

FABRICAÇÃO DE AÇO EM FORNO ELETRICO BASICO

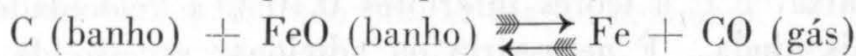
(2.^a parte)

Luiz Coelho C. da Silva (1)

A FASE OXIDANTE

Nas páginas anteriores fizemos uma série de considerações *teóricas* sobre as condições em que se dá a eliminação dos diversos elementos do banho. Esse estudo permite um melhor entendimento dos fenômenos que se dão no forno elétrico. Não corresponde, no entanto, exatamente a estes fenômenos. Assim o estudo feito serve somente para que se tenha uma idéia do *sentido* em que se dão as reações para dadas condições reinantes. Serve também, até certo ponto, para dar uma idéia quantitativa dos fenômenos. Falamos várias vezes em “equilíbrio”, “equilíbrio distributivo”, “equilíbrio da reação”, etc. Não se deve esquecer, porém, que são poucas as reações que chegam a atingir um relativo equilíbrio no fim da fase oxidante. Deve-se considerar não só o aspecto *estático* das reações — o *equilíbrio* — como também o aspecto dinâmico — a *velocidade de reação*.

Quando se considera, por exemplo, a reação:



sabemos ser o equilíbrio dado pela reação:

$$(\text{C})_b \cdot (\text{FeO})_b = 0,01 + 1/11 \text{ X } (\text{C})_b = K_{1600\text{C}^\circ}$$

Esta última relação só exprime que, se permitimos que a reação *atinja* o *equilíbrio*, o teor de carbono residual do banho será igual a K_{1600}/FeO . Nada nos diz no entanto sobre o tempo necessário para que isto aconteça. Ora, sabemos que a velocidade de reação diminui a medida que ela se aproxima do equilíbrio. Esperar que este seja atingido significará na realidade uma grande perda de tempo. O que se procura então, é deslocar o ponto de equilíbrio da reação de modo que esta se dê com velocidade

(1) — Engenheiro de Minas e Metalurgia da Usina de Metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

bastante maior e no sentido desejado. Por exemplo: — suponhamos que se deseja baixar o C a 0,10%. Teóricamente dever-se-ia adicionar o minério necessário para que no fim se tivesse 0,19% de FeO no banho. Esperar que isso acontecesse seria uma grande perda de tempo. Isso porque quando o teor de C se aproximasse de 0,10% a reação tornar-se-ia muito lenta. A massa ativa de C, tornando-se cada vês menor a velocidade da reação diminuiria cada vês mais. O que se faz é então aumentar a quantidade de (FeO)_b.

Para isto adiciona-se um certo excesso de minério à escória de modo a forçar o aumento de teor de (FeO)_b. O equilíbrio é então sensivelmente deslocado no sentido de uma maior libertação de CO. A velocidade de reação torna-se muito maior e o teor de C = 0,10% é mais rapidamente atingido. Nesse momento impede-se o prosseguimento da reação pela retirada da escória. Esse procedimento permite apressar a operação de refino embora resulte n'um banho mais oxidado (com maior teor de FeO dissolvido). Com efeito, para teores baixos de carbono (0,15 ou menos) a redução de FeO pelo C prossegue mais lentamente que a difusão do FeO da escória no banho. Quer dizer: a realização das condições de equilíbrio ideais no exemplo dado resultariam num banho com 0,10% de C e 0,19% de FeO e numa escória com teor de FeO livre em equilíbrio com os 0,19% de FeO do banho. Isto é, a escória não deveria conter mais que

$$0,19 \times 100 = 19\% \text{ de FeO livre}$$

No entanto, adiciona-se de fato um excesso de minério. A difusão do FeO no banho prosseguindo mais rapidamente que a redução pelo C, ao ser atingido o teor de C = 0,10% a oxidação do banho corresponderia, ao minério adicionado, isto é, será bastante superior a (FeO)_b = 0,19%.

Para baixar o C a teores inferiores 0,10% a velocidade de reação diminui mais ainda. É necessário ou adicionar excesso de minério ao banho (o que o super-oxida) ou perder muito tempo esperando que seja atingido o equilíbrio (usando só o minério estritamente necessário).

O que acima dissemos a respeito da *velocidade de reação* é importante especialmente no caso de carbono. Os outros elementos sendo os primeiros a serem eliminados podem ser, sem maior inconveniente, colocados em presença de um excesso de FeO que será posteriormente consumido na eliminação do C.

Este elemento atua pois como uma espécie de “parachoque”, recaindo sobre ele o excesso de FeO porventura existente após oxidação do Si, Mn e P. Sòmente quando se deseja reduzir os teores de Mn e P a valores especialmente baixos é que se torna eventualmente necessário um excesso de minério para apressar suficientemente as reações:



Todas as considerações feitas a respeito da eliminação do Si, Mn, P e C não levaram em conta fatores importantíssimos, como: fluidez da escória, agitação do banho, etc. Esses fatores serão considerados mais adiante.

CONDUÇÃO DA OPERAÇÃO: — Depois da completa fusão da carga o banho metálico está a temperatura relativamente baixa e a escória, também fria é espessa e pouco agitada. Inicialmente apenas o silício terá sido eliminado. A escória, depois de tudo fundido, será rica em SiO_2 e logo que o banho fôr suficientemente aquecido ela se torna bastante fluida. É preciso, dêsse momento em diante, constituir uma escória conveniente para a eliminação dos outros elementos. Começa-se então a adicionar o minério e o calcáreo. Vejamos as condições e os efeitos da adição desses materiais.

MINÉRIO DE FERRO: — *O minério de ferro é como vimos o oxidante empregado.* Começa-se a adiciona-lo logo depois de estar tudo fundido. Essa adição torna a escória mais fluida e de certo modo (devido à humidade do minério) provoca uma agitação da mesma. A adição do minério vai ser regulada pela oxidação que se tem em vista, isto é, depende do teor final em carbono a que se deseja chegar. É preciso, portanto, controlar o carbono do banho o que se consegue pela retirada de *provas*.

A adição de minério de ferro a um banho muito quente e com carbono elevado provoca uma reação muito violenta. Porisso essa adição deve ser feita com critério, levando em conta que:

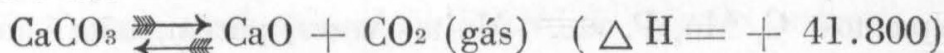
1. A reação de oxidação do C é fortemente endotérmica: a adição de minério a um banho frio não produz reação nenhuma.

2. A adição de minério a um banho muito quente produz reação muito violenta com grande evolução de gases ($\text{CO} + \text{CO}_2$).

A adição de minério de ferro deve sempre ser acompanhada do calcáreo ou cal, para garantir basicidade e consistência convenientes.

CALCÁREO: — O calcáreo vai produzir a basicidade da escória. Deve ser adicionado em quantidade suficiente para garantir essa basicidade neutralizando a silica (SiO_2) e o anidrido fosforoso (P_2O_3).

A falta de calcáreo provoca uma corrosão intensa do refratário do forno. Este, que é basico, será atacado pela silica livre da escória. O calcáreo serve ainda, e esta é uma função muito importante, para provocar a agitação da escória. Com efeito, à temperatura do banho o calcáreo se decompõe e da:



O anidrido carbônico ao escapar-se produz uma forte agitação da escória, que favorece o intercâmbio banho — escória.

Nota-se que à temperatura do metal fundido o CO₂ deve atuar como um oxidante. Com efeito, o gás em equilíbrio com a quantidade de FeO dissolvido no banho é, a essa temperatura, uma mistura de CO e CO₂ com predomínio franco do primeiro. O CO₂ deveria portanto decompor-se dando:



No entanto, a formação do CO₂ da-se na escória e ele escapará assim rapidamente sem entrar muito em contato com o Fe. O calcáreo deve ser adicionado tendo em vista, também, a formação de uma escória em quantidade suficiente de consistência conveniente.

MINÉRIO DE MANGANÊS: — A adição de minério de manganês é feita quando se quer obter manganês residual elevado ou quando se deseja efetuar uma oxidação pouco intensa. De qualquer modo, o emprego de minério de manganês resulta n'um banho menos oxidado (com menor teor de FeO). Embora, como já vimos, ele não permita uma boa eliminação do fosforo, quando se deseja apenas abaixar o teor de carbono é aconselhável o emprego do minério de manganês no fim da fase de refino.

A seguir damos um resumo das propriedades do minério de manganês do ponto de vista metalúrgico.

— É um oxidante mais fraco que o minério de ferro. Oxida o silício e o carbono.

— Pelo aumento do (MnO)_e desloca o equilíbrio no sentido que aumenta o teor de manganês residual do banho.

— Devido a esta última razão e devido também ao menor poder oxidante, permite obter um banho muito menos oxidado do que quando se usa só minério de ferro. É esta sua grande vantagem.

— Devido ao menor poder oxidante não elimina o fósforo. Ao contrário, pelo aumento de (Mn)_b é capaz de produzir uma reversão desse elemento ao banho.

AS PROVAS: — Para controlar a composição do banho o metalurgista pode lançar mão de análise química ou de provas cujas características físicas lhe dão indicação da composição do metal.

A análise pode ser feita tendo em vista a determinação de um ou vários elementos: C, Mn, P, etc. Muitas vezes, porém, não é necessário

ou possível recorrer à análise. Nêste caso o forneiro retira uma amostra de metal e a examina. Para isto utiliza uma concha ou colher de aço que procura revestir perfeitamente com uma camada de escória. Isto é necessário para evitar que a concha se funda ou que fique aço aderente. Retirada a amostra de aço é este vazado n'uma forma (ou molde) ou então simplesmente despejado no chão (ou n'uma placa de metal).

Nos dois casos observa-se:

1. Temperatura — pela fluidês e aspecto do material. Se êste corre bem e a concha fica limpa a temperatura estará bôa ou alta demais. Se fica um resto de aço aderente à concha a temperatura é baixa. Naturalmente o coeficiente pessoal tem aqui grande importância: sómente com grande prática é que se pode chegar a avaliar com segurança a temperatura. O tempo necessário para que se forme uma película na superfície do metal também serve para dar indicação da temperatura.

2. Oxidação do metal — (teôr em FeO) reconhecida pela evolução de gâses a medida que ele se esfria. Esta ação é, em geral, tanto mais intensa quanto mais oxidado estiver o metal. Note-se porém que êste pode apresentar-se quasi “morto”, isto é, produzindo muito pouco gás ao solidificar e, no entanto, conter elevado teôr de FeO. Isto acontecerá quando se permitir que a reação



atinja um relativo equilibrio e que este equilibrio corresponda a um teôr *extremamente baixo de C*. Com efeito, a evolução de gâses deve-se ao fato de que o equilibrio da reação acima desloca-se para a direita, a medida que a temperatura baixa. Isto é, o valor da constante $K_T = \frac{(\text{C})_b \cdot (\text{FeO})_b}{(\text{Fe})_b \cdot (\text{CO})_b}$ diminue quando a temperatura baixa. Há então libertação de CO e (CO₂). Quando o teôr de C é muito baixo já vimos que o prosseguimento de sua oxidação se torna muito mais difícil.

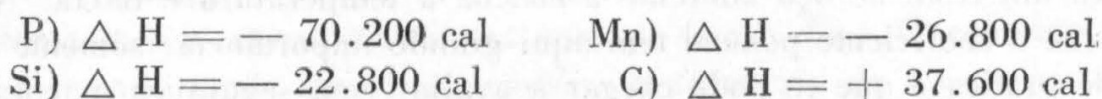
3. Teôr de carbono do metal — baseado também na evolução de gâses. Para um metal com carbono acima de 0,20% mais ou menos, a superfície da prova será rugosa, irregular. Uma superfície lisa indicará carbono baixo (pode, no entanto, indicar metal frio).

No caso da prova vazada sobre uma placa (prova de chapa) pode-se ainda fazer um “test” de dobramento. Conforme o angulo de dobramento avalia-se o teôr de carbono. A prova pode ser temperada ou não, antes do dobramento. Uma prova temperada e com mais de 0,20% de C já quebra perfeitamente. Deve-se notar, no entanto, que elementos como Mn, Ni, etc., influenciam bastante o resultado da prova de dobramento. O aspecto da fratura também será indicativo do teôr do carbono.

Todas essas provas só podem ser interpretadas quando se possui uma ceria prática. A falta desta, pode levar a erros no seu julgamento. Pelas provas reconhece-se então o teor de carbono e, pelo conhecimento deste, pode-se avaliar o grau de oxidação do metal. Basta lembrar que a oxidação dos elementos da-se aproximadamente na ordem seguinte, dependendo, é claro, das massas ativas:



A variação de conteúdo térmico na oxidação desses elementos é a seguinte:



Faltam elementos para calcular as variações de energia livre, e por isso os valores acima servem apenas para dar uma idéia aproximada da afinidade dos elementos pelo oxigênio.

A ESCÓRIA NA 1.^a FASE: — A escória oxidante ou de refino é uma fase líquida complexa. Seu papel é importantíssimo sendo o veículo do óxido que vai efetuar o refino, (FeO). Vai também absorver os produtos desse refino: SiO₂, MnO, P₂O₃, etc. A escória cobre o banho, protegendo o refratário. A emissividade da escória é maior que a do metal líquido e, por isso, enquanto a força estiver desligada a existência da escória é um fator desfavorável à conservação do refratário. Quando porém, a força estiver ligada (que é o caso geral na operação) a escória torna-se útil pois absorve a maior parte do calor produzido pelo arco e a transmite ao banho.

Quando à composição é a escória uma mistura homogênea de CaO, SiO₂, (CaO)₂ . SiO₂, (CaO)₃ . P₂O₃, (CaO)₂ . Fe₂O₃, FeO, MnO, etc. Essa mistura homogênea contém ainda MgO livre, em suspensão.

As principais características a considerar na escória são: 1. — Basicidade. 2. — Poder oxidante. 3. — Fluidês. 4. — Agitação. 5. — Temperatura.

1. Basicidade:

A basicidade da escória é indispensável para:

- a — evitar a corrosão do refratário pelos compostos ácidos (SiO₂, P₂O₃).
- b — garantir a eliminação do P pela formação do (CaO)₃.P₂O₃.

Para avaliar a basicidade da escória é necessário considerar a proporção entre os compostos marcadamente ácidos: SiO_2 e P_2O_3 e os compostos marcadamente básicos: CaO .

O MnO é, por muitos, considerado como base forte porém parece mais razoável considerá-lo como base fraca.

Secundariamente ter-se-ia então:

ácidos fracos — Al_2O_3 , FeO_3

bases fracas — MnO , FeO

Êstes ácidos e bases fracas não precisam ser considerados. A basicidade será então avaliada pelo balanço entre o CaO e a SiO_2 e P_2O_3 .

Cálculo do excesso de CaO:

A fórmula de silicato de cálcio presente na escória pode ser: $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (em presença de pouca CaO) ou $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$.

Calcularemos, tomando por base $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$ e $(\text{CaO})_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_3$.

Teremos então:

$\% \text{CaO}/56$ equivalem a $\% \text{SiO}_2/30$.

$\% \text{CaO}/56$ equivalem a $\% \text{P}_2\text{O}_3/37$.

Portanto, o excesso de CaO será:

$(\% \text{Excesso CaO}) = (\% \text{CaO}) - 1,86 (\% \text{SiO}_2) - 1,51 (\% \text{P}_2\text{O}_3)$
ou em relação:

$$\frac{\text{Bases}}{\text{Ácidos}} = \frac{(\% \text{CaO}/56)}{(\% \text{SiO}_2/30 + (\% \text{P}_2\text{O}_3/37))}$$

Exemplo:

Seja uma escória com:

$\text{CaO} = 40\%$ $\text{SiO}_2 = 15\%$ $\text{P}_2\text{O}_3 = 1\%$

Teremos:

$$\begin{aligned} \% \text{Excesso CaO} &= 40 - 1,86 \times 15 - 1,5 \times 1 \\ &= 40 - (28 + 1,5) \\ &= 10,5\% \end{aligned}$$

A basicidade está portanto garantida nessa escória

Nota-se, porém, que a sílica não se encontra de fato totalmente combinada na forma de $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$. Calculando-se a basicidade a partir dessa fórmula chega-se ao absurdo de encontrar uma basicidade negativa para escórias que permitiram a eliminação do P. O que existe, de fato, é uma mistura de $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$ e $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ em proporções que não foram ainda bem determinadas. Em todo caso, a formação do $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$ exige a presença de um excesso de cal.

2. *Poder oxidante*: — O poder oxidante da escória é dado pela atividade do FeO da mesma. Como sabemos o óxido de ferro encontra-se na escória na forma combinada $(\text{CaO})_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou livre. A maior ou menor proporção de FeO combinado depende da basicidade da escória. Tanto o equilíbrio das reações de oxidação como o equilíbrio da distribuição de FeO entre a escória e banho só se refere ao FeO livre. Tendo por base os valores da relação de distribuição correspondentes a diversas basicidades (vide fig. 2) podemos calcular o FeO livre. Seja por exemplo uma escória com

$$\text{CaO} = 40\% \quad \text{HSiO}_2 = 15\% \quad \text{P}_2\text{O}_3 = 1\%$$

Já calculamos, mais acima, o excesso de CaO:

$$(\% \text{ Excesso de CaO}) = 10,5\%$$

Entretanto com êsse valôr na fig. 2 tem-se para a relação de distribuição:

$$K_T = \frac{\text{FeO (total na escória)}}{\text{FeO (banho)}} = 110$$

Para basicidade fracas, em que o FeO não se acha combinado, pode-se adotar para a relação de distribuição e valor 100 (Herty). (2).

Portanto a porcentagem de FeO livre da escória será aproximadamente:

$$\frac{15\% \times 100}{110} = 13,6\%$$

Êste valôr corresponderia à concentração. Não conseguimos encontrar dados sobre a atividade do FeO na escória. No entanto, em primeira aproximação podemos confundir a concentração com a atividade.

Secundariamente, também o MnO pode atuar como oxidante, no caso de existir na escória em porcentagem maior que a permitida pelo equilíbrio. Isto acontece quando se utiliza minério de manganês para oxidar elementos como Si e C e produzir um elevado Mn residual no banho. Na avaliação de poder oxidante de uma escória deve-se também considerar a temperatura, que influe fortemente no valôr da relação de distribuição. (Vêr exemplo dado anteriormente).

Pelo aspecto de uma amostra de escória retirada do forno é possível chegar a uma idéia aproximada do seu poder oxidante e da sua basicidade. Sòmente a prática pode fornecer os elementos para um julgamento da escória. Ter-se-ia então (7), para escórias resfriadas em água:

Côr	FeO	CaO/SiO ₂
Negra	Médio	Baixa
Cinzenta	Baixo	Baixa
Marron clara	Médio	Média
Marron escura	Médio	Alta
Marron chocolate	Alto	Alta

Do ponto de vista químico, a escória ideal no final da primeira fase deve conter o mínimo FeO possível. Com isso tem-se uma economia de oxidante e diminuição da perda metálica. Para aproveitar ao máximo o poder oxidante da primeira escória convém deixar um intervalo de cerca de 10 minutos, pelo menos, entre a última adição de minério, e a retirada da escória. Nêsse intervalo pode-se lançar mão de adições de calcáreo para evitar a reação (banho-escória).

Seguindo-se esta norma, o metal apresentar-se-à muito menos rico em FeO e gases, no fim da primeira fase. E isso é, evidentemente, muito desejável.

3. *Fluidês*: — A fluidês da escória é um fator de grande importância. A escória sendo o veículo dos principais agentes químicos adicionados deve, obviamente, permitir que estes nela se distribuam facil e uniformemente. O intercâmbio entre escória e banho é então facilitado. Se a escória tiver alta viscosidade as ações químicas que se dão na superfície banho-escória serão pouco intensas. O poder desoxidante das camadas inferiores da escória será rapidamente consumido, e o FeO das camadas superiores, não se difundirá senão com muita lentidão.

Por outro lado, uma escória muito fluida refletirá grande parte do calor. Por êste motivo e também devido a uma ação corrosiva mais intensa o refratário sofrerá muito. Uma boa escória deve, portanto, ser de média viscosidade e apresentar um aspecto espumoso (“fluffly”).

A escória que apresenta êssas características permite que os eletrodos trabalhem com as pontas mergulhadas e protege assim o refratário.

Para engrossar uma escória muito fluida pode-se adicionar cal ou calcáreo. Para afinar uma escória muito viscosa pede-se adicionar silica (areia quartzosa) ou fluorita (CaF₂). De preferencia o segundo, visto que para conseguir a mesma fluidês é preciso adicionar muito mais SiO₂ que CaF₂. Consequentemente a acidês da escória sobe muito mais no 1.º caso.

Visto que as temperaturas de trabalho no forno elétrico são mantidas em geral, dentro de um intervalo relativamente pequeno, é muito importante e útil considerar o sistema CaO-FeO-SiO_2 .

Pela consideração do diagrama ternário dêsse sistema (vide fig. 13) pode-se ter idéia da fluidês de uma escória dada. As temperaturas de formação das escórias podem ser consideradas como 100° a 150° C mais elevadas que as representadas no diagrama.

4. *Agitação*: — A agitação da escória tem enorme importância pois ativa e apressa o intercâmbio (banho-escória). — Os meios de produzir essa agitação são os seguintes:

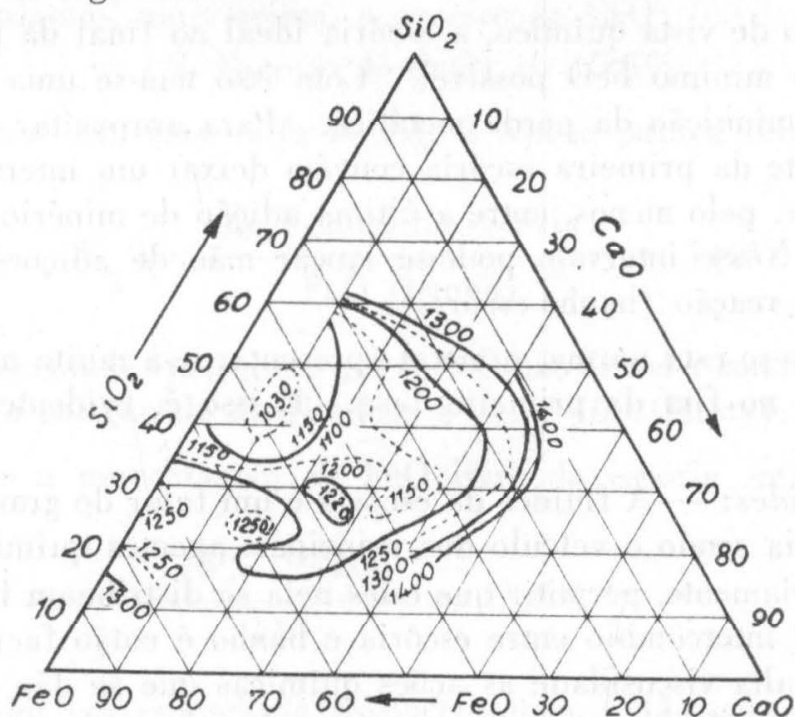
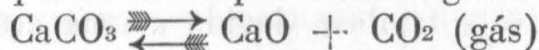


FIG. 13

1. Pela adição de calcáreo. O calcáreo decompõem-se e dá grande quantidade de gases que ao se desprenderem agitam a escória:



2. A adição de minério também provoca agitação não só pela reação com o C como devido à umidade do minério.



3. Agitação mecânica. Se necessário pode-se agitar a escória com uma barra. Chama-se à operação “bater a escória”.

5. *Temperatura*: — É importante pois tem influência na consistência e reatividade máxima.

RETIRADA DA ESCÓRIA: — Julgada terminada a oxidação necessária para baixar os teôres de Si, P, Mn, C, etc. aos valores desejados, procede-se à retirada da escória. A temperatura do metal deve ser sufi-

cientemente elevada para permitir essa retirada, sem começo de solidificação.

Uma bôa parte da escória pode ser retirada inclinando-se convenientemente o forno para trás e permitindo que ela simplesmente escorra. Isto deve ser feito com cuidado para evitar a saída de aço. Para acabar de retirar a escória pode-se lançar mão de rodos ou escumadores, de madeira ou de metal. Os eletrodos devem estar então levantados, e a força desligada. A escória é recebida n'uma caçamba apropriada.

A escória oxidante deve ser retirada o mais completamente possível. Caso contrário, os elementos nocivos nela contidos voltariam ao banho na 2.^a fase (reduzora). Porisso, para aglomerar as últimas porções de escória pode-se lançar sobre o banho algumas pás de cal. Isto facilita a operação.

2.^a FASE

Após a retirada da escória existirá no forno um banho de aço liquido apresentando as seguintes características:

1. Conterá, em maior ou menor quantidade, vários elementos dissolvidos: Mn, C, P, etc. O teor dêesses elementos, com exceção do enxofre, deve ser no máximo igual ao teor desejado no produto final (na verdade deve ser sempre inferior).

2. Conterá, em maior ou menor proporção, vários oxidos dissolvidos: FeO, MnO, SiO₂, etc. Sómente o primeiro pode ocorrer em quantidade apreciavel e é, portanto, o único a merecer consideração. O MnO e a SiO₂, são como já vimos, muito pouco solúvel no Fe liquido.

3. Conterá particulas não metálicas em suspensão. São produtos da oxidação levada a efeito na primeira fase, que não tiveram o tempo suficiente para atingir a escória. Trata-se principalmente de silicatos ou de particulas de (FeO + MnO).

4. Conterá gases dissolvidos: CO, H₂, etc.

Vê-se que o metal está, então, muito longe de ser aquilo que se poderia denominar um "aço de qualidade". Para chegar a este é preciso executar as seguintes operações:

1. — *Ajustar a composição*: introduzindo no aço os elementos necessários para conferir-lhe as propriedades desejadas. (A composição química é regulada por especificações apropriadas).

Prosseguir a eliminação do enxofre de modo a garantir um teor dentro da especificação. (Exceptua-se o caso dos aços "free-cutting").

2. — *Desoxidar o metal*, isto é, eliminar do metal o FeO dissolvido. A presença de FeO no aço afeta suas propriedades, comunidando-lhe tanto "red-shortness" como "cold-shortness". Causa tambem a evolução de

gases durante a solidificação. Isto não é um inconveniente no caso dos "rimmed", ou "semi killed steels", porém, quando se deseja obter lingotes perfeitos ou quando o aço se destina a peças moldadas, é preciso reduzir o teor de FeO a um mínimo.

3. — *Eliminar do metal as inclusões* de óxidos, silicatos, etc., oriundas da fase oxidante ou produzidas pela desoxidação.

4. — *Controlar a granulação* — Pela adição de elementos convenientes em quantidades apropriadas controla-se a granulação do aço. Obtem-se assim, á vontade, aços de granulação grosseira ("deep hardenable") ou de granulação fina ("shallow hardenable").

1. AJUSTAGEM DA COMPOSIÇÃO: — Para ter-se uma idéia da composição do metal recorre-se, em geral, à análise de uma amostra retirada logo no início da 2.^a fase. Essa análise determina os teores de C e Mn e, eventualmente, de Si, S e outros elementos.

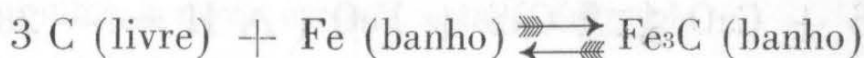
Teor de carbono: — Deve ser calculado de modo a ficar uns 2 ou 3 pontos acima do limite inferior da especificação. O teor de carbono final vai ser a soma:

- a) Teor de C do metal no fim da 1.^a fase.
 - b) Porcentagem introduzida pelas ferro-ligas.
 - c) Porcentagem absorvida da escória.
 - d) Recarburação efetuada.
- a) Vai depender não só do grau de oxidação desejado como também de b) e de c). Suficiente margem deve ser deixada devido a êstes dois fatores.
- b) A adição de ferro-ligas de alto teor de C introduz no banho uma certa porcentagem desse elemento. Assim, por exemplo, o ferro manganes contém usualmente de 5 a 6% de C.
- c) A manutenção de uma escória redutora e, eventualmente, fortemente carburetada implica na absorção de certa quantidade do C, pelo banho. Naturalmente esta absorção depende do grau de carburetação da escória, da temperatura, da superfície de contato, etc. Para forno de 1 ton. e escória francamente carburetadas, essa absorção é de 2 a 4 pontos por hora.
- d) A recarburação pode ser realizada pela adição de coque ou carvão de eletrodo. Esse processo é usado quando a recarburação a efetuar é grande; deve, porém, ser evitado.

A adição é feita no banho nú, logo após a retirada da escória. O coque deve ser de boa qualidade (pouca cinza, baixo enxofre); é usado de preferência coque granulado (cerca de 10 mesh) pois que em pedaços maiores a absorção seria dificultada e em pó muito fino uma grande por-

ção queimaria. O carvão de eletrodo (restos de eletrodos de grafite) é um material muito mais puro e deve ser usado quando possível.

Após a adição deve-se esperar 5 a 10 minutos para permitir a absorção:



A absorção é, para coque de bôa qualidade, de cerca de 60 a 65% (praticamente todo carbono fixo contido no coque é absorvido). Para carvão de eletrodo a absorção é maior (70 a 75%).

Para recarburização pequena (correções finais, por exemplo) adiciona-se *gusa de baixo teôr em fósforo ou "washed-metal"*. Êste é uma fonte de baixo teôr de Si, Mn, P e S, obtida no forno elétrico a partir de sucata e carvão de bôa qualidade ou pelo refino incompleto de fonte de Cubilot ou alto-forno. Por ser um material mais caro o "washed-metal" é empregado só no caso de aços de alta qualidade.

Note-se que a adição do gusa introduz também impurezas no metal. Deve porisso ser feita o mais cedo possível, na 2.^a fase, logo depois de conhecido o resultado da análise química.

Teôr de manganês: — Ê corrigido pela adição de ferro-manganês. Êste pode ser de alto ou baixo teôr de carbono. Em geral usa-se o de alto teôr por ser de custo mais baixo. Contem ele de 75 a 80% de manganês e 5 a 6% de carbono. Êste não precisa ser levado em conta no cálculo da composição final.

Visto que o processo elétrico permite a manutenção de uma escória fracamente redutora na 2.^a fase, a adição de ferro-manganês pode ser efetuada logo no inicio desta, sem perigo de perda. O manganês que porventura se oxide e suba à escória é imediatamente reduzido e volta ao banho.

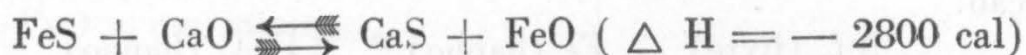
TEÔR DE SILÍCIO: — O silicio é adicionado na forma de ferro-silicio, que contem 45 a 50% ou 75 a 80% de Si, em geral. O teôr de carbono dessa ferro-liga é muito baixo e não necessita consideração, podendo ser considerado nulo. O silicio final vai ser igual à porcentagem adicionada menos a consumida na desoxidação. Esta última quantidade depende, portanto, da prática seguida (oxidação parcial ou total na 1.^a fase, desoxidação pelo Mn, desoxidação pela escória, etc.).

Teôr de enxofre: — Ao contrário dos outros elementos o teôr de enxofre deve ser ajustado não por adição mas sim por eliminação. Esta dá-se com facilidade na segunda fase devido à conjugação das duas circunstâncias:

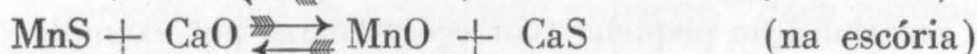
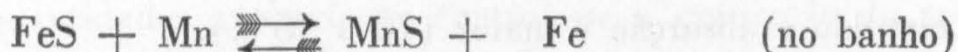
— forte basicidade.

— meio fortemente redutor.

Como foi visto, essas condições favorecem a reação



A presença de manganês favorece essa eliminação que é mais rápida quando realizada nos dois estágios seguintes:



2. DESOXIDAÇÃO DO AÇO: — Para eliminar o FeO dissolvido no metal o metalúrgista dispõe dos seguintes elementos:

a) *Contrôle da escória*: — Procura-se constituir uma escória redutora (em menor ou maior grau) que auxilie a eliminação de FeO do banho e impeça a ulterior oxidação deste pelo oxigênio do ar.

A escória desoxidante é uma mistura de cal, coque moído (= 25 mesh) e fluospato (CaF_2). A cal é a base, o coque o elemento redutor e o fluospato um fluidificante enérgico. Todos êsses materiais devem ser isentos de umidade. A mistura é preparada em proporção que depende da escória desejada (levemente redutora ou fortemente carburetada). A mistura que tem dado bom resultado no I. P. T. é a seguinte: 35 kg de cal, 7 kg de coque moído, 4 kg de fluorita.

Uma tal mistura produziria uma escória “empelotada”, não fosse a sílica formada pela ação desoxidante do silício adicionado (ferro silício). Esta sílica ajuda a formar uma escória de consistência apropriada.

Quanto ao poder redutor da escória, ela pode ser mantida fracamente redutora (branca, contendo muito pouco C) ou fortemente carburetada (cinzenta, contendo apreciável quantidade de CaC_2 , carbureto de cálcio). Esta segunda é muito mais ativa na eliminação do enxofre e do FeO, mas pode causar uma absorção de carbono não desejável.

A manutenção da escória conveniente é baseada nos seguintes fatores:

— A cal aumenta a basicidade e a viscosidade.

— O carvão aumenta o poder redutor, formando carbureto de cálcio CaC_2 .

— A fluorita aumenta a fluidês. (Esta ação está, no entanto, condicionada à presença do SiO_2).

A mistura de cal, coque e fluorita é lançada dentro do forno logo que se julgar terminada a recarburização ou logo depois da retirada da 1.^a escória. Desde que a temperatura seja suficientemente elevada, em cerca de 10 a 15 minutos a nova escória estará formada.

Poder desoxidante do carbono — O carbono presente na escória, ou adicionado ao banho na forma de “washed-metal”, é um elemento redutor, principalmente a temperatura elevada. O FeO do banho vai portanto reagir com o C (escória ou banho); como vimos anteriormente o teôr de $(\text{FeO})_b$ é, no equilíbrio, tanto menor quanto maior fôr $(\text{C})_b$. O gráfico da fig. 10 mostra, por exemplo, que o teôr de $(\text{FeO})_b$ em equilíbrio com $(\text{C})_b = 0,24\%$ seria $(\text{FeO})_b = 0,13\%$ (em média).

A desoxidação pelo carbono, é, porém, demorada (além de incompleta). Lança-se mão, porisso, de outros elementos mais ativos para apressar a desoxidação.

b) *Desoxidação pelo manganês*: — Já estudamos as condições de equilíbrio da reação.



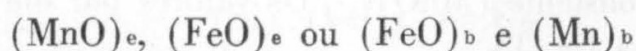
nas condições vigentes na fase oxidante.

Nessa fase o teôr de $(\text{FeO})_b$ aumenta sempre e o equilíbrio corresponde a um baixo teôr de $(\text{Mn})_b$ e um elevado teôr de $(\text{FeO})_b$. Na fase desoxidante, por em, a escória é praticamente isenta de FeO e MnO e assim a reação prossegue até que o teôr de $(\text{FeO})_b$ desça a um valôr baixo. O equilíbrio corresponderá então à saturação do metal com MnO dissolvido, saturação essa que se dá para valor extremamente baixo de $(\text{MnO})_b$.

O equilíbrio será dado por:

$$K_T = \frac{(\text{MnO})_b \cdot (\text{Fe})}{(\text{Mn})_b \cdot (\text{FeO})_b} = \frac{(\text{MnO})_b}{(\text{Mn})_b \cdot (\text{FeO})_b}$$

A determinação de $(\text{MnO})_b$ oferece enormes dificuldades (8). O problema é, então, diferente do existente na fase de refino. Nesta os termos que aparecem são:



todos eles facilmente determináveis. Na 2.^a fase, porém, é necessário conhecer $(\text{MnO})_b$ e porisso não se chegou ainda a um perfeito conhecimento de equilíbrio:

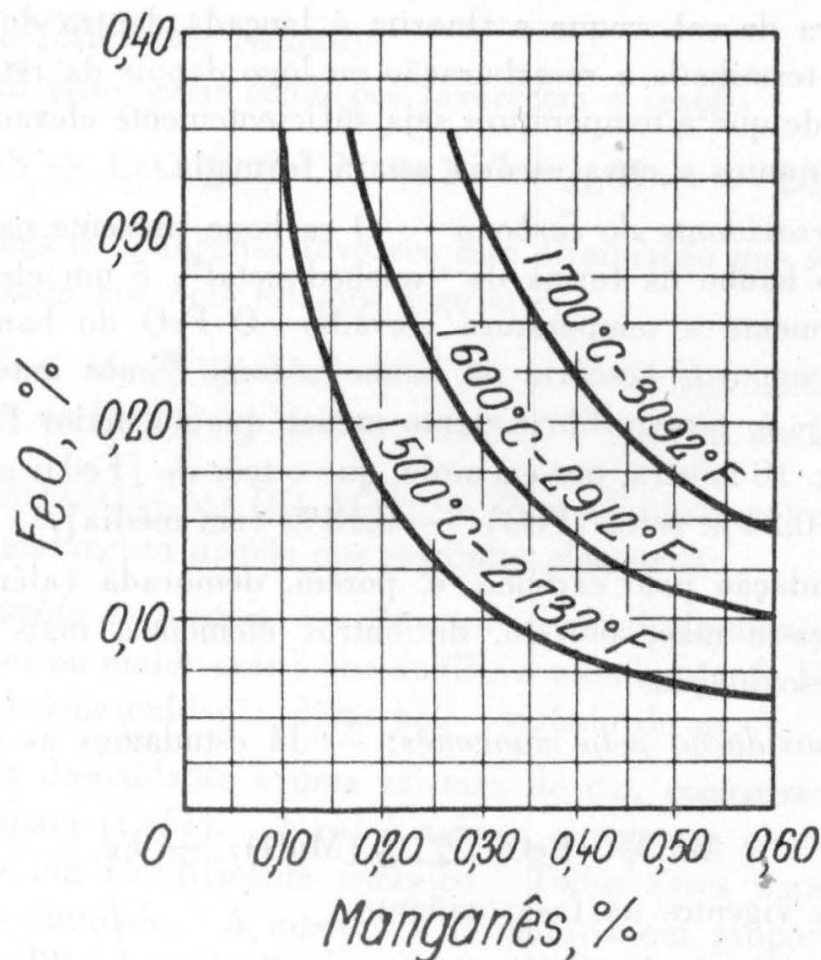


Fig. 14

$$K_T = \frac{(\text{MnO})_b}{(\text{FeO})_b \cdot (\text{Mn})_b}$$

Chipman fez a respeito considerações arbitrárias: admitiu como permanente, e correspondendo a um equilíbrio, a presença de inclusões de FeO-MnO no banho. Estas são, no entanto, quasi totalmente eliminadas do metal. Não é possível leva-las em conta quando se estuda o equilíbrio.

Herty, baseado em dados experimentais indica uma série de valores para o produto.

$$(\text{FeO})_b \cdot (\text{Mn})_b = K_T$$

admitindo como constante $(\text{MnO})_b$. Os valores por êle indicados acham-se representados na fig. 14.

Nota-se, tendo por base os valores indicados por Herty, que o manganês é um fraco desoxidante, um pouco mais fraco que o próprio carbono. Em suma, o manganês, só terá um efeito desoxidante, para aços de baixo

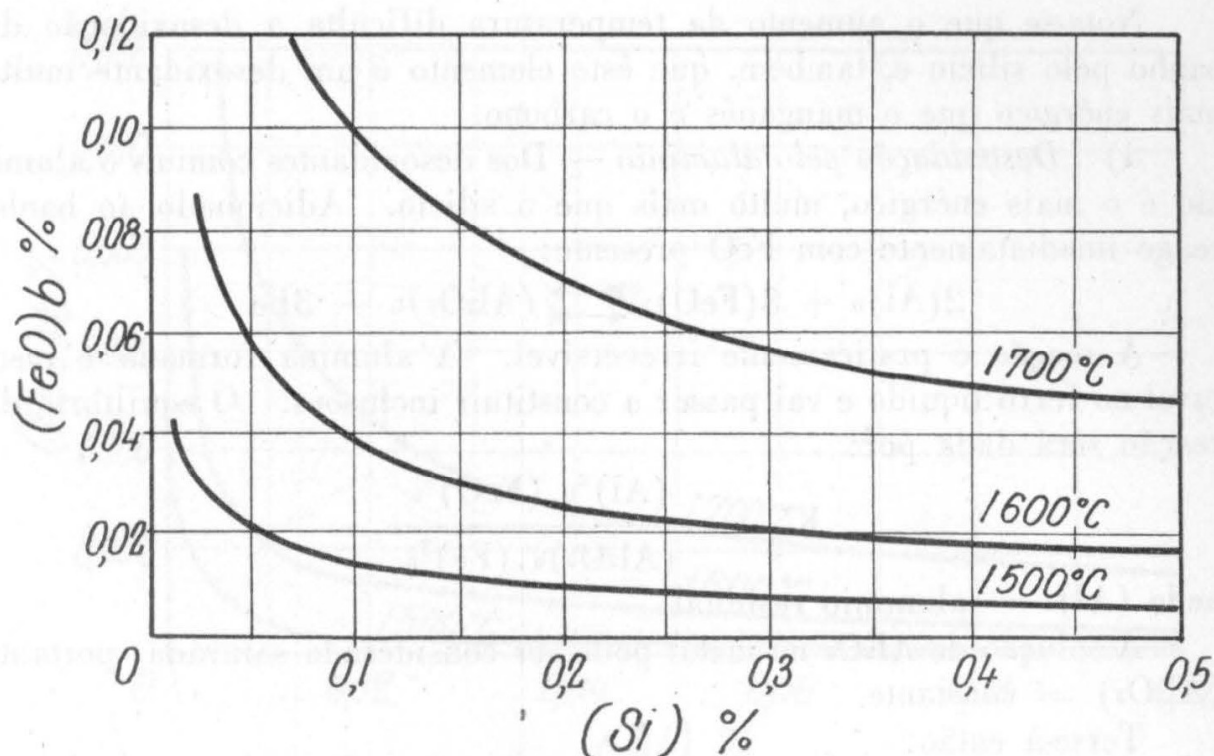


Fig. 15

carbono (com alto teor de $(\text{FeO})_b$), e esse efeito será tanto mais acentuado quanto mais baixa a temperatura.

c) *Desoxidação pelo silício* — A desoxidação do banho pelo Si baseia-se nas mesmas considerações teóricas já feitas no estudo da eliminação desse elemento.

Vimos que o equilíbrio da reação



pode ser expresso pela reação.

$$(\text{Si}) \cdot (\text{FeO})^2 = K_T$$

Valôr de K_T para $T = 1600^\circ\text{C}$ foi calculado por Chipman e determinado experimentalmente por Herty. Baseado neste último valôr Chipman recalculou o valor de K_T , indicando a relação:

$$\text{Log } K_T = \frac{30.200}{T} = 12,3$$

O gráfico (15) representa os valores que satisfazem à equação.

$$(\text{Si}) \cdot (\text{FeO})^2 = K_T$$

para $T = 1500^\circ\text{C}$, 1600°C e 1700°C .

Vê-se que, por exemplo, para $(\text{Si})_b = 0,25\%$ o teor de $(\text{FeO})_b$ será a 1600°C : $(\text{FeO})_b = 0,025\%$.

Nota-se que o aumento da temperatura dificulta a desoxidação do banho pelo silício e, também, que este elemento é um desoxidante muito mais enérgico que o manganês e o carbono.

d) *Desoxidação pelo alumínio* — Dos desoxidantes comuns o alumínio é o mais enérgico, muito mais que o silício. Adicionado ao banho reage imediatamente com FeO presente:



A reação é praticamente irreversível. A alumina formada é insolúvel no ferro líquido e vai passar a constituir inclusões. O equilíbrio da reação será dada por:

$$K'_T = \frac{(\text{Al})^2_b \cdot (\text{FeO})^3_b}{(\text{Al}_2\text{O}_3)_b \cdot (\text{Fe})^3_b}$$

onde $(\text{Al})_b =$ alumínio residual.

A solução de Al_2O_3 no metal pode ser considerada saturada: portanto $(\text{Al}_2\text{O}_3) =$ constante.

Ter-se-á então:

$$K_T = (\text{Al})^2_b \cdot (\text{FeO})^3_b$$

Nenhuma determinação experimental, do teor de FeO residual em presença de alumínio, deu resultado consistente.

A constante K'_T por isso, só pode ser calculada. Isto é feito partindo da variação de energia livre na reação. Chipman calculou a expressão que dá o valor de K_T em função da temperatura.

$$K_{1500^\circ\text{C}} = 4 \times 10^{-14}$$

$$K_{1600^\circ\text{C}} = 7 \times 10^{-13}$$

$$K_{1700^\circ\text{C}} = 4 \times 10^{-11}$$

$$\text{pois } \log K_T = \frac{62.700}{T} + 21,35$$

No gráfico (16) acham-se representados os teores residuais de $(\text{FeO})_b$ e $(\text{Al})_b$ em equilíbrio.

Vê-se que o poder desoxidante do alumínio é extraordinariamente maior que o do silício. Sua adição elimina praticamente todo o $(\text{FeO})_b$. Com efeito, vê-se que a 1600°C um banho com teor residual de

$$(\text{Al})_b = 0,03\%$$

conterá aproximadamente

$$(\text{FeO})_b = 0,001\% \text{ dissolvido}$$

Devido a ser facilmente oxidado o alumínio só é adicionado alguns minutos antes de vasar, ou então na panela. É adicionado puro ou sob forma de liga com Ca, Mn, etc.

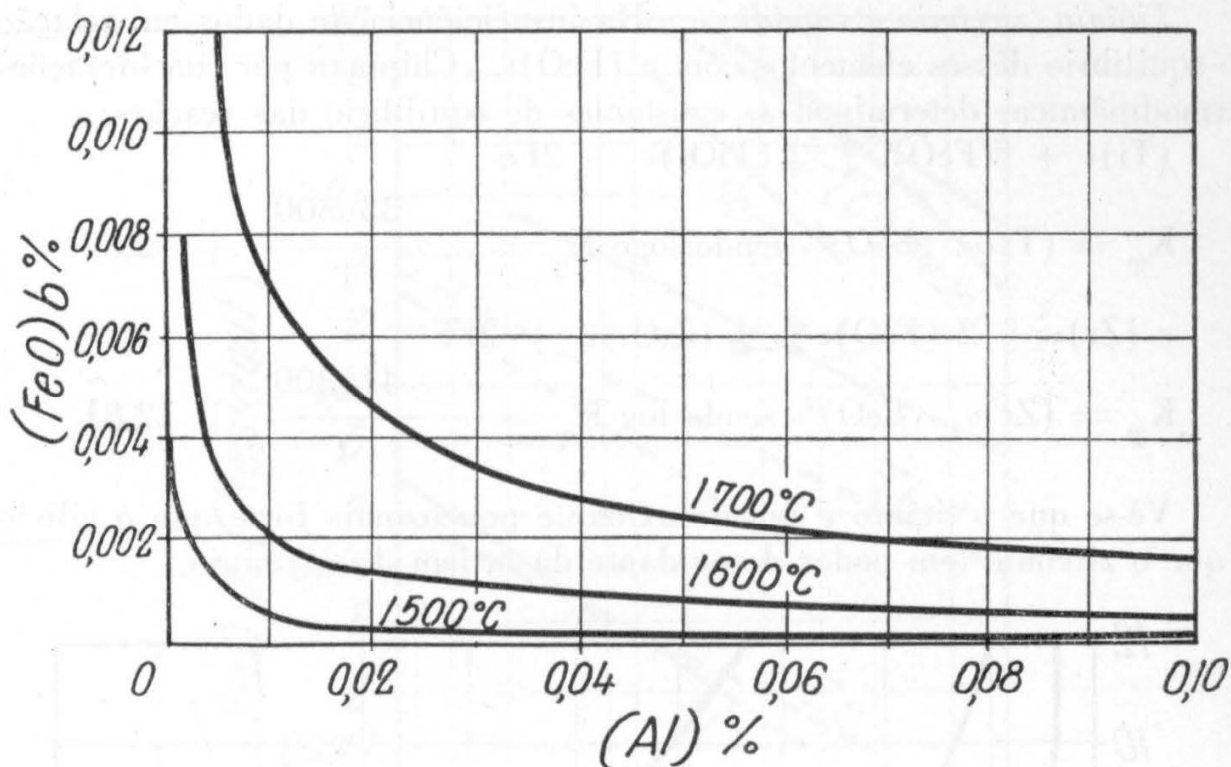


Fig. 16

e) *Outros desoxidantes — Efeitos do Cromo* — quando presente atua também como um desoxidante segundo a reação:



o equilíbrio seria dado por:

$$K'_T = \frac{(\text{FeO})^3_b \cdot (\text{Cr})^2_b}{(\text{Cr}_2\text{O}_3)_b}$$

e como $(\text{Cr}_2\text{O}_3)_b$ pode ser considerado constante, teremos:

$$K_T = (\text{FeO})^3_b \cdot (\text{Cr})^2_b$$

Chipman calculou o valor de K_T a partir da variação de energia livre da reação. Para 1500° C, 1600° C e 1700° C ter-se-à:

$$K_{1500^\circ\text{C}} = 0,4$$

$$K_{1600^\circ\text{C}} = 3,1 \times 10^{-2}$$

$$K_{1700^\circ\text{C}} = 16 \times 10^{-4}$$

$$\text{pois } \log K_T = - \frac{41.050}{T} + 40,4$$

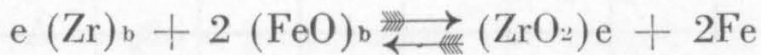
Na fig. 17 acham-se representados os valores de $(\text{Cr})_b$ e $(\text{FeO})_b$.

Verifica-se que quanto mais elevada a temperatura tanto menos cromo será oxidado a Cr_2O_3 . Isto é importante quando se deseja evitar a perda de cromo.

Titânio, zircônio e vanádio — Ha insuficiência de dados em relação ao equilíbrio desses elementos com o $(\text{FeO})_b$. Chipman por considerações termodinâmicas determinou as constantes de equilíbrio das reações:



$$K_T = (\text{Ti})_b \cdot (\text{FeO})_b^2 \text{ sendo } \log K_T = -\frac{33.300}{T} + 12,52$$



$$K_T = (\text{Zr})_b \cdot (\text{FeO})_b^2 \text{ sendo } \log K_T = -\frac{41.300}{T} + 12,81$$

Vê-se que o titânio é um desoxidante pouco mais forte que o silício e que o zircônio tem poder desoxidante da ordem do alumínio.

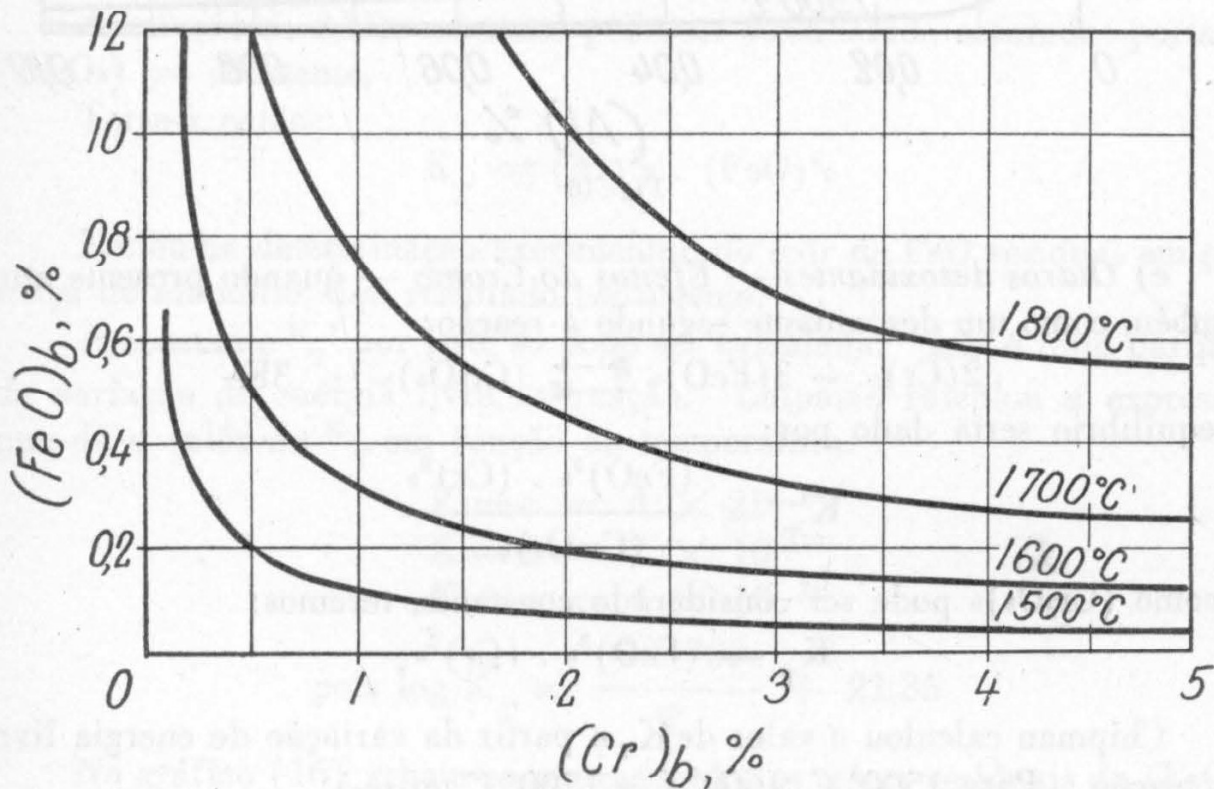


Fig. 17



$$K_T = (\text{V})_b^2 \cdot (\text{FeO})_b^3 \text{ sendo } \log K_T = -\frac{56.700}{T} + 21,1$$

De todos esses elementos o alumínio é, portanto, o mais potente desoxidante. No gráfico da fig. 18 acham-se indicados os poderes desoxidantes dos elementos a 1600° C, segundo Chipman. A curva relativa ao Mn foi modificada de modo a ficar com os valores indicados por Herty. Note-se o extraordinário poder desoxidante dos elementos alcalino terrosos.

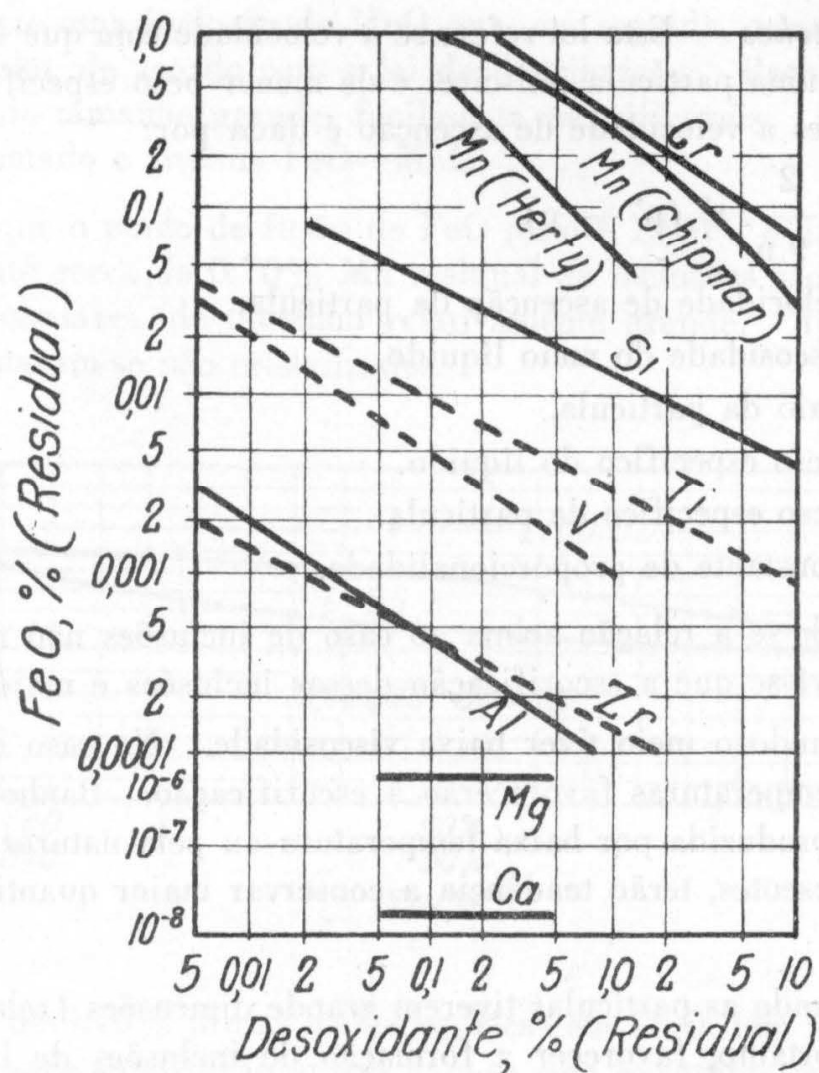


Fig. 18

Os elementos Ti, Zr e V são adicionados na forma de ferroligas, e o Ca é frequentemente usado na forma de liga com Al e Si, com Mn e Si, etc.

3. ELIMINAÇÃO DAS INCLUSÕES: — Estudamos os meios de que dispõe o metalurgista para efetuar a redução de FeO dissolvido no aço líquido. Vimos que essa redução pode ser mais ou menos completa, dependendo da natureza e da quantidade do desoxidante usado. Há a substituição de FeO solúvel no banho por outros óxidos e anidridos insolúveis. Se estes materiais não metálicos não forem eliminados do banho, o aço apresentar-se-á, após solidificação, com muitas inclusões.

A quantidade de aço (em termos de *homogeneidade e propriedades*) será muito prejudicada. É necessário, portanto, garantir a eliminação dos produtos da desoxidação. As inclusões sendo imiscíveis e de menor peso específico que o aço, subirão à escória, a ela incorporando-se.

Lei de Stokes — Esta lei refere-se à velocidade com que ascende num meio líquido uma partícula imiscível e de menor peso específico. Segundo a lei Stokes a velocidade de ascensão é dada por:

$$V = K \frac{2}{9n} \cdot r^2 (p' - p)$$

onde V = velocidade de ascensão da partícula.

n = viscosidade do meio líquido.

r = raio da partícula.

p' = peso específico do líquido.

p = peso específico da partícula.

K = constante de proporcionalidade.

Aplicando-se a relação acima ao caso de inclusões não metálicas no aço líquido, vê-se que a escorificação dessas inclusões é mais rápida:

1. Quando o meio tiver baixa viscosidade. No caso do aço, portanto, altas temperaturas favorecerão a escorificação. Banhos de grande viscosidade, produzida por baixa temperatura ou pela natureza e teor dos elementos presentes, terão tendência a conservar maior quantidade de inclusões.

2. Quando as partículas tiverem grande dimensões (relativamente). É preciso, portanto, favorecer a formação de inclusões de baixa tensão superficial, que coalesçam e formem partículas de grande diâmetro. Procura-se, então, formar inclusões de baixo ponto de fusão, visto que, para os materiais não metálicos usualmente presentes no aço como inclusões, pode-se considerar a tensão superficial em relação direta com a fluidês.

A influência dos pesos específicos é praticamente constante no caso de inclusões no aço e não precisa ser levada em conta.

MATERIAIS NÃO METÁLICOS PRESENTES APÓS DESOXIDAÇÃO

a) *Desoxidação pelo manganês*

Quando se adiciona somente manganês formam-se no aço inclusões constituídas por misturas homogêneas de FeO e MnO. Estes óxidos são miscíveis em qualquer proporção; a relação entre FeO e o MnO vai depender simplesmente da quantidade de Mn adicionado e da quantidade de FeO existente no banho. Se a quantidade de Mn adicionada é pequena forma-

se inicialmente uma inclusão de MnO que, em seguida, começa a absorver FeO do banho, de acordo com a lei da distribuição. Resultam inclusões globulares de tamanho grande, facilmente escorificáveis. No gráfico 19 está representado o sistema FeO—MnO.

Vê-se que o ponto de fusão de FeO puro é 1370°C e do MnO puro é 1590°C. Até cerca de 0,70% Mn residual as inclusões são do tipo mencionado: globulares, de tamanho relativamente grande. Após solidificação apresentaram-se não cristalizados.

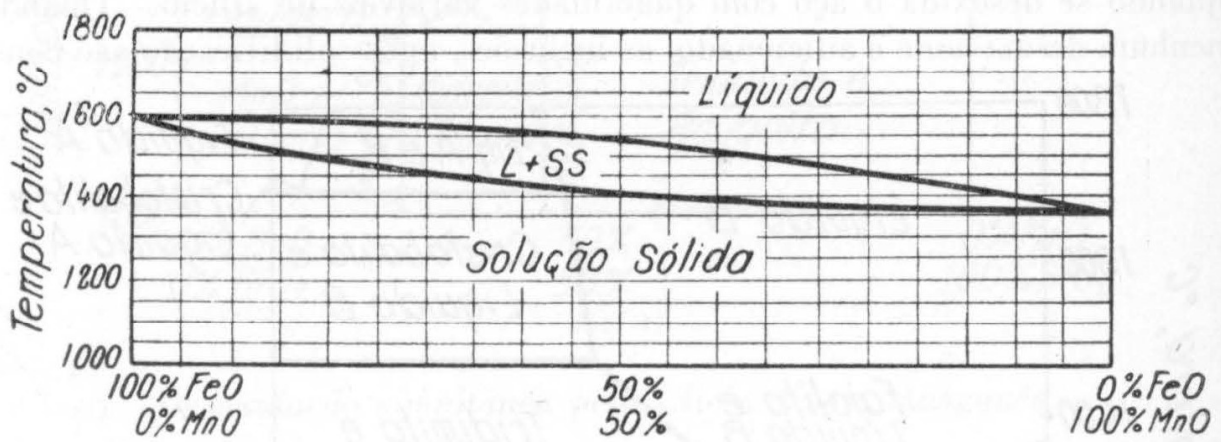


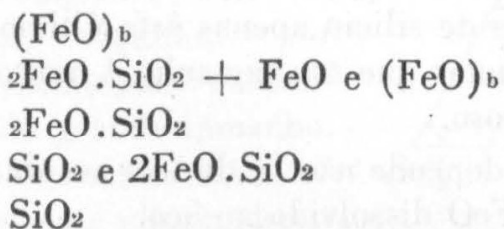
Fig. 19

Acima de 0,70% Mn as inclusões, ricas em MnO, têm ponto de fusão mais alta e após solidificação apresentam-se com estruturas cristalina. Em conclusão — a desoxidação do aço pelo Mn produz inclusões fusíveis, coalescendo facilmente (isso até Mn residual = 0,70%).

b) Desoxidação pelo silício

Sabemos que o silício reduz o FeO e passa a SiO₂. Em presença de FeO, em excesso, vai formar-se silicato de ferro. Se o excesso de FeO for maior ainda, a inclusão de silicato ferroso absorve FeO do banho, procurando atingir o equilíbrio distributivo com este.

A sequência seria, portanto, para teores crescentes de silício:



(No gráfico 20) acham-se representado o sistema FeO—SiO_2 . Vê-se que inclusões com teor de sílica até cerca de 60% tem ponto de fusão mais baixo que o Fe. São fusíveis e coalescem em particular globulares de diâmetro relativamente grande. Acima de 60% de SiO_2 o ponto de fusão se eleva rapidamente: as inclusões formadas quando se adiciona um grande excesso de Si são vitreas e constituídas quasi somente de sílica. Coalescem muito dificilmente sendo, portanto, de eliminação mais demorada.

Herty realizou investigações em torno da natureza das inclusões quando se desoxida o aço com quantidades variáveis de silício. Quando nenhum desoxidante é adicionado, as inclusões, após solidificação são cons-

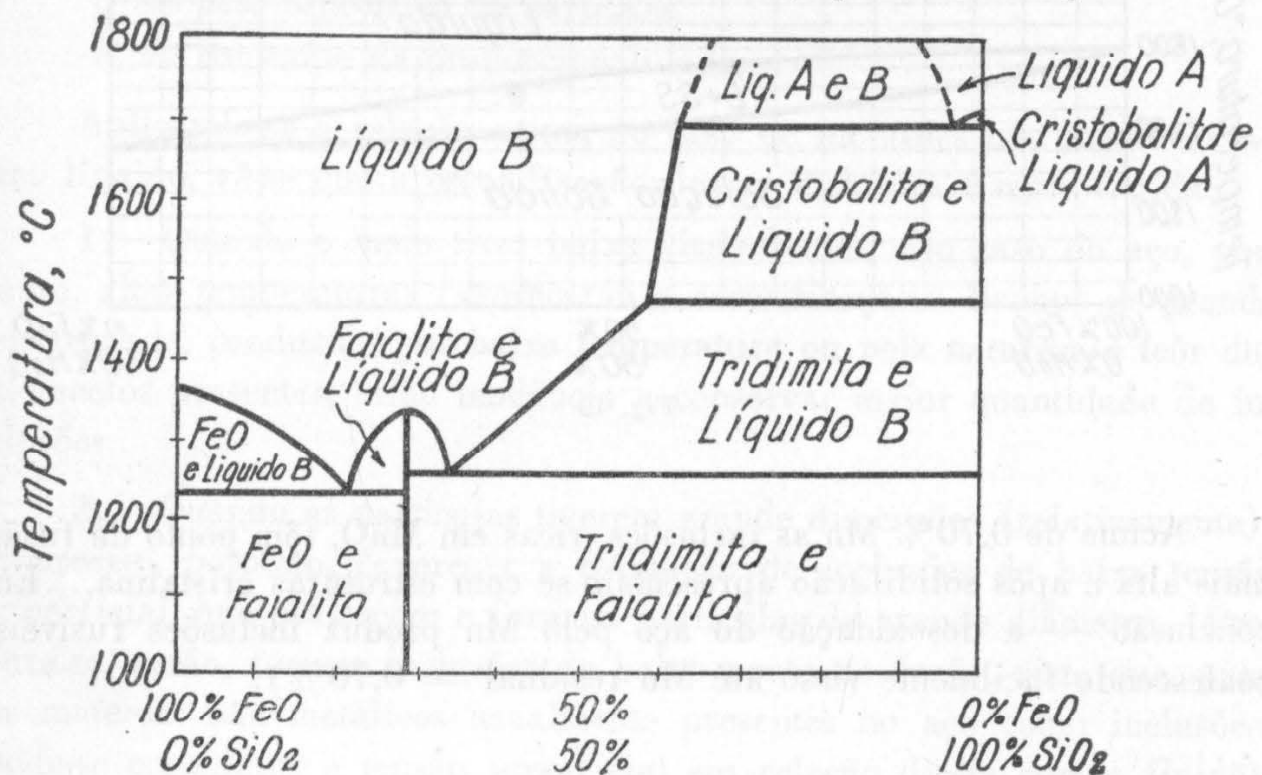


Fig. 20

tituidas por FeO primitivamente em solução. Apresentam-se em grande número, sendo globulares e de pequeno tamanho. Adicionando silício de modo a obter um teor residual de cerca de 0,30% Herty (9) verificou que as inclusões, apresentavam-se como grandes glóbulos de silicato ferroso. Com cerca de 0,16% de silício residual, ao lado destas aparecem outras inclusões também globulares mas transparentes (vitreas) constituídas quasi somente por SiO_2 . Para maiores teores de silício apenas este último tipo de inclusões foi observado. Deve-se notar que seu tamanho é muito menor que o das inclusões de silicato ferroso.

Evidente, a natureza das inclusões depende não só do teor residual de silício como também do teor inicial de FeO dissolvido no aço.

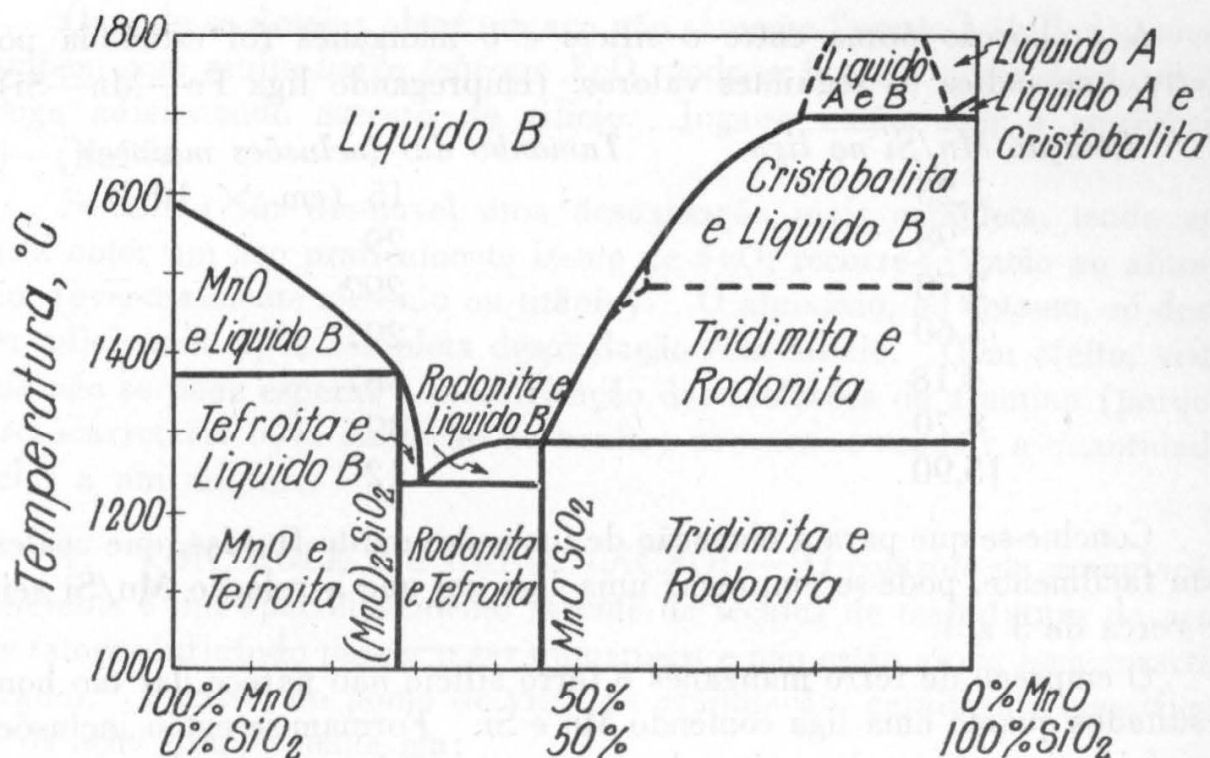


Fig. 21

c) *Desoxidação simultânea pelo silício e pelo manganês:*

A adição de silício e manganês simultaneamente acarreta a formação de silicatos duplos (Mn e Fe). O sistema (Mn—SiO₂) é muito semelhante ao sistema FeO—SiO₂ (como se pode ver comparando a fig. 21 à fig. 20). Em ambos os sistemas, o ponto de fusão mais baixo, é 1230° C, correspondendo a 78% FeO e a 68% MnO. No sistema ternário MnO-FeO-SiO₂ aparecem, no entanto, composições com ponto de fusão ainda mais baixo (gráfico 22).

O emprego de manganês e silício simultaneamente, como desoxidantes, permite a formação de compostos mais fusíveis; resultam, por coalescimento, partículas de grande tamanho, que podem ser mais rapidamente eliminados.

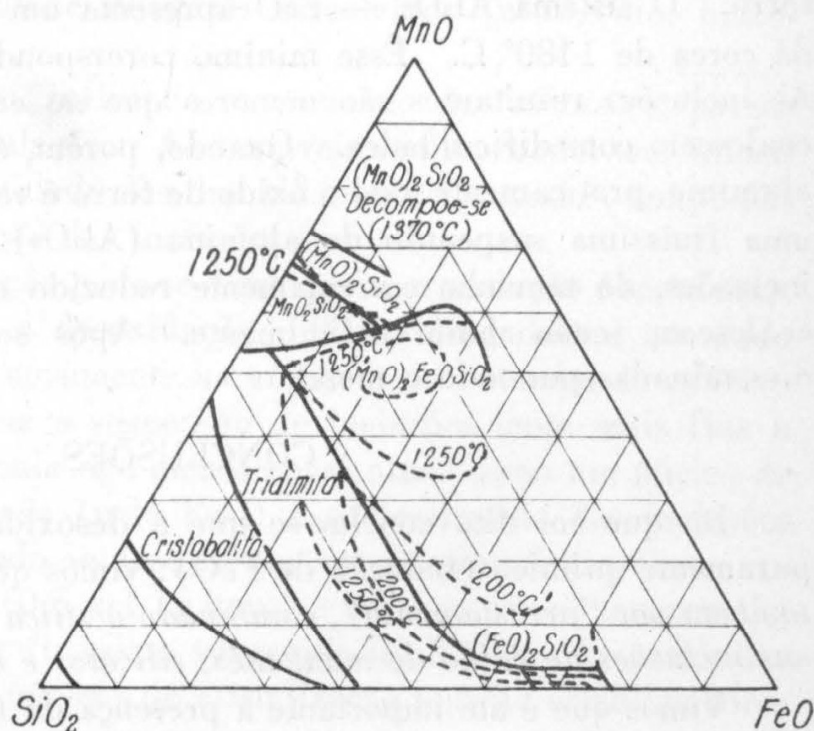


Fig. 22

A proporção ótima entre o silício e o manganês foi estudada por Herty, que indica os seguintes valores: (empregando liga Fe—Mn—Si).

<i>Relação Mn/Si na liga</i>	<i>Tamanho das inclusões maiores</i>
1,25	15 (cm \times 10 ⁻⁴)
1,98	29
2,78	292
3,60	297
4,18	367
8,70	39
15,90	12

Conclue-se que para a obtenção de inclusões muito fluidas, que coalesçam facilmente, pode-se empregar uma liga em que a relação Mn/Si seja de cerca de 3 a 4.

O emprego de ferro manganês e ferro silício não parece dar tão bons resultados quanto uma liga contendo Mn e Si. Formam-se então inclusões de vários tipos, havendo muitas de pequeno tamanho constituídas quasi só por SiO₂.

d) *Desoxidação pelo alumínio:*

O produto da reação entre o alumínio e o FeO é, como sabemos, a alumina (Al₂O₃). Do mesmo modo que no caso do manganês e do silício, se insuficiente alumínio é adicionado, a alumina formada vai ser escorificada pelo (FeO)_b residual. Formam-se inclusões de aluminato de ferro. O sistema Al₂O₃ — FeO apresenta um ponto em que a fusão se dá cerca de 1480° C. Esse mínimo corresponde a 55 a 60% de Al₂O₃. As inclusões resultantes são menores que no caso de silicato de ferro e coalescem com dificuldades. Quando, porém, se adiciona um excesso de alumínio, praticamente todo o óxido de ferro é reduzido, formando-se então uma finíssima suspensão de alumina (Al₂O₃) no banho líquido. Tais inclusões, do tamanho extremamente reduzido e em grande número, não coalescem senão muito dificilmente. Após solidificação apresentam-se disseminadas por todo o metal.

CONCLUSÕES

Do que foi dito conclue-se que a desoxidação não é um fenômeno puramente químico (redução de FeO); vimos que este pode ser eliminado *tambem por "arrastamento", combinado à sílica ou alumina, ou dissolvido nas inclusões de óxido de manganês, silicatos e aluminatos.*

Vimos que é até importante a presença de (FeO)_b residual para facilitar a escorificação dos produtos de desoxidação.

Quando se desejar obter um aço não somente “morto” (killed), como também com muito baixo teor em FeO, pode-se levar a desoxidação mais longe adicionando excesso de silício. Joga-se então com o equilíbrio $\text{Si}-(\text{FeO})_b$.

Se ainda fôr desejável uma desoxidação mais completa, tendo em vista obter um aço praticamente isento de FeO, recorre-se então ao alumínio, (eventualmente zircônio ou titânio). O alumínio, no entanto, só deve ser adicionado após completa desoxidação com silício. Com efeito, visto que não se pode esperar a escorificação das inclusões de alumina (porque isso acarretaria nova oxidação do banho) procura-se reduzir a quantidade delas a um mínimo.

4. **CONTRÔLE DE GRANULAÇÃO:** — O contrôle de granulação inerente é um aperfeiçoamento recente da técnica de manufatura do aço. Os fatores influindo parecem ser numerosos e não estão ainda bem caracterizados. Porisso, do ponto de vista da granulação, geralmente classifica-se os aços simplesmente em:

- aços de granulação fina (“shallow hardening”).
- aços de granulação grosseira (“deep hardening”).

Contudo, numa mesma aciaria, produzindo somente um dado tipo de aço é possível determinar métodos de trabalho que conduzem a uma granulação conveniente.

Aparentemente a granulação é determinada por:

- Natureza, quantidade, dimensões e distribuição das inclusões.
- Natureza e quantidade de gases dissolvidos (nitrogênio, hidrogênio).

O grau de desoxidação, influindo na natureza das inclusões, parece influir diretamente na granulação. As variáveis são, portanto, teor inicial do $(\text{FeO})_b$, natureza e quantidade dos desoxidantes empregados, tempo das adições, grau de escorificação das inclusões resultantes, etc.

Em primeira aproximação pode-se dizer que a granulação é tanto mais fina quanto mais completa a desoxidação. Isso é verdade até um dado valor, ótimo. Além disso, novamente ha aumento do tamanho do grão.

Isto é, quanto mais fina a suspensão de inclusões tanto mais fina a granulação, pois cada partícula não metálica vai atuar como um núcleo de cristalização. A escorificação (pelo FeO) e coalescimento das inclusões deve, pois, ser evitada quando se desejar um aço de granulação fina.

A adição de alumínio (0,5 a 1 kg/ton.) a um aço completamente desoxidado pelo silício produz finíssima suspensão de Al_2O_3 . As partículas de alumina vão atuar como núcleos de cristalização e como estabilizadores da fina granulação obtida.

Se fôr usada uma quantidade excessiva de silício ou alumínio o aço resultante poderá ter granulação francamente grosseira. Êsses elementos começam então a influir pela formação de ligas e não como desoxidantes.

Os gâses eventualmente presentes no aço também parecem influir na granulação. Essa influência ainda não está bem definida. É possível que sejam eles os responsáveis por certos efeitos de hereditariedade observados em relação à granulação dos aços. Sabe-se, por exemplo, que um aço obtido a partir de gusa ou sucata de má qualidade dificilmente apresentará tão bons característicos como um outro obtido a partir de sucata escolhida.

CONTROLE E REGISTRO DA OPERAÇÃO: — Para permitir um controle de custo de produção é indispensável o uso de *fichas de corrida*. Estas, para serem completas, deve ser capazes de fornecer a qualquer tempo as seguintes informações:

Usina de Metalurgia - I. P. T.				FORNO HEROULT			
NAT. DO PRODUTO Aço 1020 S.A.S.				DATA: 9 - 2 - 1944		CORRIDA N.º 794	
COMPOSIÇÃO DESEJADA							
C	0,15 0,25	Mn	0,30 0,50	Si	0,15 min.	P	0,045 0,055
COMPOSIÇÃO OBTIDA							
C	0,16	Mn	0,30	Si	0,25	P	0,043
CARGA METALICA				CARGA NÃO METALICA		PESO	
Sucata compr. "Gomes"	900 kg			Mín Fe	37		
Sucata nossa				Mín Mn	0		
Gusa (baixo P)	100			Calcáreo	103		
Restos				Cal	82		
				Flocspato	5		
FeSi	11			C. mad.			
FeMn (AC)	3,2			Coque	7		
FeMn (BC)							
FeCr							
Ni eletr.							
Ox. Mo							
TOTAL				TOTAL		TOTAL	
1.014,2				873		1.570	
REND. UTIL. 86,0%				REND. MET. 86,0%			
ESTADO DO FORNO				FANELA N.º 2		N.º/Pax. 1	
N.º/Abobada 65	N.º/Revest. 13	N.º/Sela 2	Est. antes 0.K. (nova)		Modo de		
Est. antes 0.K.	Est. antes 0.K.	Est. antes 0.K.	Est. depois 0.K.		a lenha		
Est. depois 0.K.	Est. depois 0.K.	Est. depois 0.K.	Valvula 3/4" C.S. Cast.		Temp.		
			Tampão C. Americ.		Cabo quente		
			Tubos U.S. Cast.		Sim		
MODO DE FAZER A CARGA				INCIDENTES & OBSERVAÇÕES			
4 pás de MFe na carga							
4 " " calcáreo na carga							
				(Eng. responsável)			
				(Forneteiro)			

Fig. 23

- Material que se teve em vista obter (composição e quantidade).
- Material obtido (composição e quantidade) .
- *Materiaes consumidos* (incluindo eletrodos, energia etc.).
- *Estado do aparelhamento antes e depois da corrida* (forno, painéis, lingoteiras).
- *Modo de operação* (relatório sucinto da corrida).

HORA	OPERAÇÃO
8.00	F. ligada - Tap I
9.00	4 pás de calcáreo
9.40	5 " " " Tudo fundido. Tap II
9.45	1a. Prova para laboratório (análise posterior). Banho frio. 2 pás de calcáreo mais 2 pás de M.Fe.
9.55	Retirada parte da escória.
10.00	2 pás de M.Fe. mais 3 pás de calcáreo.
10.05	1 pá de M.Fe. mais 3 " " "
10.07	4 pás de calcáreo.
10.15	4 " " "
10.43	2a. Prova para laboratório (análise posterior) (Metal e Escória)
10.43	2 pás de cal. Início da retirada da escória.
10.52	Fim da retirada da escória.
10.54	2 kg de Fe Silício mais 6 pás de mistura (35 + 7 + 4)
11.07	3a. Prova para laboratório (análise posterior)
11.08	3 kg de Fe Silício mais 2,4 kg de Fe Manganês.
11.16	4a. Prova para laboratório (C. e Mn - boca do forno)
11.17	2 kg de Fe Silício mais mistura.
11.32	C = 0,18% Mn = 0,26%
11.45	0,8 kg de Fe Manganês mais 1 kg de Fe Silício mais mistura.
11.57	1 kg de Fe Silício
	Prova de forja - oxidada.
12.07	1 kg de Fe Silício
	Prova de forja - O.K.
12.20	Prova de temperatura - O.K.
	1 kg de Fe Silício
12.25	Vazamento
	Resultado das análises
	1a. Prova - C = 0,33 % Mn = 0,11 % Si = 0,12 % P = 0,091 % S = 0,044 %
	2a. " - 0,06 % 0,03 % - 0,002 0,046
	3a. " - - - 0,17 % - 0,042
	4a. " - 0,18 % 0,26 % 0,14 % - 0,020
	Análise da escória: SiO ₂ - 11,2 % Al ₂ O ₃ - 1,68 % FeO - 26,3 %
	MnO - 3,68 % CaO - 45,5 % MgO - 9,4 %
	P ₂ O ₅ - 1,22 %

Fig. 24

Como exemplo incluímos uma ficha de corrida, da Usina de Metalurgia do I. P. T., ficha essa elaborada segundo os princípios enumerados acima. (figs. 23 e 24).

A corrida registrada nessa ficha não pode no entanto, ser considerada uma corrida regular; procuramos atingir na 1.ª fase da mesma um relativo estado de equilíbrio entre a escória e o banho, com o intuito de tentar verificar as relações de composição então existentes. Para isso retiramos amostra do metal e da escória pouco antes de retirar esta última.

Pelo resultado da análise podemos calcular o *teôr de (FeO)_b* a formula já indicada é:

$$(FeO)_b = \frac{0,01}{(C)_b} + 0,09$$

No caso:

$$(FeO)_b = \frac{0,01}{0,06} + 0,09 = 0,167 + 0,09 = 0,257\%$$

Por outro lado já vimos que, em média, pode-se adotar para condições normais de trabalho:

$$\frac{(FeO)_e}{(FeO)_b} = 100$$

Podemos então calcular $(FeO)_e$:

$$(FeO)_e = 100 (FeO)_b = 100 \times 0,257\% = 25,7\%$$

Óra, a análise da escória nos deu:

$$(FeO)_e = 26,3\%$$

Vê-se que a concordância foi boa.

O que na ficha chamamos *rendimento metálico* é a relação entre o peso total do aço saído do forno e o peso total dos materiais metálicos carregados.

O *rendimento útil* é a relação entre o peso de aço utilizavel (vendavel) e o peso total de materiais metálicos carregados.

REFERÊNCIAS

- 1 — Rassbach Trans. Am. Soc. Metals.
- 2 — Herty — Bulletin n.º 68 — A. I. M. M. E..
- 3 — Chipman — Trans. Am. Soc. Metals — 1934.
- 4 — E. Cook — Open-Hearth Steel Making.
- 5 — Making, Shaping and Treating of Steel — U. S. S.
- 6 — Larsen — Controlling Open Hearth Making — U. S. S.
- 7 — Herty — Slag Control — A. I. M. E. — Iron & Steel Div. 1940.
- 8 — Oberhoffer & Shenck — Stahl und Eisen — 1927.
- 9 — Herty — Bulletin n.º 69 — A. I. M. M. E.