



**UTILIZAÇÃO DE COMPUTADOR NO CALCULO DE CARGAS E
OTIMIZAÇÃO DO CUSTO EM FORNO DE CUBA DE
REDUÇÃO DE CHUMBO**

*RICARDO PEDRO DE ANTUNES BUENO
ISAO NISHIOKA
THARCISIO DAMY DE SOUZA SANTOS*

PUBLICAÇÃO IEA N.º 227
Dezembro — 1970

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SÃO PAULO — BRASIL

UTILIZAÇÃO DE COMPUTADOR NO CÁLCULO DE CARGAS E OTIMIZAÇÃO
DO CUSTO EM FORNO DE CUBA DE REDUÇÃO DE CHUMBO*

Ricardo Pedro de Antunes Bueno
Isão Nishioka
Tharcísio Damy de Souza Santos

Divisão de Metalurgia Nuclear
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil

Publicação IEA Nº 227

Dezembro - 1970

* Separata de "METALURGIA - REVISTA DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS", vol. 26, nº 149, Abril, p. 271-277, 1970.

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Presidente: Prof.Dr. Hervásio Guimarães de Carvalho

Universidade de São Paulo

Reitor: Prof.Dr. Miguel Reale

Instituto de Energia Atômica

Diretor: Prof.Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

Conselho Técnico-Científico do IEA

Prof.Dr. José Moura Gonçalves	}	pela USP		
Prof.Dr. José Augusto Martins				
Prof.Dr. Rui Ribeiro Franco			}	pela CNEN
Prof.Dr. Theodoro H.I. de Arruda Souto				

Divisões Didático-Científicas

Divisão de Física Nuclear -
Chefe: Prof.Dr. José Goldenberg

Divisão de Radioquímica -
Chefe: Prof.Dr. Fausto Walter de Lima

Divisão de Radiobiologia -
Chefe: Prof.Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

Divisão de Metalurgia Nuclear -
Chefe: Prof.Dr. Tharcísio D.S. Santos

Divisão de Engenharia Química -
Chefe: Lic. Alcídio Abrão

Divisão de Engenharia Nuclear -
Chefe: Engº Pedro Bento de Camargo

Divisão de Operação e Manutenção de Reatores -
Chefe; Engº Azor Camargo Penteado Filho

Divisão de Física de Reatores -
Chefe: Prof.Dr. Paulo Saraiva de Toledo

Divisão de Ensino e Formação -
Chefe: Prof.Dr. Rui Ribeiro Franco

Divisão de Física do Estado Sólido -
Chefe: Prof.Dr. Shiguo Watanabe

UTILIZAÇÃO DE COMPUTADOR NO CÁLCULO DE CARGAS E OTIMIZAÇÃO DO CUSTO EM FORNO DE CUBA DE REDUÇÃO DE CHUMBO ⁽¹⁾

RICARDO PEDRO DE ANTUNES BUENO ⁽²⁾

ISÁO NISHIOKA ⁽²⁾

THARCISIO D. DE SOUZA SANTOS ⁽³⁾

R E S U M O

Foi feito um programa para o cálculo geral de cargas de fornos de cuba de redução de chumbo, baseado em desenvolvimentos anteriores de cálculo, e para otimização de custos da carga, em função das variáveis do processo. A programação feita reproduz com exatidão o modelo de cálculo de cargas, mas o modelo utilizado no cálculo de custo da carga constitui apenas uma primeira aproximação.

Com este trabalho, procuraram os autores demonstrar a grande utilidade de emprêgo de computador na otimização das variáveis do processo de redução. O modelo poderá, com as devidas adaptações, vir a ser empregado em outros processos, seja no caso de sistemas semelhantes para outros metais, seja para outros casos que aparentemente, apresentem poucos pontos em comum com o caso em apreço. Da mesma forma, e com pequenas modificações, o modelo desenvolvido pode ser utilizado em casos onde outros critérios de otimização sejam necessários.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais característicos modernos da metalurgia extrativa, visando maior racionalização nas operações, aumento de produtividade e melhor controle das variáveis que contribuem para a formação dos custos de produção, reside no emprêgo generalizado de computadores. Muitos dos problemas defrontados pela metalurgia extrativa englobam grande número de variáveis, tornando extremamente laborioso, quando não inexequível do ponto de vista prático, os cálculos em jôgo.

Entre outros problemas de natureza análoga, a solução geral do cálculo de cargas para fornos de cuba de redução de cargas de chumbo, e em que se considerem devidamente todos os fatores de operação, constitui um dos problemas para se tentar a utilização dos computadores.

Naturalmente o problema escolhido deve ser considerado como um exemplo, podendo ser generalizado, ou adaptado, a muitos outros problemas metalúrgicos de natureza análoga (entre outros, podem-se lembrar problemas de cálculos de carga para fornos de cuba de produção de cobre preto; para mattes de cobre e de cobre-níquel; para fornos de cuba de produção de estanho; para

fornos de revérbero de redução de cargas de outros metais, etc.).

O emprêgo dos computadores permite, de resto, resolver de forma prática, e simultaneamente com o problema geral de cálculo de carga, o problema de otimização de soluções possíveis, visando qualquer um dos objetivos que se possa ter na condução de uma operação metalúrgica, como a de mínimo custo, ou máxima produtividade, ou maior valor gerado (por exemplo para o caso em que os fundentes tragam valores sensíveis de metais preciosos, a serem aproveitados nos processos posteriores de refino).

Com esta contribuição, procuraram os autores demonstrar a possibilidade de uso de computador em metalurgia extrativa e, em particular, para a solução do problema de cálculo otimizado de cargas de fornos de cuba de redução de sinters de chumbo.

O modelo empregado é, essencialmente, o mesmo já utilizado por um dos autores ^(1, 2) no exame da solução geral analítica do problema. No que se refere entretanto à parte referente ao cálculo dos custos, para ulterior otimização, pode a solução proposta pelos autores ser considerada como uma primeira aproximação, e como tal, sujeita a aperfeiçoamentos posteriores. Em particular, os dados utilizados para os cálculos de custo, foram dados escolhidos arbitrariamente e não se referem a nenhuma usina em particular. É entretanto evidente que essas hipóteses introduzidas não diminuem a validade do programa como método geral, e, com pequenas modificações, decorrentes de dados levantados em usina, permitirão a organização de modelos mais aperfeiçoados.

Outro aspecto também importante da solução estudada pelos autores reside no seu valor

(1) Contribuição Técnica n.º 863. Apresentada ao XXIV Congresso Anual da ABM; São Paulo SP; julho 1969.

(2) Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista; Divisão de Metalurgia Nuclear; Instituto de Energia Atômica; São Paulo SP.

(3) Membro da ABM; Professor Catedrático e Chefe do Departamento de Engenharia Metalúrgica; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; Chefe da Divisão de Metalurgia Nuclear; Instituto de Energia Atômica; São Paulo SP.

como meio de simulação, prestando-se assim não somente a objetivos didáticos como a estudos comparativos de diversas soluções que devam ser comparadas do ponto de vista metalúrgico.

No caso particular de uma determinada usina metalúrgica, programa semelhante ao desenvolvido pelos autores poderia ser utilizado como parte de um sistema que envolveria todos os processos da usina. Nessas condições, pode mesmo ser estendido às etapas, do processo, posteriores à de redução, para englobar as fases de refino.

2. O PROBLEMA GERAL DO CÁLCULO DE CARGAS

O problema geral de cálculo de carga para operação de forno de cuba de redução de chumbo, consiste essencialmente, em, partindo-se de um sinter de composição conhecida, adicionarem-se os fundentes necessários para que se obtenha a escória com a composição desejada e dentro de determinados valores da relação entre a massa de escória e a massa de metal bruto a ser produzido; como evidente, a cinza do redutor participa também da massa e da constituição da escória. Quanto à escolha da escória, deve ela ser feita em determinadas propriedades⁽³⁾ e em particular, no conhecimento de sua fluidez às temperaturas de trabalho⁽⁴⁾. Conforme mostrou um dos autores⁽⁴⁾, através do conhecimento do traçado das linhas iso-fluidas nos planos isotérmicos de maior interesse prático para a operação dos fornos de cuba de redução (1050, 1100, 1150 e 1200°C), é possível se escolher escória cujo comportamento na operação do forno corresponda a todos os objetivos metalúrgicos visados. Convém ressaltar aqui que os dados experimentais obtidos⁽⁴⁾, se aplicam de forma rigorosa apenas às escórias de chumbo que foram estudadas. Para outras escórias, e cujos característicos sejam diferentes, naturalmente terão de ser previamente conhecidas as curvas de fluidez em função da temperatura, e, em caso de maior número de dados, os traçados das iso-fluidas correspondentes em determinados planos isotérmicos.

O modelo a ser seguido neste trabalho adota simbologia diversa da utilizada anteriormente^(1, 2), e que passa a ser descrita:

Seja E a escória que se deseja obter, e sejam E₁, E₂, E₃ e E₄, respectivamente, as frações de massa de CaO, FeO, SiO₂ e RO contidos (chamando-se RO a soma dos conteúdos dos demais óxidos considerados constituintes acessórios da escória). A carga será composta de:

- 1) Sinter S, com composição S₁, S₂, S₃ e S₄, respectivamente de CaO, FeO, SiO₂ e RO;
- 2) Carvão redutor K, com fração de cinza V, em massa, e composições K₁, K₂, K₃ e K₄, dos quatro constituintes, como acima;

- 3) Fundentes A, B, C, ... com composições A₁, A₂, A₃, A₄, B₁, B₂, B₃, B₄, C₁, C₂, C₃, C₄, ... obedecendo à mesma seqüência e correspondendo os índices aos constituintes CaO, FeO, SiO₂ e RO, como acima.

Sejam M_E, M_S, M_K, M_A, M_B, M_C ... as massas desses componentes na carga. Supondo, como no modelo adotado, que a totalidade das massas em jogo de CaO, FeO, CaO e RO passem a constituir a escória, podem ser escritas as seguintes identidades de massas:

$$M_E E_1 = M_S S_1 + M_K V K_1 + M_A A_1 + M_B B_1 + M_C C_1 + \dots \quad (1)$$

$$M_E E_2 = M_S S_2 + M_K V K_2 + M_A A_2 + M_B B_2 + M_C C_2 + \dots \quad (2)$$

$$M_E E_3 = M_S S_3 + M_K V K_3 + M_A A_3 + M_B B_3 + M_C C_3 + \dots \quad (3)$$

$$M_E E_4 = M_S S_4 + M_K V K_4 + M_A A_4 + M_B B_4 + M_C C_4 + \dots \quad (4)$$

Conhecem-se, desses termos, as composições dos elementos da carga e da escória; como, porém, o RO da escória não tem influência nas propriedades (nas condições definidas anteriormente, e de forma rigorosa, em cada caso particular), pode-se considerar E₄ não especificado, ou seja uma incógnita. Considera-se conhecida também a massa do redutor, que será uma fração U da soma das massas dos outros componentes da carga:

$$M_K = U (M_S + M_A + M_B + M_C + \dots) \quad (5)$$

As equações (1) a (4) tomam a forma indicada a seguir, quando se considera a expressão (5):

$$M_E E_1 = M_S (S_1 + U V K_1) + M_A (A_1 + U V K_1) + M_B (B_1 + U V K_1) + M_C (C_1 + U V K_1) + \dots \quad (6)$$

$$M_E E_2 = M_S (S_2 + U V K_2) + M_A (A_2 + U V K_2) + M_B (B_2 + U V K_2) + M_C (C_2 + U V K_2) + \dots \quad (7)$$

$$M_E E_3 = M_S (S_3 + U V K_3) + M_A (A_3 + U V K_3) + M_B (B_3 + U V K_3) + M_C (C_3 + U V K_3) + \dots \quad (8)$$

$$M_E E_4 = M_S (S_4 + U V K_4) + M_A (A_4 + U V K_4) + M_B (B_4 + U V K_4) + M_C (C_4 + U V K_4) + \dots \quad (9)$$

Tem-se assim um sistema de equações (6), (7), (8), (9) cujas incógnitas são M_E , E_4 , M_S , M_A , M_B , M_C

A última equação introduz mais uma incógnita, E_4 , e portanto não traz nenhuma contribuição ao sistema. Pode-se assim retirar a equação (9) do sistema para resolvê-la depois.

Fazendo-se $UV = W$ para simplificar, resulta finalmente o seguinte sistema de equações:

$$M_E E_1 = M_S (S_1 + WK_1) + M_A (A_1 + WK_1) + M_B (B_1 + WK_1) + M_C (C_1 + WK_1) + \dots \quad (10)$$

$$M_E E_2 = M_S (S_2 + WK_2) + M_A (A_2 + WK_2) + M_B (B_2 + WK_2) + M_C (C_2 + WK_2) + \dots \quad (11)$$

$$M_E E_3 = M_S (S_3 + WK_3) + M_A (A_3 + WK_3) + M_B (B_3 + WK_3) + M_C (C_3 + WK_3) + \dots \quad (12)$$

Conseguiu-se assim um sistema de equações relacionando-se as massas e composições da carga e da escória.

Pode ser feita a seguinte discussão: O número de equações é três, e assim cabem as seguintes hipóteses:

- se o número de incógnitas for menor do que três, o sistema não terá possibilidade de ser resolvido;
- se o número de incógnitas for igual a três, o sistema terá uma única solução; se todas as massas forem positivas, existe uma solução possível do ponto de vista metalúrgico; e
- se o número de incógnitas for superior a três, o sistema é indeterminado, no sentido de que terá mais de uma solução.

As incógnitas do sistema são M_E , M_S , M_A , M_B , M_C, e portanto, para ser possível uma solução, ter-se-á de dar valores a N-3 dessas incógnitas, sendo N o número de incógnitas. Poder-se-ia então pesquisar todo o campo, variando as incógnitas e os valores dados às outras massas; isso representaria entretanto um trabalho intenso e tal seja o número de fundentes a serem considerados, totalmente inconclusivo, a menos que se tenha algum outro objetivo a atingir.

Como no caso há o interesse de se minimizar os custos, podem-se impôr algumas restrições de ordem técnica e econômica, e procurar um método para se atingir esse objetivo. Isso é que será feito a seguir.

3. OTIMIZAÇÃO DO CUSTO DA CARGA DO FORNO

Fixando agora como objetivo a minimização do custo da carga, e supondo os preços dos di-

versos componentes da carga independentes da quantidade, isto é, da massa adquirida ou fabricada, o raciocínio poderá ser melhor acompanhado pela visualização da situação da representação no diagrama ternário (fig. 1).

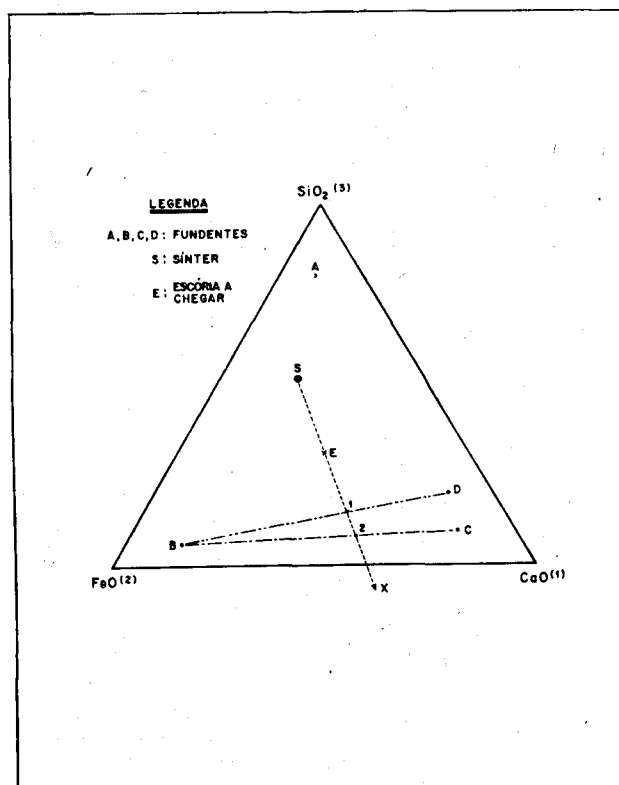


Fig. 1 — Diagrama ternário e componentes da carga.

Tomando-se a massa de sinter igual a 100 kg como base de cálculo, haverá cinco incógnitas no sistema de equações (10), (11), (12) : M_E , M_A , M_B , M_C e M_D .

Experimentando agora a resolução com apenas dois fundentes e zerando os outros, de todas as combinações possíveis, apenas duas se mostrarão aplicáveis na prática, todas as massas maiores que zero, as combinações com os fundentes B e D e as com B e C.

Voltando à visualização, nota-se que só terão massas maiores que zero as resoluções em que o segmento que une os dois fundentes, no caso \overline{BD} e \overline{BC} intercepta o semi-eixo \overline{EX} .

Assim, podem ser feitas as seguintes observações:

- caso um fundente não possibilite nenhuma solução, com um dos dois fundentes incógnitas, como no caso do fundente A em relação aos fundentes B e C — se for colocada uma certa quantidade dele, a massa dos outros dois aumenta; para provar isso, basta notar que é necessária ainda a mesma massa dos dois fundentes para transformar a escória do sinter na escória que se deseja e *mais* uma certa quantidade, para transformar o fundente extra na massa da mesma escória; neste caso, o custo com o fun-

dente extra é *sempre* maior do que o sem o mesmo, pois o preço é função linear da quantidade.

2) caso, por exemplo, os dois fundentes, sejam B e C e se coloca, a priori, uma certa massa de D, que tem uma solução possível com uma das duas incógnitas (B e D), pode-se ponderar o seguinte:

- usar os três fundentes é o mesmo que usar uma certa massa de um fundente 1 e outra de um fundente 2; como a proporção entre B e C é constante para fabricar o fundente 1, o preço por quilo deste fundente é constante, e, análogamente, para o fundente 2;
- o custo em fundente 1 para transformar a escória de 100 kg de sinter na escória que se deseja é também constante; análogamente para o fundente 2; uma mistura destes dois fundentes terá, então, um custo intermediário entre os dos dois para transformar a escória dos 100 kg de sinter;
- chega-se, assim, à conclusão que o custo menor será obtido pelo uso do fundente (1 ou 2) que tem o menor custo, e, portanto, ou B e C ou B e D, sendo nula a massa do outro fundente.

Extrapolando para um número qualquer M de fundentes, pode-se chegar à mesma conclusão e dizer que a solução de menor custo pode ser procurada entre todas as combinações possíveis de dois fundentes, anulando-se os M-2 outros.

Existe, entretanto, uma outra condição metalúrgica que modifica um pouco o problema: na operação do forno de cuba deve-se ter a relação entre massa de escória e massa de chumbo bruto (ou massa de chumbo bruto, mais matte, mais speiss, no caso geral em que co-existam estas fases líquidas imiscíveis), relação essa que será chamada θ , limitada entre dois valores, os quais serão chamados K_{\max} e K_{\min} .

Assim, as soluções para as quais θ é maior que K_{\max} não podem ser levadas em conta como solução metalúrgica; e as soluções que tiverem θ menor do que K_{\min} terão de incluir uma certa massa adicional de escória.

Para as soluções com θ menor do que K_{\min} , pode-se calcular a massa que falta, e, usando o sistema de equações com $M_S = 0$ e $M_E = 1$, procurar uma solução, agora com três fundentes.

Procurando entre todas as soluções possíveis, como se fez acima, encontram-se três fundentes que determinam a escória desejada e com o menor custo por quilo de escória. Pode-se, então, acrescentar à carga a massa necessária desses três fundentes para que θ seja maior ou igual a K_{\min} e menor ou igual a K_{\max} .

Como, entretanto, talvez haja necessidade de uma carga um tanto complexa, com até cinco fundentes — dois no cálculo inicial e três da escória de menor custo — achou-se conveniente fixar os dois primeiros fundentes e procurar, dentre os demais, aqueles que determinassem menor custo de escória dentro dessa limitação. Isso pode ser conveniente, pois pode diminuir custos das partes de compra e de armazenamento, assim como de carregamento propriamente dito. Fo-

ram, por isso, dadas as duas soluções, já que não há maneira de compará-las diretamente.

Finalmente, foram considerados mais os seguintes fatores que influem no custo da unidade de massa, quilo, de escória:

Relação θ — Esta relação tem influência direta na produtividade do forno, e foi admitido fator multiplicativo F_θ sobre o custo do quilo de banho devido a esse fator. Como não se dispõe de dados sobre a sua variação com o custo, será utilizada uma tabela de r' , em função de θ para esta correção; o valor utilizado será encontrado mediante interpolação linear. Como F_θ é sempre crescente com θ , far-se-á $\theta = K_{\min}$ ao acrescentar à carga, com θ menor do que K_{\min} , a massa complementar necessária, pois assim resulta a condição de menor custo.

Temperatura do forno — A temperatura do forno determinará a temperatura das fases líquidas, e em particular da escória. Quanto maior tiver de ser a temperatura atingida, maior o custo do quilo de banho. Para se considerar essa influência, empregou-se também um fator de correção multiplicativo F_T , e que se admitiu ser função crescente da temperatura.

Escória a ser obtida — Como a escória tem grande influência sobre a operação metalúrgica, inclusive sobre a duração do revestimento refratário do cadinho, empregou-se também um fator F_E , que no caso é aditivo, função da composição da escória.

Custos fixos — Finalmente, foi acrescentado ao custo este valor, que foi incorporado ao fator F_E .

Levadas em conta todas essas correções, tem-se o custo do quilo de banho como sendo:

$$\text{Custo} = (\text{custo do fundente} + F_E) F_T \cdot F_\theta.$$

Esse custo, assim conceituado, é que servirá de base para a otimização.

Feitas estas observações, pode-se passar à seqüência que levará à escolha da solução de menor custo:

I) parte-se de N fundentes, para um determinado sinter, carvão, escória e temperatura, e procura-se a solução de menor custo entre os fundentes;

II) mudando-se, então, para outras escórias que tenham características adequadas de fluidez⁽⁴⁾, repetem-se os cálculos do item anterior, mantendo-se constantes sinter, redutor e temperatura;

III) fazem-se variar, na seqüência, temperaturas, redutores e sinters, e, após feitas todas as combinações possíveis, pode-se considerar co-

mo ótima a solução de menor custo dentre tôdas estas.

4. ESQUEMATIZAÇÃO DO PROGRAMA E ALGUNS RESULTADOS OBTIDOS

Com base no que foi exposto, foi elaborado um programa em linguagem FORTRAN - II D, utilizando-se o computador IBM - 1620-II, do Instituto de Energia Atômica, que pode ser esquematizado, em linhas gerais, segundo o fluxograma da figura 2.

constituente	CaO %	FeO %	SiO ₂ %
sinter	1,12	9,63	20,00
cinza redutor	5,00	15,00	50,00
fundente n.º 3	6,00	10,00	74,00
fundente n.º 4	2,00	85,00	5,00
fundente n.º 8	85,00	5,00	5,00

- proporção de redutor na carga: 16,0%
- proporção de cinza no redutor: 4,0%
- escória desejada: 13,50% CaO, 49,50% FeO e 27,00% SiO₂ com θ mínimo de 2,2. Essa escória tem fluidez Herty adequada a 1.100°C.

O cálculo, que é feito em tempos da ordem de 5 segundos, forneceu, para 100 kg de sinter: 27,36 kg de redutor, 48,65 kg de fundente n.º 4, 14,07 kg de fundente n.º 8 e 7,31 kg de fundente n.º 3.

O valor de θ calculado é 2,2, isto é, já é adicionada a massa necessária de fundentes para que a relação θ fôsse a mínima.

O uso do computador permite, assim, grande velocidade de cálculo de cargas, e, se o modelo fôr perfeito, evita erros que podem onerar a produção.

b) Desprezando a influência de outros fatores no custo que não sejam os dos preços dos constituintes da carga, efetuou-se outro ensaio no computador: para o mesmo sinter e redutor do exemplo anterior, e podendo escolher entre dez fundentes de composições e de preços relativamente próximos uns dos outros; considerando-se 5 escórias tomadas com base no trabalho citado (4) com 30 cm de fluidez Herty a 1.100°C e 3 escórias escolhidas com o mesmo critério, mas para a temperatura de operação de 1.200°C, foi possível notar:

- 1) inicialmente, tomando uma das escórias a 1100°C e 3 fundentes ao acaso, chegou-se a um custo, com unidades arbitrárias, de 1,1311 para os fundentes e redutor;
- 2) otimizado o resultado, dentro da mesma escória e temperatura, para os fundentes como já foi explicado, chegou-se a um custo de 0,8337;
- 3) da mesma forma, otimizado o resultado entre os dez fundentes disponíveis e as cinco escórias a 1100°C, obteve-se um valor otimizado de custo de 0,6651; e
- 4) finalmente, dentre tôdas as possibilidades, tanto a 1100°C como a 1200°C (a escória devendo contudo apresentar a mesma fluidez de 30 cm Herty), foi encontrada uma carga que para escória a 1200°C, teve custo de 0,4904.

Esta procura somente é possível como o auxílio do computador, pois, mesmo usando o modelo, este valor seria praticamente impossível de ser obtido, em virtude do enorme volume de cálculos.

Obviamente, uma usina não escolhe ao acaso a sua carga, e nem tôdas as composições dos

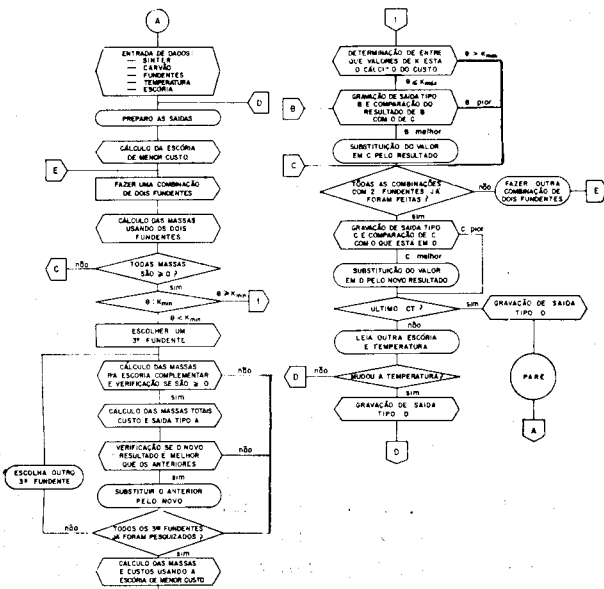


Fig. 2 — Esquema do fluxograma do programa.

Limitou-se o número de fundentes para máximo de dez, enquanto que é ilimitado o número de escórias, de sinters, de temperaturas e de redutores.

O programa já escolhe para os fundentes e escórias o melhor resultado, e sempre em duas alternativas; quanto à complementação das massas dos fundentes para que θ seja maior ou igual a K_{min} ; usando os fundentes que determinam a escória de menor custo, ou usando apenas o terceiro fundente, conforme explicado anteriormente.

A seguir apresentam-se alguns resultados de uma simulação realizada. É interessante, a esta altura, que sejam demonstradas algumas das possibilidades deste modelo colocado em forma de programa, embora poucas simulações tenham sido feitas e não tenha existido a preocupação de os dados utilizados corresponderem a condições de determinada usina.

a) Exemplificando com os seguintes componentes e condições de carga:

CALCULO E OTIMIZACAO DE CUSTOS DA CARGA

SINTER	2.00	CAO	10.00	FEO	20.00	SIO2	350.0000	NCR/T
CARVAO	10.00	NA CARGA	10.00	DE CINZAS	70.0000	NCR/T		
CINZAS	10.00	CAO	20.00	FEO	60.00	SIO2		
FUNDENTE 1	5.00	CAO	5.00	FEO	80.00	SIO2	70.0000	NCR/T
FUNDENTE 2	5.00	CAO	80.00	FEO	5.00	SIO2	70.0000	NCR/T
FUNDENTE 3	80.00	CAO	5.00	FEO	5.00	SIO2	70.0000	NCR/T
FUNDENTE 4	85.00	CAO	8.00	FEO	.50	SIO2	75.0000	NCR/T

PESO DA CAMADA DE SINTER 1000.00 KG

CORRECOES

K(1)= 2.200 CUSTO = CUSTO* 1.0000

K(2)= 8.000 CUSTO = CUSTO* 1.8000

SAIDAS C,D

TEMPERATURA DO FORNO 1200 FATOR DE CORRECAO DEVIDO A TEMPERATURA 1.000

ESCORIA A CHEGAR 29.70 CAO, 27.00 FEO 33.30 SIO2

CORRECAO DE CUSTO 1.0000 NCR/T DE ESCORIA VISCOSIDADE ESPERADA 30.0 HERTY

MELHORES RESULTADOS PARA A TEMPERATURA

MELHOR RESULTADO SEM ESCORIA MAIS BARATA

SINTER	CARVAO	FUNDENTE 2	FUNDENTE 3	FUNDENTE 1 (EM KG)
100.00	17.28	24.97	20.00	27.90
1000.00	172.87	249.70	200.04	279.00

ESCORIA 18.90 CAO, 29.70 FEO, 41.40 SIO2 VISCOSIDADE ESPERADA 35.00 HERTY

TEMPERATURA DO FORNO 1200

RELAÇÃO MASSA ESC/ MASSA BANHO 2.200

CUSTO RELATIVO CALCULADO , 827.2265 NCR/T DE BANHO

MELHOR RESULTADO COM ESCORIA MAIS BARATA

SINTER	CARVAO	FUNDENTE 2	FUNDENTE 3	FUNDENTE 1	FUNDENTE 2	FUNDENTE 3 (EM KG)
100.00	17.28	5.86	9.22	27.90	19.10	10.77
1000.00	172.87	58.66	92.27	279.00	191.04	107.77

ESCORIA 18.90 CAO, 29.70 FEO, 41.40 SIO2 VISCOSIDADE ESPERADA 35.00 HERTY

TEMPERATURA DO FORNO 1200

RELAÇÃO MASSA ESC/ MASSA BANHO 2.200

CUSTO RELATIVO CALCULADO , 827.2265 NCR/T DE BANHO

Fig. 3

produtos de seus fornos, mas cabe notar aqui que estes fatores não são tão facilmente concluídos por intuição nem calculados para a otimização de custo com facilidade. De fato, essa dificuldade aumenta à medida que se introduzem no modelo outros fatores de custo, sejam fatores que não foram levados em conta no presente modelo, mas que nele estão incluídos, sejam outros, que resultarão do aprimoramento do exame e com a aplicação específica de cada caso particular.

Observa-se, assim, que o emprego de computador se torna imperioso para a otimização, tal como foi conceituada.

5. POSSIBILIDADES DE USO DO PROGRAMA

Além do uso do programa desenvolvido para a simulação com dados normais de operação que

ocorram em usinas de chumbo, pode ser aplicado a casos não usuais de dados, seja do sinter, do redutor, dos fundentes ou de escórias. Essa possibilidade é interessante, pois, embora com o custo do tempo de operação do computador, podem-se simular situações que não poderiam ser ensaiadas diretamente no forno, não só por não se dispôr de garantia de êxito como por se tornar necessário interromper a produção para a realização de tal experiência.

Caso a simulação feita mostre alguma possibilidade realmente interessante, então se poderá decidir a realizar o ensaio no forno, agora conhecendo-se as condições reais que cercarão a experiência.

Em virtude desses característicos, o programa desenvolvido poderá ter grande valor didático, pois permite facilmente visualizar situações que, de outra forma, seriam dificilmente analisáveis.

6. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO ADOTADO E POSSIBILIDADES DE DESENVOLVIMENTO

Quanto ao modelo de cálculo de carga, os resultados são naturalmente os mesmos que se obtêm dos trabalhos citados^(1, 2), e que foram tomados como base para êste desenvolvimento.

O modelo de cálculo de custo é apenas um exemplo; não pode ser tido como um modelo provado ou ensaiado, mas apenas uma primeira aproximação. É importante notar, entretanto, que a qualidade dos resultados dependerá totalmente dos dados adotados: se os dados não traduzirem a realidade, é evidente que os resultados obtidos não têm probabilidade de serem válidos.

Êste modelo de cálculo de custos, é, como qualquer outro modelo, essencialmente dinâmico. Noutras palavras: aproxima-se da realidade através de modificações sucessivas, mas nunca consegue traduzi-la de forma perfeita. Assim, depois de um certo número de simulações e comparações dêstes resultados com os obtidos em operação real, existirão condições para aperfeiçoar o modelo sucessivamente, em um processo iterativo.

O modelo que se apresenta no presente trabalho é apenas o primeiro passo para que o modelo traduza a realidade.

7. OUTRAS APLICAÇÕES DA IDÉIA GERAL DO MODELO

A mesma idéia que levou à elaboração dêste modelo, pode ser aplicada a outros casos. De forma mais imediata, pode o mesmo modelo vir a ser utilizado (e também com algumas alterações relativamente ligeiras) para a otimização de custos de operação em fornos de cuba de redução de cobre prêto, de mattes de cobre ou de redução de cassiterita.

Outra aplicação, que pode ser adaptada do modelo proposto, residirá no caso de fabricação de ligas, a partir de lotes de sucatas de composições diferentes, e de custos diferentes, principalmente no caso de sucatas de ligas à base de cobre, ou de alumínio.

Nota-se, assim, que um modelo pode ser modificado e aplicado a outros sistemas que guardem certas afinidades com o sistema estudado e para o qual foi desenvolvido. Êsse constitui um aspecto importante, pois pode-se aproveitar grande parte de um trabalho na aplicação a outro caso que possa ser considerado como semelhante.

8. CONCLUSÕES

1. Ficou demonstrada a utilidade da utilização de computador no cálculo de cargas e de

custo de produção, em forno de cuba para produção de chumbo.

2. O programa desenvolvido traduz o modelo de cálculo geral anteriormente estudado^(1, 2). Dado o grande volume de cálculos que o problema geral envolve, é imprescindível o uso do computador como meio de otimização dos custos.

3. O modelo adotado para cálculo de custos deve ser considerado como constituindo apenas uma primeira aproximação, e, como tal, suscetível de poder ser melhorado, para melhor refletir as condições de cada usina em particular.

4. O programa tal como feito tem aplicação em simulações, de interesse didático e industrial.

5. Com as devidas adaptações, o modelo poderá ser aplicado a outros casos que apresentem semelhança (em particular, redução de cargas para cobre prêto, para mattes de cobre e para estanho) e, ainda, a outros casos aparentemente mais diversificados, como a escolha de diversas sucatas que devam determinar ligas de composições definidas.

6. O modelo proposto, quando suficientemente aperfeiçoado, permitirá simulações de situações que dificilmente poderiam ser experimentadas no forno de cuba de redução; pode, assim, conduzir a resultados que justifiquem ensaios diretos de cargas em tais fornos.

7. O programa poderá vir a ser modificado para considerar outros tipos de otimização.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam o seu agradecimento aos colegas do Serviço de Cálculo Analógico e Digital do Instituto de Energia Atômica, pelo auxílio que prestaram no esclarecimento de dúvidas na programação, bem como pela colaboração recebida no desenvolvimento da utilização do computador nos ensaios e testes feitos.

BIBLIOGRAFIA

1. SOUZA SANTOS, T. D. — *Um método geral para cálculo das cargas de fornos de chumbo*. ABM — Bol. Ass. Bras. Met. v. 3, n.º 7, 303-318, 1947.
2. SOUZA SANTOS, T. D. — *Um método geral para cálculo das cargas de fornos de chumbo — II*. ABM — Bol. Ass. Bras. Met. v. 17, n.º 62, 119-130, 1961.
3. SOUZA SANTOS, T. D. — *Sobre a constituição das escórias dos fornos de redução de sinters de chumbo*. ABM — Bol. Ass. Bras. Met. v. 2, n.º 4, p. 1-23, 1946.
4. SOUZA SANTOS, T. D. — *Nota preliminar sobre a fluidez Herty das escórias de redução de chumbo*. ABM — Bol. Ass. Bras. Met. v. 9, n.º 31, p. 261-289, 1953.

A B S T R A C T

One computer program for general calculation of lead blast furnace burdens was developed, based upon previous work by one of the authors, aiming the optimization of costs and taking into account the variables of the process. The program established is a reproduction of the model of the burden calculations but the cost factors are considered only as a first approximation.

The authors have demonstrated in this paper the utility of using a computer for the optimization of the variables in the reduction process, carried out usually in a lead blast furnace. The same model can be used in other processes of similar nature, with the appropriate changes. At the same time, the developed model of computer calculation can be used in other cases when other criteria of optimization are necessary.

R E S U M É

On a développé un programme pour le calcul général des charges des fours à cuve pour la réduction du plomb, basé sur les développements d'une méthode générale de calcul par un des auteurs, et qui envisage l'optimisation des frais de la charge en fonction des variables de l'opération. La programmation faite reproduit avec exactitude le modèle de calcul analytique des charges, mais elle considère les coûts seulement dans une première approximation.

Avec ce travail, les auteurs ont cherché à démontrer la grande avantage de l'emploi d'un ordinateur dans l'optimisation des variables du processus de réduction. Avec les adaptations nécessaires, le modèle pourra être employé pour d'autres cas, soit dans le cas de systèmes similaires pour d'autres métaux, soit pour d'autres cas qui présentent des similitudes avec le cas envisagé. Avec de quelques modifications, le modèle développé pourra être utilisé aussi dans cas où d'autres critères d'optimisation seraient nécessaires.

R E S U M E N

Fue hecho un programa para el cálculo general de cargas de hornos de cuba de reducción de plomo, basado en desarrollos anteriores de cálculos, y para la optimización de costos de carga, en función de variables de proceso. La programación hecha reproduce con exactitud el modelo de cálculo de carga, pero el modelo utilizado en el cálculo de costo de la carga constituye solamente una primera aproximación.

Con este trabajo, procuraron los autores demostrar la gran utilidad del empleo del computador en la optimización de las variables del proceso de reducción. El modelo podrá, con las debidas adaptaciones, venir a ser empleado en otros procesos, ya sea en el caso de sistemas semejantes para otros metales, como para otros casos que aparentemente presenten pocos puntos en común con el caso en vista. De la misma forma, y con pequeñas modificaciones, el modelo proyectado puede ser utilizado en casos en donde otros criterios de optimización sean necesarios.