

BASES DE CÁLCULO E ESCOLHA DA CARGA NOS FORNOS SIEMENS-MARTIN BÁSICOS, PARA PRODUÇÃO DE AÇO COMUM — II (1)

Eng. Piotr Krynicki (2)

RESUMO

No presente trabalho, continuação de trabalho de igual título publicado no «Boletim da Associação Brasileira de Metais», vol. 6, n. 20, julho de 1950, o autor dá as condições das corridas normais do ponto de vista teórico, prático e econômico, bem como os cálculos das mesmas para as diversas relações de gusa e sucata. Faz o cálculo da quantidade total de O_2 por corrida, composição da escória normal e balanço dos materiais da carga e da corrida. Baseando-se nos cálculos feitos para as cargas normais, o autor compõe tabelas de valores característicos, alguns dos quais valem também para os cálculos das mesmas para a composição diferente da normal, e um diagrama do consumo, do minério de ferro. São dadas, também, fórmulas matemáticas para cálculo de cargas da composição diferente da normal e exemplo de cálculo na base das mesmas. É feito exemplo do cálculo simplificado para as cargas e são dadas as razões práticas do mesmo, na base dos valores da carga normal, do diagrama de consumo de minério de ferro e das fórmulas usadas. Também é considerada a questão da vantagem do uso de cal em lugar de calcáreo na operação dos fornos e a economia que esta prática permite efetuar.

I. CÁLCULOS DE CARGA DE COMPOSIÇÃO NORMAL NOS FORNOS BÁSICOS PARA PRODUÇÃO DE AÇO COMUM.

Conforme estabelecido em artigo anteriormente publicado pelo autor (1), foram feitas algumas correções e acertos nas análises químicas dos materiais e também nos cálculos da carga, a fim de ajustá-las às modalidades de trabalho dos fornos básicos no Brasil, que são diferentes dos fornos europeus, pelo baixo teor de S, de Al_2O_3 nos materiais auxiliares etc. Estes cálculos deram uma diferença de 0,3% no consumo do minério de ferro para as cargas normais, modificando-se também o coeficiente de utilização de minério de ferro. Estas

(1) Trabalho apresentado ao 7.º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais, C. T. n.º 175; Comissão A-1, Porto Alegre, 2 de julho de 1951.

(2) Membro ABM; Engenheiro da Companhia Aços Especiais Itabira; Acesita, M. G.

modificações têm grande importância para os cálculos teóricos, mas não exercem influência alguma sobre a prática do uso dos cálculos. Os cálculos detalhados de cargas de composição normal são necessários apenas como uma base para a confirmação da precisão dos cálculos simplificados de cargas, os quais são necessários para as condições atuais de trabalho dos fornos.

Para a carga normal usa-se gusa líquido e materiais auxiliares de composição normal, análises químicas dos quais foram apresentadas no artigo anterior, e são aqui usadas com correção de alguns lapsos.

TABELA 1

Componentes metálicos da carga normal para um aço da seguinte composição: C — 0,15 %; Mn — 0,45 %; P — 0,05 %; S — 0,05 %.

Componentes da carga	Composição química				
	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Gusa líquido	3,8	1,0	2,0	2,3	0,08
Sucata	0,2	0,1	0,45	0,05	0,05
Fe Mn	8,0	1,0	80,0	0,2	0,05
Aço desejado	0,15		0,45	0,05	0,05

O consumo de FeMn é de 0,5%, tomando em consideração que no refino em forno básico, a composição química e o estado físico (viscosidade) da escória durante toda a corrida devem favorecer a saturação mínima pelo FeO. O consumo de materiais básicos para as reparações de sola (dolomita) é de 4,0% para a carga de 100% de gusa líquido e diminui de 0,25% com uma diminuição de 10% de quantidade de gusa. Este consumo de dolomita foi estabelecido baseando-se nos dados de trabalhos de fornos básicos Siemens-Martin durante muito tempo. A quantidade de calcáreo é calculada para escorificar todos os ácidos com um excesso de 10%, porque entram no forno impurezas juntamente com calcáreo. Em consequência da pureza dos materiais auxiliares no Brasil é necessário acrescentar 0,5% de chamote para aumento da quantidade de escória. O Mg da sola serve para aumentar a basicidade e quantidade da escória e não é calculado para combinações químicas com os ácidos da mesma. O consumo de minério de ferro é escolhido na base dos dados de trabalhos de fornos básicos de todo o mundo e calculado em função do teor de Fe_2O_3 no mesmo. É levada em conta a influência da dissociação de CO_2 e H_2O com as altas temperaturas reinantes nos fornos.

TABELA 2

Materiais auxiliares da carga normal

Materiais auxiliares	Composição química						Voláteis	
	SiO ₂ 0/0	Al ₂ O ₃ 0/0	Fe ₂ O ₃ 0/0	CaO 0/0	MgO 0/0	P ₂ O ₅ 0/0	H ₂ O 0/0	CO ₂ 0/0
Minério de ferro Jacutinga	3,28		94,72			0,05		1,75
Calcáreo Vespasiano	2,55	0,73	0,67	53,62	0,36	0,15	0,102	42,12
Dolomita Congo Socco	1,08	0,95	3,99	29,37	19,28	0,04		45,29
Dolomita Calcinaada	1,98	1,74	7,32	53,90	35,42	0,07		
Pedaços de tijolos chamote	62,0	35,0	1,3	0,7	0,3			

O total de gusa e sucata constitui a carga metálica, as outras ligas e os materiais auxiliares são calculados como percentagens desta soma. O exemplo aqui calculado de carga normal tem 80,0% de gusa líquido, 20,0% de sucata e 0,5% de FeMn para a desoxidação.

Na tabela 3 as colunas n.º 1, 2, 3, 4, 5 e 6 dão a composição da carga e os componentes metálicos, o rendimento de aço na sola do forno, a eliminação de todos os elementos, excluindo o ferro. A coluna 7 dá o balanço de ferro na corrida. A quantidade de C, Si, Mn, P e S eliminada em 1005,0 kg da carga é igual a 56,497 kg. Na verdade a corrida dá o rendimento 101,0%, isto é: $1005,0 \cdot 1,01 = 1005,0 + 10,05$ kg mais, que o carregado no forno. Assim, a eliminação dos 56,497 kg da carga é coberta pela redução de ferro do minério e ainda tem-se o rendimento aumentado em 10,05 kg, também proveniente do minério de ferro. Esta soma é confirmada pela diferença da coluna 7.

Para 66,547 kg de Fe precisa-se de: $\frac{66,547 \cdot 160}{112} = 95,000$ kg de

Fe₂O₃.

O consumo de minério de ferro na carga é de 12,3%. Então, 123,6 kg de minério de ferro para a carga de 1000,0 kg dão $123 \cdot 0,947 = 116,300$ kg de Fe₂O₃. A percentagem de redução de minério de ferro

é igual a $\frac{95,000}{116,300} \cdot 100 = 81,7\%$. O excesso de Fe₂O₃ que é:

$116,300 - 95,000 = 21,300$ kg passa à escória e reconstitui-se em FeO

dando: $\frac{21,300}{160} \cdot 144 = 19,170$ kg do mesmo. Estes cálculos mos-

TABELA 3
Eliminação das misturas, rendimento e consumo de O₂
para carga normal

Componentes de carga (kg)	Quantidades dos elementos químicos					
	C kg	Si kg	Mn kg	P kg	S kg	Fe kg
Gusa líquido 800,0	30,400	8,000	16,000	2,400	0,640	742,560
Sucata 200,0	0,400	0,200	0,900	0,100	0,100	198,300
FeMn 5,0	0,400	0,050	4,000	0,010	0,002	0,538
Total 1005,0	31,200	8,250	20,000	2,510	0,742	941,398
Rendimento do aço 101,0 % : 1005,0.1,01 = = 1015,050/ Elementos eliminados	1,523		4,568	0,507	0,507	1007,945
	29,677	8,250	16,332	2,003	0,235	
			Σ 56,497			1007,945
						941,398
Quantidade adicionada posteriormente: 10,05			10,05	+ 56,497		66,547
Consumo de O ₂	29,677	8,250	16,332	2,003		
	<u>12</u> .16=	<u>28</u> .32=	<u>55</u> .16	<u>62</u> .80=		
	39,600	9,444	4,750	3,219		
			Σ 56,380			

TABELA 4

Óxidos dos materiais metálicos e auxiliares da carga

	SiO ₂ kg	MnO kg	P ₂ O ₅ kg	Al ₂ O ₃ kg	FeO kg	CaO kg	MgO kg	Alcalis kg	S kg
Carga	Si 8,250	Mn 16,332	P 2,003		19,170				0,235
	O ₂ 9,430	O ₂ 4,750	O ₂ 2,580						CaS 0,529
	17,680	21,082	4,583						CaO 0,410
Minério de ferro 123,0 kg	4,100		0,062						p/oxidação de Mn
Sola 35,0 kg	0,694		0,025	0,609	2,308	18,865	12,400		0,119
Abóbada e válvulas 2 kg	2,000								
Chamote	3,100			1,750	0,058	0,035	0,015	0,035	CaS
	27,574	21,082	4,670	2,359	21,536	18,900	12,415	0,035	0,529

tram que o minério de ferro introduz na carga: $116,300 - (66,547 + 19,170) = 30,583$ kg de O_2 . A quantidade de O_2 necessária para a corrida de acôrdo com a tabela 3 é de 56,380 kg ou 5,638% da carga metálica. O minério de ferro fornece, de acôrdo com o cálculo acima 30,583 kg de O_2 ou 54,2% e o ar dá $56,380 - 30,583 = 25,797$ kg ou 45,8% de todo total necessário. A tabela 4 mostra a quantidade de componentes metálicos e auxiliares da carga e os óxidos dos mesmos de acôrdo com as análises químicas. Estes óxidos formam a escória e determinam para cada carga a quantidade calculada de calcáreo.

Nos totais da tabela 4 tem-se os algarismos necessários para o cálculo de CaO que contribuirá para a formação da escória normal:

- 1) SiO_2 27,574 kg precisa de $27,574 \cdot 1,87 = 51,400$ kg de CaO e forma - :
 $27,574 + 51,400 = 78,974$ kg de $(CaO)_2 SiO_2$;
- 2) Al_2O_3 2,359 kg necessita de $2,359 \cdot 0,55 = 1,32$ kg de CaO e forma - :
 $2,359 + 1,32 = 3,679$ kg de $CaO \cdot Al_2O_3$;
- 3) P_2O_5 4,670 kg exige $4,670 \cdot 1,58 = 7,525$ kg de CaO e forma - :
 $4,670 + 7,525 = 12,195$ kg de $(CaO)_3 P_2O_5$.

O consumo total de CaO será igual a: $51,400 + 1,320 + 7,525 = 60,245$ kg.

18,900 kg de CaO ativo existem nos componentes da carga, assim precisa-se de $60,245 - 18,900 = 41,345$ kg de CaO. Um quilo de calcáreo da jazida de Vespasiano tem 0,4856 kg de CaO ativo (vide o cálculo na referência (1) e 1000,0 kg da carga normal precisarão de 41,345

$\frac{41,345}{0,4856} = 85,100$ kg de calcáreo com a composição química, acima mencionada. Por motivos anteriormente expostos, a quantidade de calcáreo deve ser aumentada em 10,0%; será: $85,100 \cdot 1,1 = 93,61$ kg.

Esta quantidade de calcáreo fornece para a formação de escória e para os gases de combustão as combinações, mostradas na tabela 5, que segue.

TABELA 5

Combinações químicas provenientes do calcáreo

Calcáreo Vespasiano kg	SiO_2 kg	Al_2O_3 kg	CaO kg	MgO kg	P_2O_5 kg	CO_2 kg	H_2O kg
93,16	2,387	0,684	50,160	0,336	0,141	39,819	0,083

Assim, para a formação da escória tem-se as seguintes quantidades:

SiO ₂	— 27,574 + 2,387 =	29,961 kg, ou 18,45 %
Al ₂ O ₃	— 2,359 + 0,684 =	2,962 kg, ou 1,80 %
P ₂ O ₅	— 4,670 + 0,141 =	4,811 kg, ou 2,92 %
CaO	— 18,900 + 50,160 =	69,060 kg, ou 42,33 %
CaS	— 0,529 =	0,529 kg, ou 0,30 %
MgO	— 12,415 + 0,336 =	12,751 kg, ou 7,80 %
MnO	— 21,082 =	21,082 kg, ou 12,90 %
FeO	— 21,536 + 0,557 =	22,093 kg, ou 13,50 %
		163,279 kg = 100,00 %

A escória será composta das seguintes combinações químicas:

(CaO) ₂ SiO ₂	= 78,974 + 6,850 =	85,824 kg, ou 52,5 %
CaO . Al ₂ O ₃	= 3,679 + 1,060 =	4,739 kg, ou 3,7 %
(CaO) ₄ P ₂ O ₅	= 12,195 + 0,263 =	12,458 kg, ou 7,6 %
CaS		0,529 kg, ou 0,3 %
CaO		2,831 kg, ou 1,7 %
MgO		12,751 kg, ou 7,8 %
MnO		21,082 kg, ou 12,9 %
FeO		22,093 kg, ou 13,5 %
		163,279 kg = 100,0 %

Assim, tem-se $\frac{163,279}{10} = 16,33\%$ da escória. Esta carga de 1000,0

kg, precisa de 56,380 kg de O₂ para a oxidação dos elementos.

(C — 29,677 . 1,33 = 39,600; Si — 8,250 . 1,142 = 9,444 kg;
Mn — 16,355 x 0,29 = 4,750 kg; P — 2,005 . 1,29 = 2,568 kg).

O minério de ferro fornece 30,583 kg de O₂, assim, a carga deve receber do ar 56,380 — 30,583 = 25,797 kg de O₂ ou 44,9%. São

necessários $\frac{116.300}{30,583} = 3,79$ kg de Fe₂O₃ para se obter 1,0 kg de O₂

para a oxidação dos elementos. A oxidação de CO (formado pela oxidação do C da carga) em CO₂ precisa ainda de 39,600 kg de O₂ do ar, isto é, o O₂ a ser fornecido pelo ar é igual a 39,600 + 25,797 =

$\frac{65,397 \cdot 100}{1005,0} = 6,49\%$. Assim, a fim de evitar erros

possíveis de cálculo é necessário fazer um balanço dos materiais desta carga normal. Esta operação é necessária de lado teórico e prático uma única vez e é dispensável para os cálculos práticos das cargas reais.

BALANÇO DE MATERIAIS DA CARGA E CORRIDA

ENTRADA (em kg)		SAIDA (em kg)	
Gusa líquido	800,00	Aço produzido	1015,050
Sucata	200,00	Escória	163,279
FeMn	5,00	CO ₂	148,696
Minério de ferro	123,00	H ₂ O	0,085
Calcáreo	93,61	Falta	0,400
Dolomita (da sola)	35,00		
Silico (da abóbada)	2,00		
Oxigênio do ar	64,90		
Pedaços de chamote	5,00		
	<hr/>		<hr/>
Total	1327,51	Total	1327,51

Consumo de minério = 12,3 %

Consumo do calcáreo = 9,36 %

Pedaços de chamote = 0,5 %

Quant. de escória = 16,33 %

O fator mais importante do cálculo das cargas é o O₂ necessário para a oxidação dos elementos, o qual determina o comportamento do processo de produção do aço até um certo grau e, assim, a execução do cálculo da carga. O confronto dos cálculos para cargas com percentagens diversas de gusa líquido e de sucata, ajuda a elaboração da tabela 6 dando os valores que estão ligados diretamente ou caracterizam a quantidade total de O₂ necessário à corrida. Um estudo cuidadoso dos valores da tabela 6 mostra que os mesmos se modificam com certa regularidade, dependendo da composição química e da proporção dos componentes e por isso tem-se a possibilidade de usá-los para o cálculo de diversas cargas.

Para diminuição da possibilidade de saturação de aço pelo FeO, o teor de MnO na nossa escória é igual a 12,9% (= 13,0), mas de acordo com o acima exposto isto não será suficiente. O gusa usado para este cálculo tem maior teor de manganês do que o que foi mencionado no artigo do autor, anteriormente publicado. Isso vem confirmar a necessidade de aumento do teor de manganês na carga. Na produção do aço, frequentemente não se observa esta proporção entre FeO e MnO e produz-se assim metal de qualidade medíocre com mais alto consumo de FeMn e menor rendimento de aço laminado, devido à fraca desoxidação.

Usa-se na prática de produção de aço uma fórmula empírica para o teor mínimo de Mn na carga que é tomado igual a $(Si + P + 0,5\%)$ (1) onde Si e P indicam as percentagens destes elementos. A prática de vários anos do autor e também grande quantidade dos balanços materiais feitos em fornos básicos de diversas capacidades mostram que a quantidade de Mn calculado pela fórmula (1) deve ser aumentada de 0,3 até 0,5%.

As alegações de que o aumento de Mn na carga acarreta a elevação no preço do aço são erradas por não levarem em conta o baixo rendimento da laminação devido à má oxidação. O Mn em excesso na carga passando à escória abaixa a quantidade de FeO dissolúvel na mesma e assegura o aço contra a saturação de FeO, que depende da concentração do mesmo na escória. O aumento de Mn em todas as cargas, excluindo aquelas para aços especiais e de baixo e alto teor em liga, deve ser obtido pelo uso de minério rico em Mn (50 — 60,0% de Mn). Um por cento de Mn no minério custa de Cr\$ 1,40 até 2,00 e no gusa custa de Cr\$ 8,00 até 9,00, isto é, o Mn do minério é 4,0 a 6,5 vezes mais barato que o manganês do gusa. Quando se usa minério rico em Mn nas cargas dos fornos básicos a produção de gusa com teor de Mn mais alto do que o recomendado pela fórmula (I), não é racional. O trabalho de muitas usinas, utilizando minério de Mn nos fornos básicos, mostra a possibilidade de produção de aço comum com o consumo de gusas tendo teor de manganês mais baixo do que recomendado pela fórmula (I).

2. CÁLCULO DE CARGA DIFERENTE DA NORMAL PELA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

No caso da carga diferente da normal pela sua composição química, pode-se determinar o rendimento de aço na sola do forno e o consumo de minério de ferro, usando os valores da tabela 6. Os últimos valores permitem o cálculo completo da carga de composição química diferente da normal. Vê-se na coluna *r* da tabela 6 que a mudança de 1,0% do rendimento do aço por motivo de variação de quantidade dos componentes metálicos modifica também a quantidade neces-

sária de O_2 consumido em 3,245 kg para cada 1000,0 kg de carga, ou 0,325%. Na carga diferente da normal pela sua composição química, naturalmente, vai ser modificada a quantidade absoluta de O_2 que se consome no banho, porém, a sua percentagem continuará a mesma. O cálculo da quantidade necessária de O_2 consumido para carga diferente da normal permite determinar o rendimento do aço e o consumo de Fe_2O_3 . Para simplificação vai ser indicado o teor dos elementos eliminados da carga normal pelos símbolos químicos correspondentes. Os elementos químicos dos componentes terão junto ao símbolo uma letra que significará à qual parte da carga metálica pertence determinada combinação: gusa — «g», sucata «s», FeMn — «f.m.», aço produzido — «r». Designar-se-á a percentagem de gusa «a», de sucata «b», de FeMn «d» e o rendimento do aço «c». Todos os valores mencionados em percentagem da carga metálica. Será a seguinte a variação de quantidade de O_2 consumido em percentagem e em comparação com a carga normal, para proporção determinada de gusa e de sucata

$$\begin{aligned} & \frac{a}{100} [(Cg-3,8) \cdot 1,33 + (Sig-1,0) \cdot 1,14 + (Mng-2,0) \cdot 0,29 + \\ & + (Pg-0,3) \cdot 1,29] + \frac{b}{100} [(Cs-0,2) \cdot 1,33 + Sis-0,1) \cdot 1,14 + \\ & + (Mns-0,45) \cdot 0,29 + (Ps-0,05) \cdot 1,29] - \frac{c}{100} [(Cr - 0,15) \cdot \\ & \cdot 1,33 + (Sir-0,0) \cdot 1,14 + (Mnr-0,45) \cdot 0,29 + (Pr-0,05) \cdot 1,29] + \\ & + \frac{d}{100} [(Cfm \cdot 1,33 + Sifm \cdot 1,14 + Mnfm \cdot 0,29 + Pfm \cdot 1,29)] - \\ & - \frac{0,5}{100} \cdot 35,238 = \pm K\% \quad (2) \end{aligned}$$

(onde 35,238 = 8 x 1,33 + 1,0 x 1,14 + 80 x 0,29 + 0,2 x 1,29) é a quantidade necessária de O_2 para a eliminação de elementos de FeMn da carga normal (Vide a tabela 1). Assim, se pode calcular a mudança dos elementos eliminados da carga diferente em percentagem em comparação com a normal.

$$\begin{aligned} & \frac{a}{100} [(Cg-3,8) + (Sig-1,0) + (Mng-2,0) + (Pg-0,3)] + \\ & + \frac{b}{100} [(Cs-0,2) + (Sis-0,1) + (Mns-0,45) + (Ps-0,05)] - \\ & - \frac{c}{100} [(Cr - 0,15) + Sir - 0,0) + (Mnr - 0,45) + (Pr - \\ & - 0,05)] + \frac{d}{100} (Cfm + Sifm + Mnfm + Pfm) - \frac{0,5}{100} \times 35,238 = \\ & = \pm L \% \quad (3) \end{aligned}$$

(onde 89,25 é a quantidade das misturas eliminadas de FeMn da carga normal). (Vide a tabela 1).

Baseando-se nos dados da coluna *r* da tabela 6 e nas fórmulas (2) e (3), pode-se calcular o rendimento da carga diferente da normal. Pela redução de rendimento de 1% o total de O₂ absorvido diminui de 0,325% e vice-versa. Obtém-se, pois, a variação de rendimento, dividindo-se a variação de O₂ necessário por 0,325. Este resultado deve ser corrigido levando em conta a variação das quantidades dos elementos eliminados em comparação com os da carga normal e será:

$$C + \left[\frac{+ K}{0,325} - (\pm L) \right] = (C \pm p) \% \quad (4)$$

$$\left[\text{onde } \frac{\pm K}{0,325} - (\pm L) = \pm p \right].$$

Deve-se mencionar que a criação do cálculo das cargas é resultado dos trabalhos de vários pesquisadores: Campbell, Dichmann e Naske, Grum-Grschimailo, Fortunato e Kostylew, o último dos quais estudou muito este assunto e apresentou resultados sob forma de relações matemáticas. Como exemplo apresentar-se-á o cálculo detalhado de carga com componentes metálicos diferentes da normal. A carga compõe-se de 90% de gusa e de 10% de sucata. A composição química dos componentes metálicos é dada na tabela 8 e auxiliares na tabela 9.

TABELA 8

Composição química dos componentes metálicos

Componentes da carga	Composição química				
	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Gusa líquido	4,15	1,45	2,30	0,250	0,02
Sucata	0,25	0,18	0,4	0,045	0,04
FeMn	8,0	1,0	80,0	0,02	0,05
Aço desejado	0,10		0,45	0,04	0,02

TABELA 9

Composição química dos materiais auxiliares

Materiais auxiliares	Composição química							Voláteis		
	SiO ₂ 0/0	Al ₂ O ₃ 0/0	Fe ₂ O ₃ 0/0	MnO 0/0	CaO 0/0	MgO 0/0	P ₂ O ₅ 0/0	Alcalis	H ₂ O 0/0	CO ₂ 0/0
Minério Chapinha	6,05	0,21	92,89	0,09			0,13		1,42	
Calcáreo Vespasiano	2,86	0,67	0,94		52,47	0,61	0,05		0,01	41,73
Dolomita Congo Socco	1,98	1,74	7,32		53,90	35,42	00,7			
Chamote	62,0	35,0	1,3		0,7	0,3		0,035		

O consumo de FeMn é tomado na base de cálculo anterior (vide o referido artigo) igual a $\frac{0,4}{0,8} = 0,5\%$. Baseando-se nas fórmulas (2) e (3) vai ser determinado o rendimento do aço desta carga na sola do forno.

$$K = \frac{90}{100} [(4,15 - 3,8) \times 1,33 + (1,45 - 1,0) \times 1,14 + (2,30 - 2,00) \times 0,29 + (0,250 - 0,300) \times 1,29] + \frac{10}{100} [(0,25 - 0,20) \times 1,33 + (0,18 - 0,10) \times 1,14 + (0,45 - 0,45) \times 0,29 + (0,045 - 0,050) \times 1,29] - \frac{103}{100} [(0,10 - 0,15) \times 1,33 + (0,0 - 0,0) \times 1,14 + (0,45 - 0,45) \times 0,29 + (0,04 - 0,05) \times 1,29] + (0,005 - 0,005) \times 35,238 = + 0,989 \%$$

$$L = \frac{90}{100} [(4,15 - 3,80) + (1,45 - 1,0) + (2,30 - 2,0) + (0,25 - 0,30)] + \frac{10}{100} \times [(0,25 - 0,2) + (0,18 - 0,10) + (0,45 - 0,45) + (0,045 - 0,050)] - \frac{103}{100} [(0,10 - 0,15) + (0,0 - 0,0) + (0,45 - 0,45) + (0,040 - 0,050)] + (0,005 - 0,005) \times 89,25 = + 1,02 \%$$

Assim, o rendimento do aço na sola do forno é igual a $c + p = 103,0 + 2,02 = 105,02\%$. O teor de Mn em percentagem é $2,3\%$, portanto é superior em $0,1\%$ ao dado pela fórmula (1), que seria $(1,45 + 0,25 + 0,5)$.

A variação de Si, Mn e P na carga é dada pelas seguintes fórmulas:

$$\text{Si}\% = \frac{a}{100} \text{Sig} + \frac{b}{100} \text{Sis} - \frac{c}{100} \text{Sir} + \frac{d}{100} \text{Sifm} \quad (5)$$

$$\text{Mn}\% = \frac{a}{100} \text{Mng} + \frac{b}{100} \text{Mns} - \frac{c}{100} \text{Mnr} + \frac{d}{100} \text{Mnfm} \quad (6)$$

$$\text{P}\% = \frac{a}{100} \text{Pg} + \frac{b}{100} \text{Ps} - \frac{c}{100} \text{Pr} + \frac{d}{100} \text{Pfm} \quad (7)$$

Neste caso ter-se-á:

$$\text{Si} = 0,9 \times 1,45 + 0,1 \times 0,18 - 1,0502 \times 0,0 + 0,005 \times 1,0 = 1,328\%$$

$$\text{Mn} = 0,9 \times 2,3 + 0,1 \times 0,4 - 1,0502 \times 0,0045 + 0,005 \times 80,0 = 2,455\%$$

$$\text{P} = 0,9 \times 0,25 + 0,1 \times 0,45 - 1,0502 \times 0,002 + 0,005 \times 0,0002 = 0,23\%$$

O rendimento calculado para esta carga permite determinar as quantidades de elementos eliminados da mesma e a quantidade total do O_2 absorvido do Fe_2O_3 e do ar. A tabela 10, dá os valores necessários.

A quantidade de mols de O_2 absorvidas pela carga, determina o consumo de Fe_2O_3 . Acha-se assim a quantidade necessária de Fe_2O_3 para obtenção de 1 kg de O_2 na coluna x da tabela 6, da carga normal, cujo rendimento é o mais próximo do calculado. O rendimento mais próximo do calculado tem a carga normal N.º 1 e corresponde a 3,6 kg de Fe_2O_3 para 1,0 kg de O_2 . A coluna n da mesma tabela dá os valores em percentagem de participação de O_2 do Fe_2O_3 na oxidação dos elementos da carga. Estes valores dão a possibilidade de calcular a quantidade de minério de ferro necessária para nossa carga:

$$\frac{2,275 \times 32 \times 3,6 \times 0,77}{10 \times 0,9289} = 21,7\%$$

(onde 2,275 é o número de mols de O_2 absorvido; 32 é o peso molecular do O_2 ; 0,77 é da coluna n da tabela 6; 10 é a quantidade de centenas de kg na carga de 1000,0 kg; 0,9289 é o teor de Fe_2O_3 no minério de ferro; 3,6 é da coluna x da tabela 6 para o mesmo rendimento do aço).

A tabela 10 e a quantidade do minério de ferro necessário para carga vão dar a quantidade dos óxidos que devem formar a escória com a cal.

TABELA 10

Eliminação dos elementos e consumo de O₂

Elementos químicos	Carga metálica				Na corrida 105,02 % kg	Eliminação ou aumento		O ₂ absorvido por corrida	
	Gusa 900,0 kg	Sucata 100,0 kg	FeMn 5,0 kg	Total kg		kg	mol		
C	37,35	0,25	0,400	38,000	1,005	-36,995	3,080	1,540	CO — 3,080
Si	13,05	0,18	0,050	13,28		-13,28	0,474	0,474	SiO ₂ — 0,474
Mn	20,70	0,40	4,000	25,100	4,200	-20,848	0,380	0,190	MnO — 0,380
P	2,25	0,045	0,010	2,305	0,420	- 1,883	0,061	0,071	P ₂ O ₅ — 0,030
S	0,18	0,040	0,002	0,222	0,211	- 0,011			
Fe	826,47	99,085	0,538	926,093	1043,794	417,701	2,10		Fe ₂ O ₃ — 1,05
Total	900,00	100,0	5,00	1005,0	1049,630	44,630		2,275	

Os óxidos dos elementos oxidados da carga e dos materiais auxiliares precisam para a formação da escória de 1,719 mols e cal. A carga tem 0,358 mols de CaO, assim, necessita-se ainda de 1,719 — 0,358 = 1,361 mols de CaO.

Têm-se no calcáreo as seguintes porporções em mols:

$$\text{CaO} = \frac{52,47}{56} = 0,938 \text{ m}; \quad \text{SiO}_2 = \frac{2,86}{60} = 0,047 \text{ m};$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{0,67}{100} = 0,007 \text{ m};$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = \frac{0,065}{142} = 0,0004 \text{ mol.}$$

Então a proporção de cal ativa no calcáreo é igual a:

$$0,938 - (2 \times 0,048 + 1,0 \times 0,007 + 4,0 \times 0,0005) = 0,933 - 0,105 = 0,833$$

A quantidade do calcáreo é:

$$\frac{1,361}{0,833} \times 100 = 16,4 \%$$

Os cálculos da carga normal, acima apresentados e os da carga do último exemplo são feitos para melhor compreensão do modo de execução dos mesmos. Eles podem servir como ponto de partida para pesquisas que permitem seu aperfeiçoamento pelo estudo do equilíbrio químico-físico no sistema «aço-escória», empregando-se análises químicas e controle de resultados por balanços de materiais. Todos os cálculos deste artigo são feitos com régua de cálculo. O cálculo dos balanços teóricos e práticos de alta precisão deve ser feito com 4 algarismos decimais. Este trabalho é muito interessante e importante do lado teórico, porém, não é necessário para os cálculos práticos das cargas de cada dia. Durante a produção do aço comum em massa, quando variam a composição química do gusa e da sucata e a quantidade deles, pode calcular-se o rendimento na sola do forno pela fórmula (4) utilizando somente estes dois componentes da carga. A composição constante de sucata, quando se utiliza sucata própria, permite o rendimento do aço na sola do forno, usando somente o gusa pela fórmula (4). O rendimento calculado dá a possibilidade de determinar o consumo de Fe_2O_3 pelo diagrama e logo após, o do minério de ferro. Este método de cálculo do rendimento de aço na base da variação da composição e da quantidade de gusa e de sucata ou somente do primeiro, é um cálculo simplificado e rápido das cargas, o qual praticamente não difere do cálculo completo.

A verificação da quantidade suficiente em percentagem de Mn deve ser feita pela fórmula (1) baseando-se nas indicações anteriores. Utilizando o diagrama de consumo de Fe_2O_3 , é necessário indicar que os dados para as cargas com mais de 15-20 % de sucata serão absolutamente exatos, mas com aumento do gusa na carga, este valor será menor em 4-6 % do que o valor calculado. Cerca de 88-90 % da quantidade calculada de minério de ferro são carregados no início da

operação; a parte restante devendo ser acrescentada em alta temperatura na ebulição da corrida. Esta operação produz a eliminação rápida do carbono (0,008 até 0,009 % por minuto) e ajuda a eliminação dos gases absorvidos pelo banho durante a fusão.

A diferença no cálculo da quantidade de minério de ferro, quando se usa o processo simplificado, não tem importância na prática. O consumo calculado do minério de ferro neste exemplo é de 21,7 % e o mesmo tirado do diagrama é igual $\frac{1 \times 9,2}{0,9289} = 20,7$ % . A

diferença entre as quantidades do minério calculado e obtido do diagrama é igual a $\frac{21,7 - 20,7}{21,7} \times 100 = 4,6$ % . Carregando o minério calculado deve deixar-se mais ou menos 10 até 12 % dêle para o acréscimo durante a ebulição da corrida. Quando se usa o dado obtido do diagrama deve diminuir em 4 até 6 % e na ebulição fornecer de 7 até 10 % . O mestre corrige pela observação de corrida a quantidade da segunda adição de minério. Verifica-se que a quantidade calculada é bem exata.

Para a determinação da quantidade de CaCO_3 na carga é necessário usar uma parte dos valores que foram dados no artigo anterior para a composição da tabela 12.

TABELA 12

Valores necessários para cálculo de cal na escória

Componentes ou combinações químicas que precisam formar a escória (%)	Consumo necessário de cal %
1,0 de SiO_2	$1,87 \text{ de } \text{CaO} \left(\frac{2 \text{ CaO} + \text{SiO}_2 = 112 + 60}{2 \text{ CaO}} = 1,87 \right)$
1,0 de Si	$4,0 \text{ de } \text{CaO} \left(\text{Si} + \text{O}_2 = 28 + 32; \frac{\text{SiO}}{\text{Si}} = 2,14 \right)$ $2,14 \cdot 1,87 = 4,0$
1,0 de P_2O_5	$1,58 \text{ de } \text{CaO} \left(\frac{4 \text{ CaO} + \text{P}_2\text{O}_5 = 224 + 142}{4 \text{ CaO}} = 1,58 \right)$
1,0 de P	$3,61 \text{ de } \text{CaO} \left(2 \text{ P} + 2 \frac{1}{2} \text{ O}_2 = 62 + 80 \right)$ $\frac{\text{P}_2\text{O}_5}{\text{P}_2} = 2,29 \quad 1,58 \cdot 2,29 = 3,61$
1,0 de Al_2O_3	$0,55 \text{ de } \text{CaO} \left(\frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 = 56 + 102}{\text{CaO}} = 0,55 \right)$

O enxôfre dos componentes da carga da produção nacional é muito baixo razão por que não é preciso calcular o mesmo. A situação mundial acha-se em tal ponto que não existe esperança alguma de receber sucata da Europa nos próximos 10 a 20 anos. O enxôfre na produção de aço nunca terá tamanha importância como na Europa. Este elemento prejudicial exige o máximo de atenção, trabalho e tempo dos que se ocupam da produção do aço.

Para melhor demonstração e esclarecimento é necessário calcular a carga do último exemplo pelo método simplificado. Vamos fazer o cálculo da carga somente baseando-se na mudança da composição química do gusa.

$$K = \frac{90}{100} [(4,15 - 3,80) \times 1,33 + (1,45 - 1,0) \times 1,14 + (2,30 - 2,0) \times 0,29 + (0,250 - 0,300) \times 1,29] - \frac{103}{100} [(0,10 - 0,15) \times 1,33 + (0,0 - 0,0) \times 1,14 + (0,45 - 0,45) \times 0,29 + (0,040 - 0,050) \times 1,29] = 0,982 \%$$

$$L = \frac{90}{100} [(4,15 - 3,80) + (1,45 - 1,0) + (2,3 - 2,0) + (0,250 - 0,300)] - \frac{103}{100} [(0,10 - 0,15) + (0,0 - 0,0) + (0,45 - 0,45) + (0,040 - 0,050)] = 1,007 \%$$

$$P = \frac{0,982}{0,325} - 1,007 = 2,013.$$

Assim, o rendimento é igual: $c + p = 103 + 2,013 = 105,013 \%$.

O consumo do minério de ferro é $\frac{19,3}{0,9289} = 20,8 \%$ (do diagrama). O teor de Mn do gusa é controlado pela fórmula (1) e é maior 0,1 % que o dado pela fórmula: $2,3 - (1,45 + 0,25 + 0,5) = 0,1 \%$.

Para o cálculo dos elementos eliminados, deve ser considerado somente o gusa.

$$Si = \frac{90}{100} \times 1,45 = 1,305 \%; \quad Mn = \frac{90}{100} \times 2,3 = 2,07;$$

$$P = \frac{90}{100} \times 0,25 = 0,225 \%$$

Para formar a escória necessitar-se-á de cal: $1,305 \times 4 + 0,225 \times 1,87 + 0,109 \times 0,55 + 0,027 \times 1,58 = 2,97 \%$ de cal.

A carga tem ainda os óxidos provenientes dos materiais auxiliares da mesma.

$$SiO_2 = 3,75 \times 0,0198 + 20,8 \times 0,0605 + 0,2 = 1,533 \%$$

$$Al_2O_3 = 3,73 \times 0,0174 + 20,8 \times 0,004 = 0,109 \%$$

$$P_2O_5 = 20,8 \times 0,0013 = 0,027 \%$$

Para a formação da escória destes óxidos necessita-se de: $1,533 \times 1,87 + 0,109 \times 0,55 + 0,027 \times 1,58 = 2,97\%$ de cal.

A carga tem em cal: $0,375 \times 0,539 = 2,02\%$.

Assim, precisa-se: $6,052 + 2,972 - 2,02 = 7,022\%$ e a quantidade de calcáreo a adicionar será: $\frac{7,022}{0,46} = 15,3\%$.

A quantidade do calcáreo pelo cálculo simplificado é menor em 1,1%. Esta diferença é o resultado do consumo de minério de ferro, de acôrdo com o diagrama, ser menor em 4 ou 5% do que o realmente necessário. Isto abaixa a quantidade de óxidos dos materiais auxiliares. A diferença tem mais sentido teórico do que prático. No tempo da adição da segunda parte do minério de ferro para a ebulição o mestre perito vê a necessidade de aumento de pequena quantidade de cal. Esta operação não acarreta perturbação do processo dos lados químicos e caloríficos e não provoca demora da corrida na produção do aço. Simultaneamente com os cálculos, deseja o autor comprovar teórica e praticamente haver vantagem econômica na substituição de calcáreo por cal na operação dos fornos Siemens-Martin. A prática da produção de aço conhece de há muito tempo que o uso de cal em substituição de calcáreo facilita a eliminação dos elementos prejudiciais (S e P), favorece a formação de compostos químicos inalteráveis (CaS e $(\text{CaO})_4 \text{P}_2\text{O}_5$ nas condições do forno, e aumenta o rendimento do aço. Até pouco tempo atrás, esta opinião era discutida e combatida. Estudando os efeitos de aumento de produção e a parte puramente econômica, quer o autor juntar-se aos partidários do uso de cal apresentando cálculo teórico e prático em apoio desta opinião.

O consumo do calcáreo na carga normal calculada é 77,2 kg para 1000,0 kg. O teor de cal no calcáreo é 53,62%, assim tem-se o consumo de cal: $\frac{77,2}{10} \times 0,5362 = 4,14\%$.

A oxidação dos componentes da carga em presença do calcáreo e graças à dissociação de CO_2 em CO e $\frac{1}{2} \text{O}_2$ pela alta temperatura do forno e ação de catálise dos materiais da carga, se fará de acôrdo com as seguintes reações químicas: $n \cdot \text{CaCO}_3 + \text{Rm} (\text{Si}, \text{Mn}, \text{P}, \text{C}) = n \cdot \text{CO}_2 + \text{Rm} (\dots) = n \cdot \text{CaO} + n \cdot \text{CO} + \frac{n}{2} \text{O}_2 + \text{Rm} (\dots) = n \cdot \text{CaO} + n \cdot \text{CO} + \text{Rm} \cdot 0 (\dots)$.

Tem-se assim meia molécula-quilograma de O_2 ou 16,0 kg para 56,0 kg de cal. A grande quantidade dos balanços das cargas com cal já publicados, mostra que somente 50,0% de O_2 da decomposição de CO_2 são utilizados na oxidação das misturas da carga. Observa-se a seguinte ordem do carregamento: o calcáreo é carregado na sola do

forno, ou misturado ao minério de ferro e sucata, isolando-se sempre da calcinação rápida, mas 50,0 % dêle têm tempo para calcinar. Assim,

8,0 kg de O_2 ativo são fornecidos por 56,0 kg do cal ou $\frac{8,00}{56,00} \times$

$\times 100 = 14,3\%$ da quantidade do cal usado. A carga recebe na decomposição de $CO_2 + 4,14 \times 0,143 = 0,59\%$ de O_2 ativo. A coluna K da Tab. 6 mostra que a carga, conforme os cálculos, precisa de 5,638 % de O_2 , o minério de ferro fornece 3,058 % do mesmo (conforme coluna M da referida tabela). A escória tem de O_2 no FeO:

$\frac{19,170}{72} \times 16 = 4,26$ kg para 1.000,0 kg da carga, ou 0,426 %

(conforme Tabela 4).

A oxidação dos elementos da carga necessita de O_2 : 3,058 — — 0,426 = 2,632. No caso do consumo de cal a carga tem, ainda, necessidade de 0,59 % de O_2 , ou em total 2,632 + 0,59 = 3,222 % de oxigênio de minério de ferro. A percentagem necessária de O_2 de mi-

nério de ferro modifica-se e é igual a $\frac{3,222}{5,638} \times 100 = 57,2\%$. Ba-

seando-se na coluna N da tabela 6 pode calcular-se o aumento do rendimento do aço. Um rendimento de aço de 101,0 % corresponde a 54,2 % de O_2 do minério e um rendimento de 103,0 % a 66,9 % de O_2 do minério. O aumento de rendimento no nosso caso será:

$$\frac{(103,0 - 101,0)}{(66,9 - 54,7)} \times (57,2 - 54,7) = 0,47\%$$

O rendimento do aço na carga de 80 % do gusa (que tem utilização de O_2 de minério de ferro menor que a da carga de maior percentagem de gusa por causa da capacidade de oxidação pelo O_2 do ar) aumenta em 0,47 % pela utilização do cal. O aumento de consumo de minério de ferro e despêsa de calcinação de calcáreo será cerca de 0,07 % do valor da produção de aço do forno. Ter-se-á assim uma diminuição de custo igual a 0,4 % do valor do aço produzido pelo emprego do cal. O uso de cal aumenta, ainda, o rendimento de aço laminado em consequência da menor oxidação do mesmo. A diminuição total será de ordem de 1,5 até 2,0 % do valor do aço produzido. Esta economia cresce com o aumento da percentagem de gusa na carga.

BIBLIOGRAFIA

1. KRINICKI, P. — Bases de cálculo e escôlha das cargas nos fornos Siemens-Martin básicos para a produção de aço comum — ABM — Boletim da Associação Brasileira de Metais, vol. 6, n.º 20, Julho de 1951, S. Paulo.
2. CAMPBELL, H. H. — The manufacture and properties of iron and steel.
3. NASKE — Beiträge zur Metallurgie des Martin Prozesses — Stahl und Eisen, 1907.