

USO DE ATMOSFERA CONTROLADA EM FORNO ELÉTRICO BÁSICO ⁽¹⁾

CARLOS AURELIO DOMPIERI ⁽²⁾

LUIZ C. CORRÊA DA SILVA ⁽³⁾

RESUMO

São relatadas experiências preliminares feitas na Seção de Aços do I.P.T. de São Paulo, visando o controle da atmosfera durante a segunda fase (redução) da operação. Indica-se um meio simples para obter condições perfeitamente redutoras, pelo gotejamento de óleo combustível dentro da câmara do forno. São apontadas vantagens e desvantagens desse método.

1. INTRODUÇÃO

De todos os aparelhos de produção de aço em grandes tonelagens (Bessemer, Thomas, L. D., Siemens-Martin, forno elétrico) é o forno elétrico que permite o melhor controle térmico e físico-químico. É o único processo que dá ao metalurgista completa independência do ponto de vista térmico, simultaneamente com a possibilidade de criar condições fortemente redutoras (além das condições oxidantes, que todos os processos permitem ou exigem). Em todos os outros processos, é essencial a introdução de gases ou combustíveis na câmara do forno, o que impossibilita a manutenção de condições redutoras durante períodos longos da operação. Nos processos Bessemer e Thomas, é essencial a insuflação de ar através do próprio banho; no processo L. D. a injeção de oxigênio puro é a base do processo; no processo Siemens-Martin o aquecimento do banho é feito por combustão que se realiza na própria câmara do forno, combustão essa que, por óbvias razões econômicas, deve ser tão completa quanto possível, o que implica em condições fortemente oxidan-

(1) Contribuição Técnica n.º 403. Apresentada ao XV Congresso Anual da ABM; São Paulo, julho de 1960.

(2) Membro da ABM. Engenheiro da EPUSP e Assistente Aluno do Instituto de Pesquisas Tecnológicas; São Paulo, SP.

(3) Membro da ABM. Doutor Engenheiro; Chefe da Seção de Aços do Instituto de Pesquisas Tecnológicas; Professor Interino de Siderurgia da EPUSP; São Paulo, SP.

tes. No forno elétrico não há necessidade de insuflação de quaisquer gases: as reações de refino dependem da ação de escórias de características apropriadas.

A operação típica de forno elétrico é feita em dois períodos característicos:

- Período oxidante ou “1.^a fase” (escória oxidante)
- Período redutor ou “2.^a fase” (escória redutora)

Para a obtenção de condições redutoras, peculiares ao forno elétrico, o metalurgista lança mão de escórias produzidas por misturas apropriadas de cal (às vezes calcário), fluorita (CaF_2) e redutores que podem ser: carvão, carbureto de cálcio (CaC_2), ferro-silício, etc. Típicas são as escórias seguintes:

- “*Escória cinzenta*” — Em que se usa carvão (geralmente moinha de coque de boa qualidade) como redutor, o que confere à escória uma cor cinzenta.
- “*Escória branca*” — Em que o redutor usado é o ferro-silício moído (outras ligas mais caras são às vezes usadas). Este tipo de escória é imprescindível quando se deseja uma escória redutora sem carbono, para produção de aços de teor muito baixo deste elemento (aços cementação, inoxidáveis, etc.).

É preciso levar em conta, porém, que o forno não é completamente fechado e que, mesmo que se evite abrir suas portas, há sempre uma forte tiragem que introduz ar pelas frestas das portas. Embora a altura seja pequena, o fato dos gases dentro do forno estarem a uma temperatura da ordem de 1600°C (o que lhes confere uma densidade comparável à do hélio) torna o forno equivalente a uma chaminé de muitas dezenas de metros de altura.

Como resultado dessa tiragem forte e da contínua penetração de ar no forno, o controle da condição redutora da escória fica dificultado, às vezes muito seriamente. A manutenção da escória redutora é uma verdadeira batalha entre o forneiro e o ar que penetra no forno. Quando o aço a produzir é de alto carbono, o forneiro pode lançar mão de adições abundantes de carvão à escória, e a batalha fica decidida a seu favor. Quando o aço é de baixo carbono, é mais difícil garantir condições redutoras sem o perigo de apreciável “pick up” de carbono. Somente forneiros de grande experiência conseguem consistentemente sucesso nesse controle, que implica em fazer adições justas de carvão (ou outros redutores) sem que, por incorporação, seja alterada de modo indesejável a composição do banho.

2. OBJETIVOS DO ESTUDO FEITO

Levando em conta as considerações acima, parece evidente que se pudermos evitar a introdução de ar no forno durante o período redutor estaremos simplificando enormemente a tarefa do forneiro, principalmente no caso de aços de baixo carbono. Ocorreu-nos então a idéia de tentar criar, e manter, uma atmosfera neutra ou redutora na câmara do forno elétrico, independentemente de adições à escória. O problema é o de manter no aparelho uma *atmosfera controlada*, à semelhança do que se faz nos fornos de tratamento térmico ou superficial. Uma atmosfera ideal no caso em questão, deveria ter as seguintes características principais:

- Eliminar do forno todo oxigênio presente e impedir a entrada de ar (pressão positiva no interior do forno).
- Ter tal composição que garanta a total redução de qualquer óxido de ferro presente na escória (ou no próprio refratário da câmara do forno). Para isto seria essencial a presença de CO, H ou hidrocarbonetos na atmosfera a ser criada no forno.
- Não conter nitrogênio, o que permitiria produzir aço de forno elétrico de baixo teor deste elemento, prejudicial à ductilidade de certos aços.
- Não conter hidrogênio (o que elimina este gás e os hidrocarbonetos de entre os redutores possíveis). O hidrogênio sabidamente pode causar “flocos” e a “subida” dos lingotes, além de outros defeitos e inconvenientes.
- Ser de baixo preço e de fácil operação.

Por outro lado, dentre as atmosferas que poderíamos considerar as mais viáveis teríamos as seguintes:

- 1 — Atmosfera de gases nobres. Seria absolutamente inerte mas de elevado preço e sem qualquer poder redutor.
- 2 — Atmosfera de gás de gasogênio. Sempre conteria certa porcentagem de H e elevada porcentagem de N. Teria a grande vantagem do baixo custo.
- 3 — Atmosfera de hidrocarbonetos (óleos, querosene, álcool, etc.). Teria a desvantagem da presença de H.
- 4 — Atmosfera de N. Dependendo da localização da usina e suas instalações, uma tal atmosfera poderia ser de baixo preço. Seria inerte, do ponto de vista físico-químico, exceto pelo fato de que o aço resultante teria N igual ou mais elevado que normalmente.

Interessados em experimentar a idéia (do uso de atmosfera controlada no forno elétrico básico) imediatamente, para aquilatar da sua exequibilidade e seu efeito sôbre a operação do forno, escolhemos a possibilidade 3 para experiências preliminares. São os resultados dessas experiências que são relatados neste trabalho. Mais especificamente, as experiências preliminares aqui relatadas visaram:

- Verificar a exequibilidade da manutenção de uma atmosfera decididamente redutora no forno elétrico básico, de 1 tonelada de capacidade, da Secção de Aços do IPT.
- Tentar, por simples e imediata, a obtenção dessa atmosfera por gotejamento de óleo Diesel no interior da câmara do forno.
- Verificar a intensidade do eventual “pick up” de carbono e hidrogênio pelo uso dessa atmosfera.
- Aquilatar os efeitos do emprêgo da atmosfera controlada redutora, como a escolhida, sôbre a marcha do forno. Mais especificamente, seu efeito sôbre o contrôle da escória, do ponto de vista do forneiro.

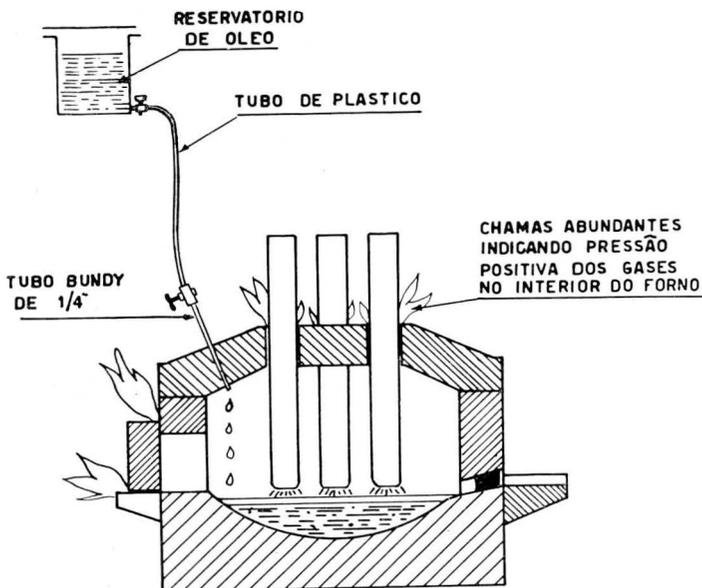


Fig. 1 — Indicação esquemática do equipamento utilizado nas experiências relatadas.

TABELA I

Sumário dos dados experimentais

		EXPERIENCIAS			
		Nº I	Nº 2	Nº 3	Nº 4
<u>1ª Fase</u>					
Sucata carregada (kg)		900	950	950	850
Ferro Fundido (kg)		100	50	50	50
<u>2ª Fase</u>					
Fundentes 2ª fase (kg)		60	43	39	45
Relação CaO / CaF ₂ (2ª fase)		7/1	6/1	6/1	3,5/1
Carvão (kg)		6,3	-,-	-,-	-,-
CaC ₂ (kg)		-,-	7,0	5,0	-,-
Si adicionado (como FeSi) (kg)		4	3	3,60	3,60
Mn adicionado (como FeMn) (kg)		4	4	3,2	1,6
Óleo Diesel usado (litro)		1,0	5,0	5,5	7,0
<u>Observações :</u>					
Tempo total de 2ª fase (reductora)		1,50	1,30	1,40	1,25
Peso de Escória -2ª Fase- (resultante)		75	50	75	65
Prova de Forja		Regular-Ra chou um pou- co)	Otima -,- -,-	Otima -,- -,-	Otima -,- -,-
Aspecto Escória - 2ª Fase		Cinza ; não se desfaz. -,- -,-	Cinza clara ; cheiro aceti- leno; desfazen- do-se. Baixo	Cinza clara; cheiro aceti- leno; desfazen- do-se. Baixo	Branca; chei- ro acetileno; desfazendo-se Alto
Hidrogenio ("subida" nos lingotes)		Baixo	Baixo	Baixo	Alto
<u>Análise Química - % -</u>					
Carbono	1ª fase	0,06	0,04	0,06	0,06
	2ª fase	0,15	0,10	0,09	0,06
Silício	1ª fase	0,02	0,02	0,04	0,04
	2ª fase	0,26	0,23	0,35	0,20
Mn	1ª fase	0,08	0,06	0,10	0,05
	2ª fase	0,51	0,44	0,41	0,25
Fosforo	1ª fase	0,028	0,017	0,039	0,013
	2ª fase	0,047	0,028	0,041	0,024
Enxofre	1ª fase	0,041	0,039	0,037	0,029
	2ª fase	0,020	0,029	0,024	0,019
"Pick up" de C		0,09	0,06	0,03	0,00
Rendimento Silício - % -		58	63	84	36
Rendimento Mn - % -		45	88	94	99
<u>Análise Escória - % -</u>					
SiO ₂	1ª fase	18,5	19,2	22,4	16,6
	2ª fase	34,1	35,1	36,5	30,7
CaO	1ª fase	34,2	28,6	29,6	26,8
	2ª fase	40,4	37,4	29,4	32,1
MgO	1ª fase	9,36	10,6	13,6	16,5
	2ª fase	16,5	11,9	20,2	18,6
Fe	1ª fase	21,4	23,8	16,6	25,4
	2ª fase	-,-	-,-	-,-	-,-

3. EQUIPAMENTO E TÉCNICA USADAS

A figura 1 indica esquematicamente o equipamento que utilizamos para as experiências aqui relatadas. O forno tinha uma capacidade nominal de 1 t, com transformador de 400 kVA. O óleo Diesel, usado para criar a atmosfera redutora, era alimentado de um reservatório elevado, através de um tubo de plástico e de um tubinho Bundy de $\frac{1}{4}$ " , gotejando diretamente dentro do forno. Torneiras pequenas, de vidro, permitiam o controle da vazão de óleo.

À primeira vista poderia parecer que a introdução de óleo no interior do forno poderia vir a causar explosões. Esse perigo não existe, ou é muito reduzido. O perigo de explosão é real quando se formam misturas de gases redutores e oxidantes a temperaturas relativamente baixas (abaixo de 600°C, principalmente). A essas temperaturas as misturas serão detonadas por qualquer chispa ou chama que com elas entre em contacto. A temperaturas elevadas, tais como as que prevalecem no forno elétrico após a fusão completa da carga, qualquer gás redutor introduzido será imediatamente aceso havendo formação de chama; misturas explosivas não chegam a se formar (não podem se formar em ambientes a temperaturas tão elevadas).

Na introdução do óleo forma-se dentro do forno (quando nele ainda existir ar), todo oxigênio livre entra em combinação; em seguida, uma vez cheio o forno com o gás redutor oriundo do "cracking" do óleo Diesel, formam-se chamas abundantes ao redor dos eletrodos ou das frestas das portas. Dêsse momento em diante basta manter alimentação adequada do óleo para que haja sempre pressão positiva no forno.

Se se desejar abrir a porta (para retirada de amostras, por exemplo) basta aumentar o fluxo de óleo, para garantir a saída de gases *do forno para fora*, não permitindo a entrada de ar. Justamente porque as maiores entradas de ar podem ocorrer pela porta, nas experiências realizadas gotejamos o óleo em frente e próximo da mesma, conforme indicado na figura 1.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CONCLUSÕES

Foram realizadas quatro experiências (4 corridas) com gotejamento de óleo. Seus resultados estão resumidos na tabela I.

De modo geral, da primeira à última experiência diminuimos (até zero, na quarta experiência) o uso de redutores outros que

o óleo. Na primeira experiência houve dificuldades na alimentação de óleo, dada a viscosidade deste. Nas experiências seguintes o fluxo de óleo necessário foi mantido sempre, durante a fase redutora. Como resultado das experiências realizadas, cujo caráter preliminar queremos ressaltar, parece ser possível tirar as seguintes conclusões:

1. É perfeitamente viável a manutenção de uma atmosfera controlada (redutora) no forno elétrico.
2. A manutenção de uma tal atmosfera por gotejamento de óleo (ou outro hidrocarboneto líquido) é perfeitamente fácil e tecnicamente simples. O consumo de óleo é tão pequeno (da ordem de 5 a 10 litros por tonelada no nosso pequeno forno e em experiências preliminares) que se pode afirmar ser o seu uso perfeitamente viável economicamente.
3. O emprêgo de atmosfera controlada (redutora) na segunda fase da operação do forno elétrico facilita enormemente o controle da escória e da operação do forno. Garante-se, sem qualquer preocupação, a existência de uma escória perfeitamente reduzida, cinzenta que se desfaz no esfriamento. O forneiro, mesmo pouco experiente, pode trabalhar despreocupado. Não é necessário usar carvão, carbureto de cálcio ou ferro-silício para reduzir a escória.
4. As provas de forjamento (retiradas na segunda fase das corridas em que usamos atmosfera controlada) apresentavam excepcional forjabilidade. Os lingotes resultantes dessas experiências com atmosfera controlada forjaram muito bem, sem apresentar qualquer trinca.
5. O "pick up" de carbono pelo banho, apreciável nas experiências em que usamos carvão ou carbureto de cálcio como adições redutoras, foi nulo na experiência em que usamos apenas a atmosfera redutora de hidrocarbonetos.
6. O aço resultante das experiências, acusou a presença de hidrogênio, "subindo" quando vazado nas lingoteiras. Nas primeiras experiências essa "subida" foi ligeira, ou inexistente em certos lingotes; na última experiência, em que o teor de C era mais baixo, a "subida" foi maior. A absorção de hidrogênio constitui, portanto, um inconveniente sério do emprêgo de atmosfera controlada de hidrocarbonetos. Contudo, é necessário que se diga que, dado o regime intermitente em que opera o forno usado para as experiências e inexistência de instalações para eliminação de umidade da carga e adições, aços de carbono baixo feitos pela prática normal nesse forno (sem atmosfera controlada) sempre apresentam certa tendência a "subir". Temos a impressão, a verificar em experiências futuras, que, mesmo usando atmosfera controlada de hidrocarbonetos, a absorção de H poderá ser baixada até valores aceitáveis, pelo menos para certos tipos de aço.
7. Embora não o tenhamos verificado, por não dispormos ainda do aparelhamento necessário para análise de nitrogênio, é de esperar que o aço produzido nas condições das experiências

relatadas tenha teor de N excepcionalmente baixo. Este fato poderá vir a ser de grande interesse para produção de certos tipos de aço em forno elétrico.

8. O prosseguimento de pesquisas sobre o uso de atmosferas controladas no forno elétrico (e em outros fornos de refino de ferrosos e não-ferrosos) parece ser plenamente justificado, pelas vantagens operacionais resultantes. Maior experiência com atmosferas de hidrocarbonetos e experimentação com outros tipos de atmosfera parece desejável.

OBSERVAÇÕES E AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido pelo Engdo. Carlos Aurelio Dompieri, como parte normal do seu estágio como Assistente-Aluno na Secção de Aços do I. P. T. de São Paulo, sendo seu orientador o Chefe dessa Secção. Os autores agradecem a colaboração dos funcionários da Secção; à Bundy Tubing, na pessoa do seu Eng. Dr. Jarbas O. Nascimento, pelo fornecimento dos tubinhos usados nas experiências; à Secção de Análises de Produtos Metalúrgicos, do IPT, chefiada pelo Dr. Venâncio Ferreira Alves, agradecemos especialmente a colaboração prestada na análise de escórias e aços das experiências.



DISCUSSÃO (1)

F. Pinto de Souza (2) — Agradeço ao Eng. Dompieri pela apresentação e felicitio o co-autor pela orientação seguida de promover trabalhos como este, que criam um espírito de pesquisa nos estagiários da sua organização. Tem a palavra quem quiser discutir o assunto.

Edmundo Grees (3) — Pediria aos autores esclarecerem qual o tipo de aço que tencionaram fabricar.

C. A. Dompieri (4) — Visávamos a produção de aço de baixo carbono, desoxidado.

L. C. da Silva (5) — A idéia foi tentar produzir aço com carbono o mais baixo possível, mesmo utilizando atmosfera redutora. Nas primeiras experiências, para manutenção de escória redutora, utilizamos adição de carvão (na primeira experiência) e carboneto de cálcio (na primeira e na segunda experiências). Houve o «pik-up» de carbono que está indicado na tabela. Na última experiência, embora tivéssemos es-

(1) Contribuição Técnica n.º 403. Discutida na Comissão «G» do XV Congresso da ABM; São Paulo, julho de 1960.

(2) Membro da ABM e Presidente da Comissão; Professor Catedrático da Escola de Engenharia da Univ. de Minas Gerais; Belo Horizonte, MG.

(3) Membro da ABM; Engenheiro da Usina de Volta Redonda da CSN; Volta Redonda, RJ.

(4) Sócio Estudante da ABM; Engenheiro do Curso de Metalurgia da EPUSP e estagiário do IPT; São Paulo, SP.

(5) Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, Doutor em Metalurgia e Docente da EPUSP; do Instituto de Pesquisas Tecnológicas; São Paulo, SP.

cória perfeitamente reduzida, visto que não adicionámos carboneto de cálcio nem carvão, não houve «pick-up» de carbono.

C. A. Dompieri — O teor de carbono obtido foi sucessivamente: 0,15; 0,10; 0,09 e 0,06, como os Srs. veem no quadro apresentado. Isso corresponde à diminuição de redutores sólidos usados.

E. Grees — E o teor de silício, como variou?

C. A. Dompieri — Os teores de silício foram: 0,26; 0,23; 0,35; 0,20.

José Maria Girona (6): — Em primeiro lugar, desejo saber se a utilização desse método de atmosfera controlada produz alguma variação no consumo de kWh por tonelada de aço produzido.

C. A. Dompieri — Não observamos economia de kWh.

J. M. Girona — O consumo não variou?

C. A. Dompieri — Em relação aos dados que temos de outras corridas do IPT, praticamente não foi observada variação; não nos interessámos ainda em fazer experiências com essa observação em mira.

J. M. Girona — Quantas experiências os senhores fizeram com esse método?

C. A. Dompieri — Apenas quatro.

J. M. Girona — Outra coisa: o canal de orifício da corrida, de «sangria», como chamamos em castelhano, está completamente livre, está descoberto?

L. C. da Silva — Poderia estar. Não haveria inconveniente. Mas como o nosso forno é pequeno, tampamo-lo com uma mistura de massa refratária comum, sílico-aluminosa.

J. M. Girona — Embora sejam poucas as experiências, os Srs. observaram nas peças ou lingotes uma melhora de superfície? Uma melhora do fenômeno do rechupe? Notaram o teor de inclusões? Viram a qualidade dos lingotes obtidos desse modo?

L. C. da Silva — As experiências foram muito preliminares; são experiências feitas por um estudante que passou suas férias de janeiro e fevereiro no IPT, e depois, com muito esforço, pode vir ao Instituto mais alguns dias durante o semestre todo. De modo que os objetivos colimados eram modestos: 1.º) Verificar se era viável o estabelecimento de uma atmosfera redutora (de uma atmosfera controlada) no forno elétrico — vimos que era viável; 2.º) Verificar se o estabelecimento de atmosfera controlada facilitaria o controle de escória; verificamos que facilita enormemente. Isso é interessante, por não depender a operação do forno elétrico da disponibilidade de um forneiro de grande prática, porque, desde que o óleo esteja gotejando, pode-se abrir a porta, que a atmosfera será sempre redutora. 3.º) Interessava verificar o «pick-up» do carbono, observando com essa atmosfera especial o teor de carbono aumentaria apreciavelmente. Verificamos que na experiência em que utilizamos apenas atmosfera controlada, o «pick-up» do

(6) Membro da ABM; da «Facultad de Ingenieria» da Univ. de Buenos Aires; República Argentina.

carbono foi zero. De modo que estas são as conclusões que podemos tirar.

Quanto às características do lingote, é assunto que não nos interessou ainda nesse estudo preliminar. O importante nos lingotes obtidos foi que eles apresentaram «subida» por hidrogênio (bôlhas de Hidrogênio), o que é um inconveniente da atmosfera usada. Pretendemos, no futuro, continuar essas experiências, utilizando outras atmosferas melhores do que as de hidrocarbonetos. As limitações da atmosfera do hidrocarbonetos foram indicadas no trabalho.

David Fuller Brain (7) — Creio que é esta uma contribuição muito importante, pelo fato de se ter em conta a facilidade de controle da operação pelo forneiro. Perguntaria: as temperaturas usadas foram iguais?

L. C. da Silva — Foram as temperaturas normais que utilizamos no forno elétrico da Secção de Aços do IPT.

D. F. Brain — Não poderia haver influência de variação de temperatura sobre o teor de silício, por exemplo?

L. C. da Silva — O silício presente foi o de adição. O objetivo era fazer aço desoxidante; portanto, a única maneira era adicionar silício. De modo que adicionamos uma quantidade de silício, que resultou nesses teores finais que estão todos no quadro.

D. F. Brain — Com diferença de adições de silício poderá haver diferença na temperatura?

L. C. da Silva — Não observamos.

(7) Membro da ABM; Professor da Univ. de Concepción; Chile.