ EXISTE UM
VEÍCULO
DIRIGIDO
NO BRASIL.**

REVISTA

**mineração
metalurgia**



**VOCÊ CONTA
NOS DEDOS
AS REVISTAS
MENSIS
EM TODO O
MUNDO COM
TANTO TEMPO
DE VIDA.**

**São 10.000 exemplares que
circulam nas áreas de:**

- mineração
- metalurgia
- extração e beneficiamento de minérios
- siderurgia
- fundição
- petróleo
- cimento e outras.

**NÃO É PRECISO
DIZER MAIS NADA
ANUNCIE EM**

**mineração
metalurgia**

São Paulo: Rua Marconi 138, Gr. 309
CEP 01047 (SP) Tel.: (011)255-0240
Rio: Rua do Catete 202, Gr. 301
CEP 22220 (RJ) Tel.: (021)205-0648
B. Horizonte: R. Curitiba 705 s/606
CEP 30000 (MG) Tel.: (031)201-7942
P. Alegre: Rua Gal. Caldwell 1055
CEP 90000 (RS) Tel.: (0512)201-4550
DF: Ed. Eng.º Paulo Maurício s/1112
CEP 70000 — Tel.: (061)223-1655

CIMENTO 4

Listagem do dia 24 de janeiro de 1986

Cálculos de cimento portland comum por microcomputador para composição potencial e fator de saturação da cal definidos

Somas dos teores percentuais das matérias-primas

td1 = 99.13 td2 = 99.58 td3 = 99.4

0	32.43	12.85	1.13	38.44	5.75	.2	.61	8.28
0	0	0						
0	.09	.16	.06	33.07	.12	.2	.02	45.7
20.57	0	0						

Parte I — Cálculo da composição teórica parcial do cimento

c3sc = 24.4 c2sc = 44.92 c3ac = 9.84 c4afc = 11.72 fsc = 84.5034

Total dos teores percentuais dos óxidos fundamentais do cimento

fc = .0385121 ac = .0617124 sc = .220845 cc = .60523 soc = .025

Teor provável de gesso (sem água de cristalização)

CaSo4 = .0425

Parte II — Cálculo da composição teórica parcial do clínquer

Parte III — Cálculo da análise química teórica parcial da farinha

Parte IV — Cálculo das misturas reais da farinha desejáveis

*** tcl = .85 te = .1 tg = .05 ***

pfpa = 35 sfa = 14.4048 afa = 3.73042 ffa = 2.85634 cfa = 42.0783

Módulos e proporções aceitáveis das matérias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500
2.029	1.445	92.880	86.500	11.900	1.600
2.001	1.393	93.147	86.500	11.800	1.700

*** tcl = .86 te = .1 tg = .04 ***

pfpa = 35 sfa = 14.238 afa = 3.68825 ffa = 2.82358 cfa = 41.839

Módulos e proporções aceitáveis das matérias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500

*** tcl = .86 te = .09 tg = .05 ***

pfpa = 35 sfa = 14.4824 afa = 3.78416 ffa = 2.83166 cfa = 41.8796

Módulos e proporções aceitáveis das matérias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500
2.058	1.501	92.615	86.500	12.000	1.500
2.029	1.445	92.880	86.500	11.900	1.600
2.001	1.393	93.147	86.500	11.800	1.700

*** tcl = .87 te = .1 tg = .03 ***

pfpa = 35 sfa = 14.075 afa = 3.64705 ffa = 2.79157 cfa = 41.6052

Módulos e proporções aceitáveis das matérias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500

*** tcl = .87 te = .09 tg = .04 ***

pffa = 35 sfa = 14.3166 afa = 3.74186 ffa = 2.79956 cfa = 41.6453

Módulos e proporções aceitáveis das matérias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500
2.058	1.501	92.615	86.500	12.000	1.500
2.029	1.445	92.880	86.500	11.900	1.600
2.001	1.393	93.147	86.500	11.800	1.700

*** tcl = .87 te = .08 tg = .05 ***

pffa = 35 sfa = 14.5582 afa = 3.83667 ffa = 2.80756 cfa = 41.6854

Módulos e proporções aceitáveis das matérias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500
2.058	1.501	92.615	86.500	12.000	1.500
2.056	1.528	90.361	86.000	12.500	1.500
2.029	1.445	92.880	86.500	11.900	1.600
2.027	1.472	90.615	86.000	12.400	1.600
2.001	1.393	93.147	86.500	11.800	1.700

*** tcl = .88 te = .1 tg = .02 ***

pffa = 35 sfa = 13.9157 afa = 3.60679 ffa = 2.76029 cfa = 41.3766

Módulos e proporções aceitáveis das matérias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500
2.058	1.501	92.615	86.500	12.000	1.500
2.056	1.528	90.361	86.000	12.500	1.500
2.029	1.445	92.880	86.500	11.900	1.600
2.027	1.472	90.615	86.000	12.400	1.600
2.001	1.393	93.147	86.500	11.800	1.700

Módulos e proporções aceitáveis das matérias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500
2.001	1.393	93.147	86.500	11.800	1.700

*** tcl = .88 te = .08 tg = .04 ***

pffa = 35 sfa = 14.3935 afa = 3.79426 ffa = 2.7761 cfa = 41.456

Módulos e proporções aceitáveis das materias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500
2.058	1.501	92.615	86.500	12.000	1.500
2.029	1.445	92.880	86.500	11.900	1.600
2.001	1.393	93.147	86.500	11.800	1.700

*** tcl = .88 te = .07 tg = .05 ***

pffa = 35 sfa = 14.6323 afa = 3.88799 ffa = 2.784 cfa = 41.4956

Módulos e proporções aceitáveis das matérias-primas

ms	ma	fsc	p1	p2	p3
2.061	1.474	94.956	87.000	11.500	1.500
2.058	1.501	92.615	86.500	12.000	1.500
2.056	1.528	90.361	86.000	12.500	1.500
2.029	1.445	92.880	86.500	11.900	1.600
2.027	1.472	90.615	86.000	12.400	1.600
2.001	1.393	93.147	86.500	11.800	1.700

*** Todas as proporções de tcl, te e tg foram testadas ***

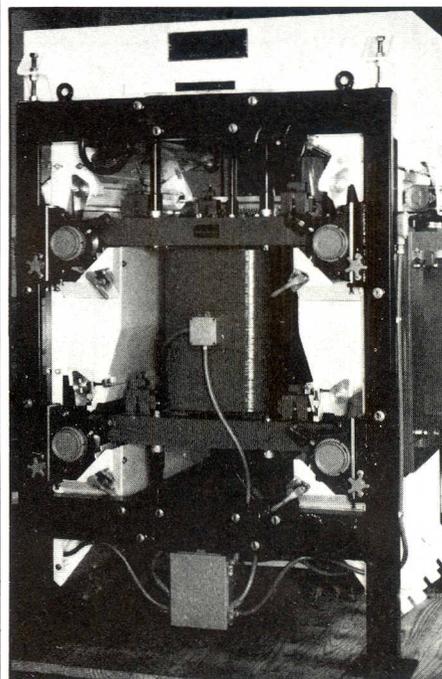
SEPARADORES DE MINÉRIOS

A TBM está fabricando no Brasil sob licença da Carpco Inc., USA e Boxmag-Rapid, Inglaterra a mais avançada linha mundial de equipamentos para separação magnética e eletrostática.

Nossos separadores processam e classificam os mais diversos tipos de minérios a um custo operacional reduzido e com total eficiência.

A garantia da correta especificação do equipamento e sua produção é assegurada após a execução de rigorosos testes de laboratório. Destacamos da nossa linha de fabricação os separadores.

- Eletrostáticos alta intensidade rolos e placas
- Eletromagnéticos alta intensidade rolo induzido
- Eletromagnéticos alta intensidade via úmida
- Magnéticos de tambor via úmida



Separador magnetico alta intensidade
Rolo induzido modelo MIH (13) 221-100



TBM - MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA.

Anel Rodoviário - Km 21
Bairro Universitário
Caixa Postal 2440
CEP 30000 - Belo Horizonte - MG
Tel.: (031) 442.3111
Telex: (031) 1402 TBME

Fernández Paris(6) afirma que os cálculos potenciais mais empregados são: 1.º — de Bogue com as correções devidas a Lea e Parker, que é tradicional na Química Cimenteira; 2.º — as expressões de Newkirk que introduzem os componentes menores, e 3.º — as composições mineralógicas potenciais de clinquerização e correção ("atualização") da Seção de Microscopia do Instituto Eduardo Torroja.

Parece ser prática comum, sem restrições explícitas nas normas técnicas brasileiras e estrangeiras, efetuar o cálculo potencial para as misturas clinquer mais gesso mais escória e, até mesmo, outras adições finais.

As proporções dos aluminatos e silicatos de cálcio é que permitem prever o desempenho do cimento adquirido por engenheiros para os seus projetos de construção. Caso a composição potencial esteja sendo calculada para a análise química de um cimento que contenha gesso e escória, seu desempenho não será o mesmo. Tal aspecto é controverso e polêmico pois existem desconfianças profissionais geradas pela falta de definição normalizada dos critérios dos cálculos potenciais. Tais controvérsias sugeriram a necessidade para os autores de elaborar dois algoritmos de cálculos para o programa de microcomputador que serão expostos adiante: um para a aplicação correta das fórmulas de composição potencial ao clinquer e outro para o caso do cimento resultante da adição de escória e gesso ao clinquer.

Battagin(10) assinala que as escórias siderúrgicas utilizadas na fabricação de cimento portland "constituem-se de vidros formados fundamentalmente de sílico-aluminatos de cálcio e, secundariamente, de sulfetos de cálcio e manganês e

óxidos de ferro emanganeis." Abordando a questão da influência da adição de escória ao clinquer sobre a resistência à compressão, aquele pesquisador revela que os efeitos são benéficos, através da tabela que reproduzimos a seguir (Tabela III). Battagin enfatiza que "o grau de vitrificação está li-

gado diretamente à hidraulicidade, conseqüência das condições de resfriamento na saída do alto-forno siderúrgico. As escórias mais vítreas são as mais hidráulicas, em vista da fase vítrea corresponder a um estado amorfo, estruturalmente desarranjado e termodinamicamente instável".

Os algoritmos

Admitindo-se o sistema "C-S-A-F" normal para A/F > 0,64 e partindo-se da composição potencial escolhida e do fator de saturação da cal conveniente, determina-se a composição química teórica parcial do cimento, no caso do uso das fórmulas de Bogue.

Tabela III — Resistência à compressão relativa de cimentos experimentais com diferentes teores de escórias ácidas e básicas (10)

Origem da	Natureza da	Índice de Hidraulicidade		Resistência à compressão relativa (%) aos 28 dias com diferentes teores de escória				
		ABNT	DIN	0	15	30	45	60
Cossisa, MG	Ácida	0,73	1,04	100	105	111	88	92
Interlagos, MG	Ácida	0,83	1,29	100	109	115	111	94
Belgo-Mineira, MG	Ácida	0,84	1,47	100	102	111	97	82
CSN, RJ	Básica	1,16	1,74	100	117	122	132	124
Cosipa, SP	Básica	1,31	1,82	100	111	114	120	114

Para sondagem geológica, consulte a Geosol.



- sondagem rotativa convencional
- sondagem rotary e roto-pneumática
- sondagem de testemunhagem contínua-circulação reversa
- perfilagem geofísica dos furos de sonda

São mais de 30 anos trabalhando para o setor, com mais de um milhão de metros perfurados em todo o Brasil.



GEOSOL - Geologia e Sondagens Ltda.

Rua Aimorés, 200 - Fone: (031) 221-5566 - Telex: (031) 1786 - Belo Horizonte - MG.

O cálculo da composição química teórica do clínquer baseia-se nas seguintes premissas:

- o cimento é uma mistura de sólidos; é a soma de clínquer mais gesso mais escória no caso do portland comum.
- podemos considerar as seguintes representações matemáticas:

A farinha é um somatório de óxidos inorgânicos e outras substâncias naturais e artificiais, que pode ser representada por:

$$F_{far} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \text{ (XII)}$$

$$F_{far} = m \sum \text{CaO} + n \sum \text{SiO}_2 + p \sum \text{Al}_2\text{O}_3 + q \sum \text{Fe}_2\text{O}_3 + \sum \text{P.F.} + s \text{ R} \text{ (XIII)}$$

$$\text{clínquer: } F_{cl} = f_{cl}(\text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{P.F.}, \text{R}_{cl}) \text{ (I)}$$

$$\text{gesso: } F_g = f_g(\text{CaO}, \text{SO}_3, \text{P.F.}, \text{R}_g) \text{ (II)}$$

$$\text{escória: } F_e = f_e(\text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{P.F.}, \text{R}_e) \text{ (III)}$$

$$F_{cim} = F_{cl} + F_g + F_e \text{ (IV)}$$

- o cimento é um somatório de óxidos inorgânicos e outras substâncias:

$$F_{cim} = a \sum \text{CaO} + b \sum \text{SiO}_2 + c \sum \text{Al}_2\text{O}_3 + d \sum \text{Fe}_2\text{O}_3 + e \sum \text{P.F.} + f \sum \text{R.} \text{ (V)}$$

- a relação entre os óxidos do cimento e os correspondentes do clínquer, escória e gesso é dada por:

$$\begin{aligned} (\text{óxido})_{cim} &= t_{cl}(\text{óxido})_{cl} + t_e(\text{óxido})_e + t_g(\text{óxido})_g \text{ (VI)} \end{aligned}$$

O cálculo da composição química teórica da farinha envolve a estimativa inicial da sua perda ao fogo e o emprego da seguinte relação:

$$(\text{óxido})_{far} = (\text{óxido})_{cl} \cdot (100 - (\text{P.F.})_{far}) / 100 \text{ (VII)}$$

O cálculo das proporções aceitáveis das matérias-primas foi elaborado por Zakon e Fernandes (11) e envolve a comparação dos valores teóricos obtidos pela relação acima com os dados da mistura de matérias-primas.

Pelas análises químicas das matérias-primas reais:

As proporções das matérias-primas são calculadas com o auxílio dos seguintes módulos cimenteiros:

$$\text{Módulo sílica: } MS = \frac{\sum \text{SiO}_2}{(\sum \text{Al}_2\text{O}_3 + \sum \text{Fe}_2\text{O}_3)} \text{ (XIV)}$$

$$\text{módulo alumina: } MA = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\sum \text{Fe}_2\text{O}_3} \text{ (XV)}$$

$$\text{fator de saturação da cal: } FSC = \frac{\sum \text{CaO}}{(2,8 \sum \text{SiO}_2 + 1,18 \sum \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \sum \text{Fe}_2\text{O}_3)} \text{ (XVI)}$$

Os silicatos e aluminatos de cálcio da composição potencial são calculados pelas seguintes fórmulas de Bogue:

$$C_3S = 4,071 \sum \text{CaO} - (7,6024 \sum \text{SiO}_2 + 6,7187 \sum \text{Al}_2\text{O}_3 + 1,4297 \sum \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2,85 \sum \text{SO}_3) \text{ (XVII)}$$

$$C_2S = 2,8675 \sum \text{SiO}_2 - 0,7544 C_3S \text{ (XVIII)}$$

$$C_3A = 2,6504 \sum \text{Al}_2\text{O}_3 - 1,692 \sum \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (XIX)}$$

$$C_4AF = 3,0432 \sum \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ (XX)}$$

Os algoritmos para o cálculo de cimento considerando produto final sem e com escória podem ser visualizados na Figura 2.

$$\text{calcário: } F_1 = f_1(\text{CaO}, \text{P.F.}, \text{R}_1) \text{ (VIII)}$$

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

$$\text{óxido de ferro: } F_3 = f_3(\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{R}_3) \text{ (X)}$$

$$\text{cinzas de carvão: } F_4 = f_4(\text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{K}_2\text{O}, \text{R}_4) \text{ (XI)}$$

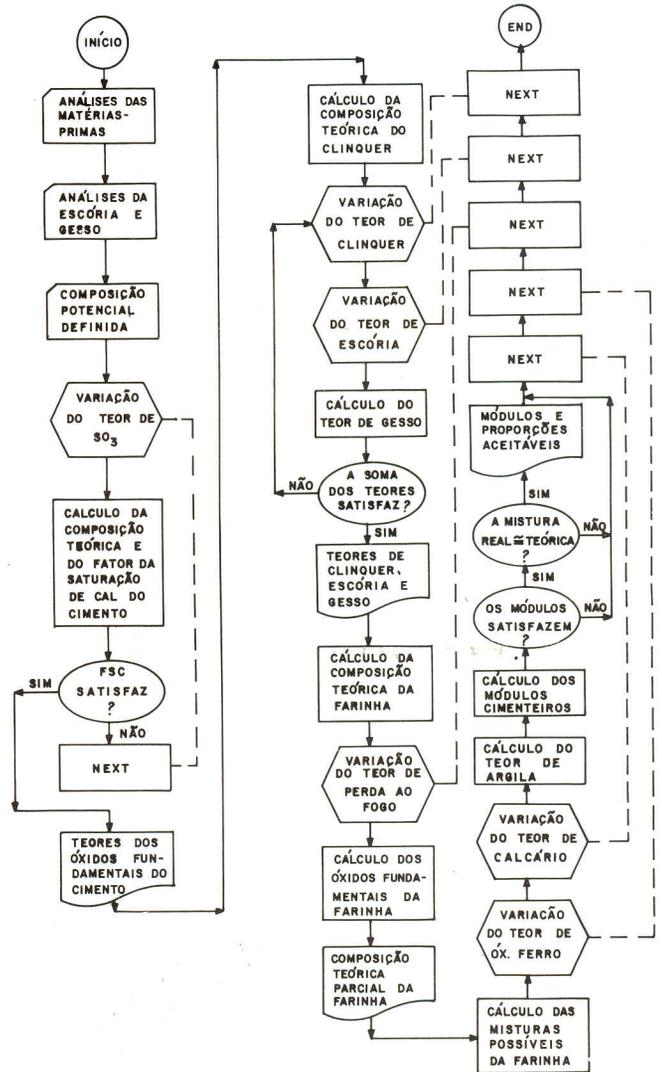


Figura 2 — Algoritmo para cálculo de cimento portland comum para composição potencial e fator de saturação da cal definidos, considerando farinha sem carvão

Tabela IV — Nomenclatura adotada para os principais compostos

CaCO ₃	= carbonato de cálcio ou calcário calcítico	
SiO ₂	= óxido de silício ou sílica	
Al ₂ O ₃	= óxido de alumínio ou alumina	
Fe ₂ O ₃	= óxido de ferro	
K ₂ O	= óxido de potássio	
Na ₂ O	= óxido de sódio	
MgO	= óxido de magnésio	
CaSO ₄	= sulfato de cálcio	
P.F.	= perda ao fogo	
R	= substâncias restantes	
C ₃ S	= 3CaO.SiO ₂ = silicato tricálcico	(*)
C ₂ S	= 2CaO.SiO ₂ = silicato dicálcico	(*)
C ₃ A	= 3CaO.Al ₂ O ₃ = aluminato tricálcico	(*)
C ₄ AF	= 4CaO.Al ₂ O ₃ = ferroaluminatotetracálcico	(*)
t	= teor do material considerado	
(*) notação simplificada adotada pelos químicos do cimento.		

Ambos os algoritmos conduzem a listagens de resultados semelhantes indicando os teores de clínquer, escória e gesso considerados no cimento desejável, os teores de sílica, alumina, óxido de ferro e cal presentes na farinha e os módulos cimenteiros e proporções aceitáveis das matérias-primas. Um exemplo dos resultados pode ser visto na *Figura 3*. O programa para ambos os casos é o mesmo e qualquer programador pode suprimir ou adicionar equações no algoritmo. Quando consideramos o teor de escória nulo, o tempo de processamento num microcomputador "Itautec" da Série I-7000 é da ordem de 3 a 5 minutos e no caso de adição de escória a duração é de 10 minutos aproximadamente, dependendo dos incrementos entre os teores dos materiais envolvidos. As vantagens são indiscutíveis, pois os cálculos manuais ocupam cerca de 60 minutos e cada listagem corresponde a uma "memória de cálculos", que pode ser duplicada simultânea ou seguidamente.

É possível imprimir os dados de análises químicas das matérias-primas e das adições finais, bem como os valores intermediários, de acordo com as necessidades de cada setor da indústria de cimento.

Conclusões

O programa de microcomputador desenvolvido é versátil e poderoso, pois permite calcular as composições das farinhas capazes de fornecer clínqueres e cimentos com desempenhos previsíveis, bem como incluir as fórmulas de custos adotadas na empresa. Também permite abranger novas matérias-primas e adições finais ou por substituição ou acréscimo, além de possibilitar a substituição das fórmulas de Bogue por outras mais realistas e adotar os valores estequiométricos típicos (nas diversas equações) de cada forno. Tal programa pode servir aos engenheiros e químicos de produção e controle da qualidade de uma fábrica de cimento, bem como fornecer informações úteis para sele-

ção de cimentos usados em dosagens de concretos.

Agradecimentos

Professor Pérsio de Souza Santos (DEQ-EP-USP), engenheiro Volney do Nascimento Ribeiro (Cimento Irajá S.A.), professor Bernardo José Guimarães Mascarenhas (DPI-EQ-UFRJ), professor Sérgio Rodrigues (DEQ-EP-USP), professor Benjamin Valdman (EQ-UFRJ), professor Belkis Valdman (DEQ-EQ-UFRJ), professora Cláudia de Moraes Jardim Averianow (DEQ-EQ-UFRJ), Sr. Cícero Barbosa (Cimento Irajá S.A.), Sra. Lúcia Bruno (NCE-UFRJ), Sr. Sérgio de Souza Pralton (NCE-UFRJ), Sr. Paulo Roberto Santos Costa (NCE-UFRJ), químico João Carlos Marques (ATC-DEC-IPT SP S.A.), química Maria Cecília Florindo (ATC-DEC-IPT SP S.A.), química Evelyn Y.L. Vaidergorin (AACs-DE-IPT SP S.A.) e geólogo Arnaldo Forti Battagin (DEFIQ-ABCP).

Referências Bibliográficas

1. DANA, J.D., *Manual de Mineralogia, Livros Técnicos e Científicos* Editora, Rio de Janeiro, 1981.
2. VENUT, M. e PAPADAKIS, M., *Control y ensayo de cementos, morteros y hormigones*, Ediciones Urmo, Bilbao, 1966.
3. BOGUE, R.R., *The Chemistry of Portland Cement*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1947.
4. SOUZA SANTOS, P. de, *Tecnologia de Argilas, Vol. 1, Fundamentos* Editoras Edgard Blucher Ltda. e Universidade de São Paulo, SP, 1975.
5. NEVILLE, A.M., *Propriedades do Concreto*, Pini, São Paulo, 1982.
6. FERNÁNDEZ PARIS, J.M., *Microscopia del clínker de cemento portland*,
7. DEPARTAMENTO DE FÍSICO-QUÍMICA — ABCP, *Curso de Microscopia de Clínquer de Cimento Portland*, Associação Brasileira de Cimento Portland, SP, 1984.
8. CALLEJA CARRETE, D.J., *La composición Potencial de Los Aglomerantes Hidráulicos*, Instituto del Cemento Portland Argentino, nº 59, R6, Buenos Aires, 1971.
9. PRISZKULNIK, S. *Estudo Tecnológico dos Cimentos Portland Brasileiros*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1977.
10. BATTAGIN, A.F., *Características das escórias siderúrgicas utilizadas na fabricação de cimento portland*, *Cerâmica*, 29 (162): 141-145, junho, 1983.
11. ZAKON, A. e FERNANDES, R.P., *Cálculo de farinhas para clínquer portland comum usando microcomputadores*, 29.º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Criciúma, SC, 1985.

Abraham Zakon é do Departamento de Processos Inorgânicos, Escola de Química, Centro de Tecnologia, da UFRJ; e Rakami Pedro Fernandes: Av. Meriti, 361/202 — 21220, Vila Kosmos, Rio, RJ. Este trabalho foi apresentado no 30.º Congresso Brasileiro de Cerâmica, realizado em abril deste ano, no Rio de Janeiro.