

# CONSIDERAÇÕES ACERCA DO CONJUNTO DE FORNOS DE INDUÇÃO A BAIXA FREQUÊNCIA DA FUNDIÇÃO DA FORD MOTOR DO BRASIL, EM OSASCO, SP <sup>(1)</sup>

J. M. BRANCO RIBEIRO <sup>(2)</sup>

## RESUMO

*O Autor, na sua qualidade de Gerente daquela importante e moderna Fundição e após quase dois anos de operação, durante os quais fundiu 16.000 t, presta interessantes informações acerca da operação do forno de indução a baixa frequência na produção de ferro fundido sintético.*

## 1. INTRODUÇÃO

Por julgarmos que nos faltasse maior experiência, vimo-nos impossibilitados de apresentar, ao último Congresso, um trabalho sobre as nossas instalações de Fornos de Indução a Baixa Frequência. Apesar de já se terem passado doze meses daquela data, continuamos com a mesma opinião. Contudo, achamos que não nos poderíamos furtar à oportunidade de comparecer perante o XV Congresso Anual para, de alguma forma, discutirmos conjuntamente o que já foi feito pela *Ford Motor do Brasil S/A.*, em Osasco.

A introdução no Brasil (agosto de 1958) do forno de indução a baixa frequência (frequência industrial de 60 cps) para fabricação de ferro fundido sintético, surpreendeu os técnicos metalurgistas especializados nesse campo, com deficiência de literatura acerca do comportamento desse tipo de forno recentemente introduzido no campo metalúrgico internacional.

Quando do planejamento da sua Fundição, em 1957, conforme os termos do compromisso assumido perante o G. E. I. A., com referência à fabricação do veículo caminhão brasileiro, foi o equipamento de fusão objeto de detalhado estudo pela *Ford Motor do Brasil S/A.* Esse estudo indicava três possíveis so-

(1) Contribuição Técnica n.º 381. Apresentada na Reunião Aberta sobre «Produção de peças de ferro fundido de alta qualidade», do XV Congresso da ABM; São Paulo, julho de 1960.

(2) Membro da ABM; Engenheiro Chefe da Fundição da *Ford Motor do Brasil S/A.*; Osasco, SP.

luções: Forno a arco elétrico; Duplex (cubilô e forno a arco elétrico) e Forno de indução a alta ou a baixa freqüência.

Ainda nesse estudo sobressaiam-se os seguintes itens:

- 1) A matéria prima apresentava-se como fator de importância preponderante ao sucesso econômico da operação, principalmente na parte referente a sucata de aço, dado que iríamos dispôr de retalhos de chapas (SAE 1010) provenientes da nossa estamparia localizada no Ipiranga, em quantidades que correspondiam aos volumes de que iríamos necessitar para a nossa Fundição. Neste ponto é conveniente lembrar que o Departamento de Engenharia da Ford Brasileira, já em 1956, tinha elaborado um estudo referente ao aproveitamento, ou seja à transformação, dos retalhos acima descritos em gusa sintético, usando fornos de indução.
- 2) Naquela época, o gusa como matéria-prima, apresentava-se com especificações as mais variadas; devido a sua possível demanda no mercado (dentro das exigências das especificações da indústria automobilística) seu fornecimento era duvidoso.
- 3) A dependência da importação de carvão coque de boa qualidade e de seu custo.
- 4) Dependência da importação de eletrodos e de seu custo, caso a solução escolhida fôsse a do item "a" ou do item "b".
- 5) O consumo de fôrça mantinha-se como fator constante nas três soluções, apesar de na segunda solução (item b), o valor da demanda ser aparentemente menor. Levando-se em conta o todo da instalação (sopradores de cubilô, etc.) o consumo de fôrça apresentava-se bastante próximo dos demais.
- 6) Relatório da equipe de planejamento sôbre as instalações industriais de fornos de indução, existentes na Alemanha e Suécia naquela época.

Ao término dos trabalhos, defrontamo-nos com dois caminhos, isto é, seguir os processos tradicionais ou enveredar para novos horizontes ou seja, fusão por indução. Optámos pelo último, sem muita dificuldade, por nos apresentar as seguintes vantagens:

- a) Uso de matéria-prima gerada na própria organização (retalhos de estamparia e cavaco de usinagem);
- b) Uso de carvão nacional sob a forma de moimha de coque;
- c) Independer de eletrodos;
- d) Tratar-se da última palavra em equipamento de fusão.

Ainda, dentro da última solução, escolhemos o tipo de cadinho a baixa freqüência (60 ciclos), pelos seguintes motivos:

- a) Ausência de partes móveis (conversor), o que acarretaria um alto custo de manutenção;

- b) Baixo custo de instalação;
- c) Maior vigor das correntes de indução, com conseqüente melhor homogeneização do banho;
- d) Possibilidades de uso intermitente e partida com massa sólida, o que não é possível com os fornos do tipo "Núcleo" ou "Calha".

## 2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

A instalação consiste em três (3) comandos, dois deles sendo de 1500 kW para fusão, e um de 400 kW para espera, os quais podem ser ligados a três fornos, permitindo as seguintes combinações:

<i>Combinação</i>	<i>Comando A</i>	<i>Comando B</i>	<i>Comando C</i>
	1500 kW	400 kW	1500 kW
1 .....	Forno I	Forno II	Forno III
2 .....	Forno II	Forno I	Forno III
3 .....	Forno I	Forno III	Forno II

Essas combinações são controladas em um painel separado; qualquer uma delas poderá ser efetuada da plataforma de controle, em virtude das chaves elétricas serem comandadas à distância.

Os comandos "A" e "C" são constituídos de um transformador especial de 1800 kVA, com entrada de força em 13.2 kV, 60 ciclos, 3 fases e a saída com 6 derivações, possibilitando uma regulagem entre 215 e 525 volts. A cada comando estão agrupados 7700 Kvar de condensadores estáticos, agrupados em duas baterias, a saber:

- a) 6800 Kvar, em 544 condensadores de 12,5 Kvar (cada), agrupados em 17 grupos e usados para compensação da 3.<sup>a</sup> fase, uma vez que os fornos são do tipo monofásico;
- b) 900 Kvar, em 72 condensadores de 12,5 Kvar (cada), agrupados em 5 grupos e usados para manter o fator de potência igual a 1,0.

Todos os grupos de condensadores, uma vez pré-selecionados, são operados automaticamente de acordo com a demanda. No painel de cada comando, além dos instrumentos normais de medição (amperímetros de fases, voltímetro, fasômetro e quilovátmetro), ainda temos dois circuitos especiais, sendo um para ensaio de curto-circuito elétrico e ruptura do refratário do forno. O outro consiste num sistema de alarme, equipado para indicar qualquer deficiência na: Temperatura do Transformador, da

Sala dos Condensadores e da água de refrigeração das bobinas; Ruptura do refratário do forno; Curto-circuito e sôbre corrente; Ligação elétrica dos ventiladores dos Condensadores e Pressão de água de refrigeração.

O terceiro comando, ou seja o de 400 kW é semelhante aos dois acima descritos, mantendo a mesma relação dos condensadores para a potência do comando.

Os fornos prôpriamente ditos são do tipo cadinho, com capacidade de 8 t de banho ferroso e de construção semelhante à bobina primária de transformadores monofásicos. A bobina é composta de 3 secções distintas, sobrepostas verticalmente, indicando-nos a forma cilíndrica do cadinho. As secções em si são duplas, com elementos de 12 espiras, em paralelo. As bobinas são refrigeradas a água; para tanto requerem, por forno, aproximadamente 26 m<sup>3</sup>/h quando em regime de fusão, e 6 m<sup>3</sup>/h em espera.

O volume de água para refrigeração é proveniente de um circuito fechado, com a temperatura de entrada nas bobinas de  $\pm 26^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 36^{\circ}\text{C}$  na saída. Êste diferencial de temperatura corresponde a 20% ou 30% de calor removido; indica que a eficiência elétrica do sistema é de 70% a 80%.

O cadinho, de construção monolítica, é constituído de argamassa refratária de quartzito, à qual é adicionado 1,8% de ácido bórico como fundente. Entre a parte elétrica e o cadinho, temos duas camadas protetoras; uma de folhas de mica, de 1 mm de espessura, e outra de folhas de amianto, de 4 mm de espessura. O quartzito usado é das melhores procedências nacionais, com as seguintes características:

Pureza:	98,5%, mínimo
Granulometria USS:	N.º 14 — 35%
	N.º 30 — 10%
	N.º 70 — 16%
	Fundo — 39%

Em cada revestimento, utilizamos cêrca de 1700 kg de quartzito. A vida média de cada um é de 400 t por campanha. O vasamento é efetuado basculando-se o forno, com o auxílio de dois possantes êmbolos hidráulicos.

### 3. GENERALIDADES

Nossa primeira preocupação consistiu em coligir um conjunto de conceitos, em forma de padrões, a serem seguidos em tôdas as marchas de fusão, a fim de podermos obter maior efi-

ciência no estudo comparativo dos dados. Para tanto, usando o conceito de Potência Específica:

$$\frac{N}{t} = \frac{\text{Potência total, kW}}{\text{Massa do banho, t}} = (\text{kW/t})$$

foi-nos fácil elaborar os gráficos da Fig. 1, cujos resultados práticos podem ser observados na Fig. 2.

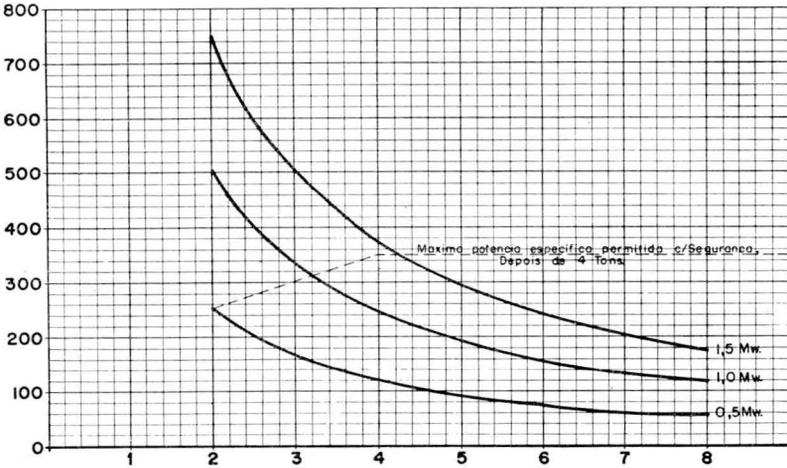


Fig. 1 — Curvas teóricas das potências específicas.

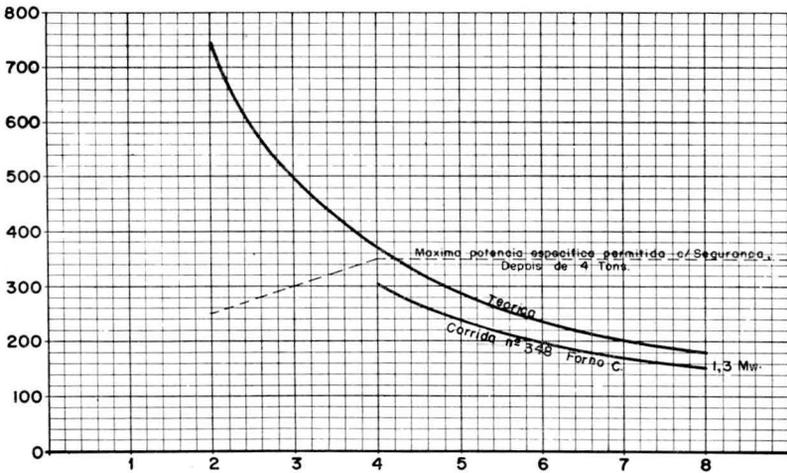


Fig. 2 — Curvas da potência específica usada durante uma marcha de fusão comparada com a teórica.

A linha interrompida, partindo de 250 kW/t, com 2 t, e que atinge o valor de 350 kW/t com 4 t, representa um valor arbitrário, por nós estabelecido, a fim de podermos controlar a excessiva turbulência presente nesta fase da operação. Esse limite pode ser alterado, para cima ou para baixo, segundo o estado do revestimento, dado que a excessiva turbulência pode exercer ação deletéria na vida do mesmo.

A boa eficiência do forno está subordinada a uma contínua alimentação de sucata. Sendo esta falha, teremos um rápido aumento de temperatura e fluidez no banho, assim como uma excessiva turbulência, originando-se daí o nosso cuidado em controlar os valores da Potência Específica até 4 t. Acima destas, conforme se pode notar na Fig. 1, os valores teóricos são menores do que o máximo permissível; não são portanto significativos.

#### 4. CARBURAÇÃO

Achamos interessante controlar o comportamento do carbono durante a fabricação de um ferro. A curva da Fig. 3 mostra-nos a absorção do carbono no ferro, quando obtida da seguinte maneira: Encontravam-se no forno 4 t de fundo líquido com as seguintes análises:

$$C = 3,40\%; \quad Si = 2,35\%; \quad Mn = 0,68\%; \quad Cr = 0,42\%.$$

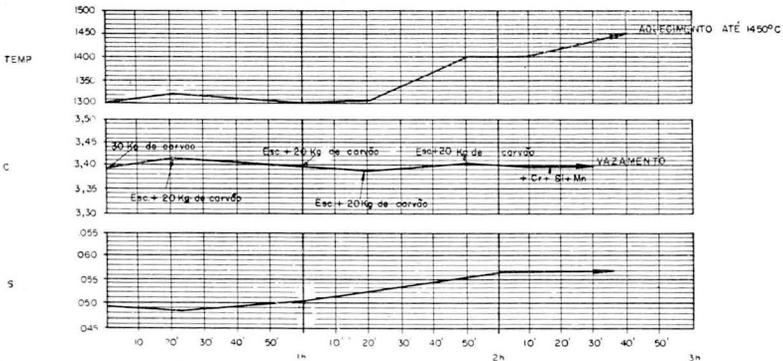


Fig. 3 — Comportamento do carbono durante uma marcha de fusão.

Foram colocados em seguida, 30 kg de moinha de coke juntamente com 1,2 t de cavacos domésticos. Depois da fusão do cavaco o banho foi escorificado (temperatura de 1.300°C),

tendo sido tirada a primeira amostra para o Carbono ( $C = 3,42\%$ ) e em seguida carregou-se sucata doméstica (canais de alimentação, etc.).

Depois de 40 min, foi o banho novamente escorificado, tirando-se uma segunda amostra ( $C = 3,41\%$ ), tendo sido continuada a carga de sucata juntamente com 20 kg de moinha de coke. Após 15 min, foi o banho escorificado outra vez, tendo sido tirada uma terceira amostra ( $C = 3,40\%$ ), e continuou-se o carregamento da sucata. Depois da fusão tirou-se a escória e uma quarta amostra ( $C = 3,41\%$ ). Foram então colocados mais 20 kg de moinha de coke e elevou-se a temperatura a  $1.400^{\circ}\text{C}$ . Após 15 min da última carga da moinha de coke, foi o banho escorificado novamente, tendo sido tirada uma quinta amostra ( $C = 3,40\%$ ). Foi procedida a correção do Cr, Si, Mn e elevou-se a temperatura para o vasamento.

Verificou-se que, durante todo o tempo de fusão e graças a uma alimentação contínua de sucata, a temperatura do forno ficou sempre por volta de  $1.300^{\circ}\text{C}$ . A turbulência foi sempre muito limitada, não sendo favorecida a carburação que contrariamente necessita de alta temperatura e grande superfície de contacto ou de movimento de turbulência.

Como fator negativo de máxima importância, foi notado um aumento de concentração de enxôfre, sendo este elemento presente na moinha de coke em quantidade maior do que  $0,1\%$  e menor do que  $0,4\%$ .

A carbonetação apresenta numerosos fatores negativos, tais como: baixo rendimento da moinha de coke; perda de tempo; perda de ferro e de elementos de liga que inevitavelmente são eliminados durante as numerosas fases de escorificação. Por esta razão, achamos útil conhecer a velocidade da absorção e o rendimento do material carburizante (moinha de coke) em relação à temperatura, à quantidade de ferro no forno e à quantidade de carvão existente na superfície do banho.

A solubilidade do carbono no ferro depende de muitos fatores, alguns muito importantes, como: temperatura, tempo de carburação, superfície de contacto, concentração do carbono no ferro e atividade do material carburizante (coke, carvão vegetal, grafite, etc.), etc.

Em nossa Fundição de ferro fundido sintético, alguns desses fatores devem permanecer fixos, como por exemplo: tipo de carburizante ou seja, moinha de coke e temperatura que não pode ultrapassar a  $1.550^{\circ}\text{C}$ . Encontramos o ponto ótimo para uma rápida e econômica carburação, controlando a temperatura, a superfície de contacto e o tempo de carburação, além de manter o banho em movimento de turbulência. Levamos a efeito

uma experiência para determinar a velocidade da absorção da seguinte maneira:

Começou-se com 4 t de fundo líquido e 3,87% de concentração de carbono. Prosseguiu-se com carregamento de 2 t de sucata de aço (tipo SAE 1010). Quando a sucata entrou em estado de fusão, tínhamos então 6 t de ferro líquido com uma concentração de carbono de 2,5%. Tirou-se a escória e logo depois foram adicionados 100 kg de moinha de coque de uma só vez e elevou-se a temperatura a 1.500°C, no menor tempo permitido. Foi regulada a potência ligada ao forno, de modo a manter o banho em turbulência nessa temperatura.

A variação da concentração do carbono nessa experiência, é ilustrada pelo gráfico da Fig. 4, no qual pode-se notar que, carburando-se nessas condições, obtém-se um rendimento de 42% após 5 minutos, de 60% após 12 minutos e de 75% após 40 minutos.

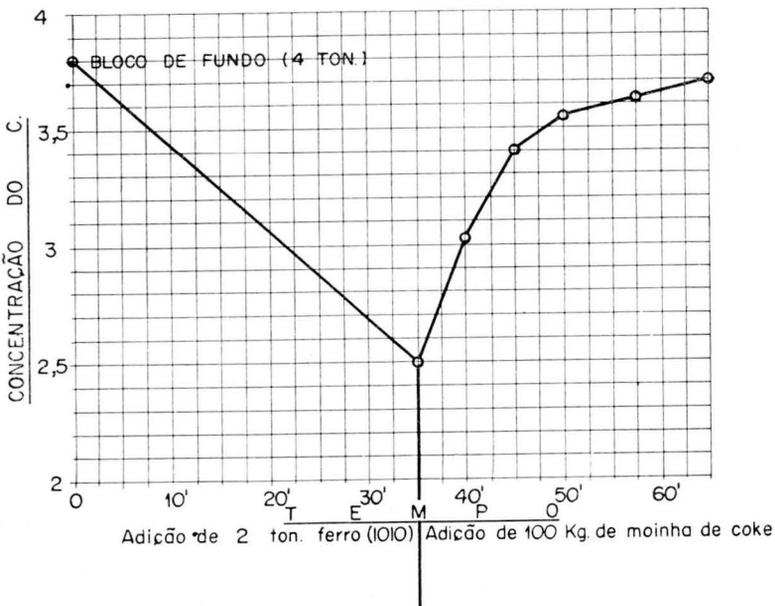


Fig. 4 — Velocidade de absorção do carbono a 1500°C com 6 t de ferro e 100 kg de moinha de coque.

É sem dúvida econômico interromper a carburação após 10-12 minutos do processo, uma vez que o custo de energia elétrica para manter o banho à temperatura de 1.500°C por 20 minutos, não compensa o ganho de 15% de carburação.

### 5. CONSIDERAÇÕES SÔBRE A VELOCIDADE DE ABSORÇÃO E PERDA DOS MAIS IMPORTANTES ELEMENTOS DE LIGA

Consideramos de interêsse investigar o comportamento dos mais importantes elementos de liga neste tipo de forno, ou seja: Si — Mn — Cr — C, durante a fusão, escorificação e afinação.

Tomou-se em consideração a corrida n.º 349. Encontravam-se no forno 7,5 t, com a seguinte composição química: Cr = 0,265; Si = 2,00; Mn = 0,62; C = 3,44.

A análise final deve ser: Cr = 0,33; Si = 2,25; Mn = 0,71; C = 3,44.

A marcha de fusão da presente corrida não será descrita. Atingida a temperatura de 1.300°C, procedeu-se à escorificação e, logo após, adicionou-se o material de liga, na forma de ferro-liga reduzido ao tamanho de um ovo.

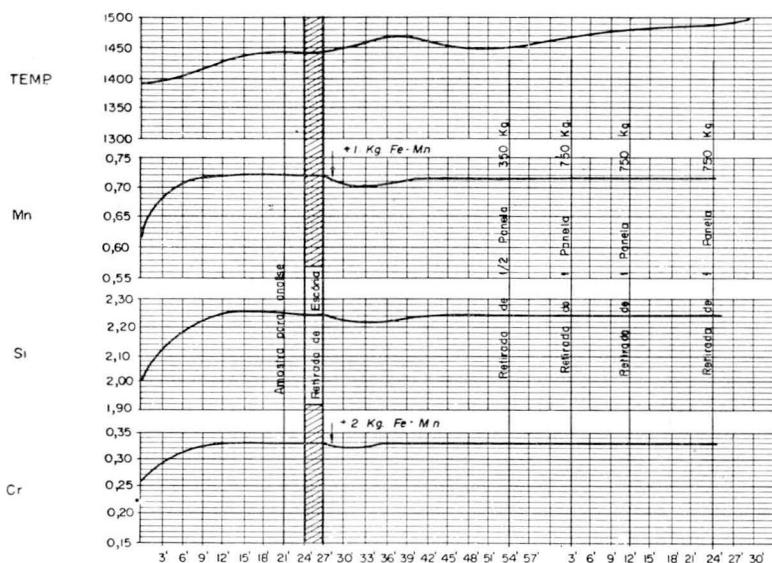


Fig. 5 — Curvas de absorção do Si, Mn, Cr.

Nota-se na Fig. 5, que ao redor de 1.390°C a velocidade de absorção é bastante elevada e os elementos de correção se encontram em solução após 15 minutos. Durante todo êsse tempo o forno permaneceu ligado, tendo a turbulência favorecido

o processo de dissolução. A temperatura elevou-se a 1.430°C durante êsses 15 minutos.

Depois de 24 minutos da carga de ferro-liga, procedeu-se à escorificação. O gráfico mostra que após essa operação, diminuiu a concentração dos elementos no banho. Êste fato é certamente explicado pela absorção dêstes elementos pela escória, dado o desequilíbrio entre tais elementos e seus óxidos na mesma.

A oxidação dos elementos não pode ser atribuída ao revestimento  $\text{SiO}_2$ , que sabemos oxidar o Cr e Mn, com libertação de Si, em determinadas condições de temperatura, pois não se notou aumento de Si no banho.

Pode-se notar na Fig. 5 que foi feita uma correção de análise logo após as escorificações, com a adição de 2 quilos de Fe—Cr, e 1 quilo de Fe—Mn.

Apesar de não se ter adicionado Fe—Si, a concentração do silício aumentou progressivamente até estabilizar-se em 2,25%. Êsse fato leva-nos a pensar que parte dos elementos adicionados seja oxidada nesta segunda fase por meio do revestimento ( $\text{SiO}_2$ ), em virtude de uma maior temperatura (1.470°C), liberando Si que passa para o banho na seguinte forma:



A adição final de 2 kg de Fe—Cr e 1 kg de Fe—Mn feita logo após a escorificação foi totalmente perdida, pois essa quantidade compensou somente a perda dos elementos para formar uma nova escória. Esta escorificação foi pois desnecessária e ocasionou apenas perda de tempo.

A Fig. 6 mostra uma curva da perda dos elementos de liga após permanência de 2 horas e 15 minutos no forno. Essa curva é relativa à corrida N.º B-348.

Ao tempo zero o banho foi escorificado e foi feito um ajuste de 12 kg de grafite para levantar o carbono de 3,40% a 3,50%. A análise inicial era de: Si = 2,55, Mn = 0,71, Cr = 0,08 e C = 3,40.

Após a carburação passou a ser de: Si = 2,44, Mn = 0,67, Cr = 0,08 e C = 3,48.

A perda dos elementos foi de: Mn = 0,04% e Si = 0,11%.

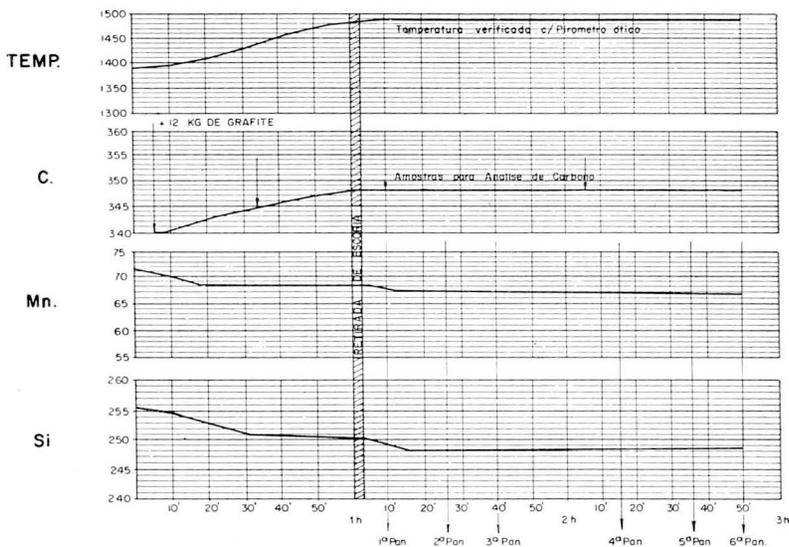


Fig. 6 — Variação de concentração dos elementos de liga depois de 3 horas de permanência no forno.

A curva foi obtida por intermédio de amostras tiradas de 3 em 3 minutos. Nas primeiras amostras constatamos instabilidade dos resultados das análises, porém essa instabilidade, mais ainda do que o erro dado pelo espectrômetro é devida à heterogeneidade do material que, apesar de estar a alta temperatura, não foi suficientemente homogeneizado. Por outro lado, as amostras tiradas do banho após 30 minutos de trabalho, mostravam maior reprodutividade.

As perdas de concentração do Mn e Si depois de cada escorificação estão evidentes no gráfico. A absorção do carbono da grafite foi normal.

## 6. INCLUSÕES

Na fundição de ferro fundido sintético, as inclusões de carvão, emulsionadas no banho, são encontradas nas peças e podem ter uma influência determinante na aceitação destas.

Pode-se remediar êsse inconveniente deixando-se o banho flotar por tempo suficiente no forno. Entretanto esta técnica é

inadequada em nosso caso porque, contrariamente ao cubilô, o vasamento do forno para a panela é feito subtraindo-se material da superfície. Teríamos portanto, nas primeiras panelas, uma concentração de inclusões mais alta do que a média. Por outro lado, durante o vasamento, é necessário ligar o forno para manter temperatura adequada, ocasionando turbulência e conseqüente *emulsionamento* das inclusões.

Neste tipo de forno de grande profundidade em relação ao diâmetro, considera-se que 30 minutos de repouso do banho seja um tempo suficiente para a flotação das partículas.

O método de vasamento por nós usado, e que julgamos aceitável no confronto com as inclusões, consiste em:

- a) Completar os acêrtos finais de análises;
- b) Sôbreaquecer o banho a 1500°C;
- c) Desligar o forno;
- d) Deixar o banho parado durante 30 minutos.. Durante este último período obtem-se as análises finais de C, enquanto que inclusões e gases terão a oportunidade de emergirem à superfície e incorporarem-se à escória.
- e) Escorificação cuidadosa.

Como durante o repouso teremos uma perda na temperatura do banho de cêrca de 50°C, o forno é religado a fim de elevar-se a temperatura de vasamento novamente a 1500°C, obtendo-se ao mesmo tempo a homogeneização das poucas inclusões restantes devido à turbulência.

Antes de se vasar qualquer panela subseqüente, religamos o forno, repetindo a última operação.

## 7. EXEMPLO DE FUSÃO E VASAMENTO

Baseando-se nos dados teóricos e práticos das características do forno, já descritos e confirmados pela experiência, pode-se ditar uma marcha típica de fusão, afinação e vasamento.

*Fusão* — Entende-se como primeira fusão aquela em que se inicia a corrida partindo-se de um fundo sólido (Blocos de Fundo).

Inicia-se o carregamento com 2 blocos de fundo de 2 t cada. Tendo-se 4 t no forno, ligar-se-á, desde o início, o “tap” mais alto do painel de comando.

Durante o aquecimento, a potência realmente absorvida pelo forno será por volta de 1,2-1,3 MW. Tratando-se de carga sólida, não teremos turbulência e a potência específica de 0,315 (MW/t) é aceitável. Durante o aquecimento dos blocos, o forno deve permanecer fechado, para limitar a perda de calor e para uniformizar a temperatura do revestimento.

A temperatura de fusão será atingida após 75 min aproximadamente; a energia empregada para esta primeira operação será de 1,6-1,7 MWh, que é superior à teórica prevista em virtude das perdas para aquecer o revestimento, tampa e outras partes do forno.

Quando fundir-se o bloco de fundo, inicia-se a carga (sem escorificação), de 2 t de sucata de aço (SUCATA SAE 1010) previamente separada nas proximidades do forno. Será necessário que o operador controle constantemente a carga, durante esse período de fusão, de maneira que nunca falte a alimentação de sucata. Quando por um motivo acidental houver falta de contacto banho-sucata ou a potência total absorvida esteja elevando-se acima de 1,5 MW, deve-se evitar que a temperatura se eleve a mais de 1.500°C, devendo o forno ser desligado ou a potência abaixada para uma posição inferior (tap inferior) voltando-se porém novamente à potência máxima assim que a anormalidade for corrigida.

No início do carregamento da sucata a potência absorvida pelo forno será de 1,2-1,3 MW e irá aumentando gradualmente com o aumento da quantidade fundida. Notar-se-á que após 20 min a potência absorvida subirá até atingir a 1,5 MW, com tendência a ultrapassar esse limite, o que será evitado variando-se a posição do "tap" para a posição inferior mais próxima.

Notar-se-á, também, durante a fusão que, não obstante trabalhar-se com uma potência específica alta e temperatura por volta de 1.400°C, a turbulência não será muito violenta, porque sendo diminuída a concentração de carbono, o banho aumentará de viscosidade.

O tempo para fundir as 2 t de sucata SAE 1010, será por volta de 35 min e a energia gasta será de 0,8 MWh. Fundidas as 2 t será necessário escorificar.

Suponhamos que as 4 t de bloco de fundo correspondam à seguinte análise: Cr = 0,32%, Mn = 0,73%, Si = 2,25% e C = 3,45%.

Como o objetivo é um ferro do mesmo tipo, tomaremos por enquanto em consideração somente a concentração do carbono, deixando para a fase final as correções de todos os outros elementos. Portanto, uma vez derretidas as 2 t de SAE 1010,

teríamos no forno 6 toneladas de banho a 1.450°C com 2,35% de C. Na verdade, durante a fusão da sucata SAE 1010, parte do carbono em solução se queimará com o oxigênio de ferro presente na sucata e parte com o oxigênio do ar. Esta perda, na prática é da ordem de 0,15%, resultando numa concentração de apenas 2,20% para o C.

Torna-se necessário portanto, adicionar C ao banho para levantar o carbono das 6 t já existentes de 2,20% a 3,45% e para compensar a adição prevista de mais 2 t de 1010 que serão adicionadas após a carburação.

Serão necessários para tanto 230 kg de moinha de coque (considerando-se o seu rendimento como  $\pm 60\%$ ).

*Carregamento do carvão* — Inicialmente carrega-se a metade da quantidade prevista e liga-se o forno para se atingir 1.500°C no menor tempo possível, depois baixa-se a potência a fim de que essa temperatura seja mantida e para conservar o banho em turbulência durante o tempo de carburação.

Já vimos que com 6 t de material a 1.500°C e mantendo-se o banho em movimento, os 60% de carbono de moinha de coque entram em solução após 10-12 min. Portanto, após 5-6 min podemos adicionar a quantidade restante de moinha de coque no banho. Após 20 min de início da carga de moinha de coque, pode-se considerar que os 60% de carbono dos 230 kg de moinha já se incorporaram ao banho. Na prática a quantidade de escória presente na superfície do banho após a carburação, dará uma idéia acêrca do tempo que será realmente necessário para essa operação. A energia gasta para elevar-se o banho a 1.500°C e para manter-se o mesmo a essa temperatura durante todo o tempo de carburação foi de 0,7 MWh.

Depois da carburação, remover tôda a escória e tirar uma amostra para conhecer com precisão a concentração do carbono. Se a carburação fôr como prevista, o resultado deverá ser de 4,18%-4,20%.

Enquanto aguarda-se o resultado da amostra acima, inicia-se o carregamento das restantes 2 t de 1010 com "tap" do painel em posição máxima.

Como já vimos, usando-se a potência máxima de 1,5 MW é possível fundir-se com uma velocidade de 3,5 t/h. Portanto, depois de 15 min, tempo que será necessário para ser feita uma boa determinação do carbono, apenas 0,8 t de sucata teriam sido carregadas, havendo ampla margem de capacidade para correções adicionais de análises se tal fôr necessário.

Tais correções poderão ser feitas com adição de sucata, somente até completar-se as 8 toneladas de carga se o C fôr alto ou com a adição adequada de grafite se a concentração de C fôr igual ou abaixo da análise final especificada.

Ressaltamos neste ponto a grande flexibilidade de operação permitida pelo forno de indução.

Ao fim da fusão, com temperatura aproximada de 1.450°C, a escória é removida e outra amostra é retirada para análise espectrométrica de Cr — Si — Mn, as quais deverão ser de mais ou menos 0,16% — 1,20% — 0,36% respectivamente.

Logo após a adição dos ferro-ligas de correção, o forno é religado para elevar a temperatura a 1.550°C, prevendo-se para isso um consumo de 0,15 MWh. Dever-se-á nesse caso usar uma potência total menor do que a máxima, de modo a atingir os 1.550°C em 15 min, desde que êsse tempo é necessário para dissolver completamente os ferro-ligas de correção se o banho fôr mantido constantemente em movimento.

Atingida a temperatura estabelecida (1.550°C), o forno deverá ser desligado e deixado em “repouso”, sem tirar-se a escória, por um tempo não inferior a 30 min. Durante êsse tempo a temperatura abaixará novamente a cêrca de 1.500°C, uma vez que a perda de temperatura, com 8 t, é de 100°C/h. As inclusões de carvão, escória e os gases, terão tido tempo suficiente para flatarem.

É interessante notar que um ferro fundido sobreaquecido durante a última fase de fabricação, depois de solidificado apresentará uma estrutura com “flakes” de grafite mais finos, mais curtos e mais uniformemente distribuídos do que aquêle não submetido ao super-aquecimento. É preciso lembrar também que, quando o ferro fundido é assim tratado, necessita de uma correta inoculação para evitar uma estrutura grafitica com disposição interdendrítica.

Quando a temperatura tiver baixado a 1.550°C, se escorificará e se elevará novamente a 1.550°C. Logo após, retira-se a primeira panela que será deixada em “repouso” até que o ferro esteja a temperatura de vasamento.

Será preciso ligar o forno poucos minutos antes de retirar cada panela, pois provocando a turbulência do banho antes de cada vasamento, as concentrações das inclusões serão iguais para tôdas elas. Além disso a inoculação feita à temperatura mais alta melhora sensivelmente a estrutura nos confrontos da distribuição da grafite. O período de “repouso” na panela per-

mitirá a decantação das inclusões de silicatos, que inevitavelmente se emulsionarão no banho.

A operação de vasamento deverá ser executada com duas painelas para um lógico ganho de tempo, na seguinte ordem: Vasar-se 1 painela que depois de inoculada e escorificada será transferida para a ponte rolante de vasamento. Quando se atingir a temperatura de vasamento para o molde tomar-se-á nota do tempo "t" que foi preciso para passar da temperatura maior àquela de vasamento. Começa-se o vasamento para o molde e quando faltar "t" tempo para esvasiar a primeira painela tira-se uma segunda painela de ferro inoculada e escorificada, a qual permanecerá em "repouso" pelo mesmo tempo "t".

Mantendo-se êsse ritmo por tôda a operação diminuir-se-á notavelmente o tempo de vasamento.

Em resumo, para essa primeira corrida, teremos o seguinte:

Para derreter 4 t de bloco de fundo . . . . .	75 minutos	1,66 MW .h
Fusão de 2 t de aço (1010) . . . . .	35 minutos	0,8 MW .h
Escorificação . . . . .	5 minutos	—
Carburacão . . . . .	20 minutos	0,7 MW .h
Escorificação . . . . .	5 minutos	—
Fusão de 2 t de aço (1010) . . . . .	35 minutos	0,8 MW .h
Para derreter os ferro-ligas de correção . . . . .	15 minutos	0,15 MW .h
Flotação . . . . .	30 minutos	—
Para manter a temperatura de vasamento . . . . .	30 minutos	0,25 MW .h
	<hr/>	<hr/>
Total . . . . .	270 minutos	4,36 MW .h
	<hr/>	<hr/>
Média . . . . .		545 KWh/t

A Fig. 7 mostra o comportamento, durante uma corrida de ferro, das principais variáveis (Carbono, Silício, Manganês, Cromo, Temperatura, Pêso, Potência, Potência específica, Energia absorvida para cada operação, Energia absorvida para a corrida completa).

## 8. CONCLUSÕES

- a) Dada a forma cilíndrica do forno, o banho metálico possui notável profundidade, e a superfície de contacto com a escória é relativamente pequena; por outro lado a escória torna-se menos quente que o banho. Disso resulta que as reações banho-escória são pouco ativas, apesar do enérgico movimento de turbulência devido as correntes induzidas. Conseqüentemente, nesse tipo de forno não se opera um processo de refinação, mas sim de fusão progressiva, com dosagem perfeita dos elementos de liga.

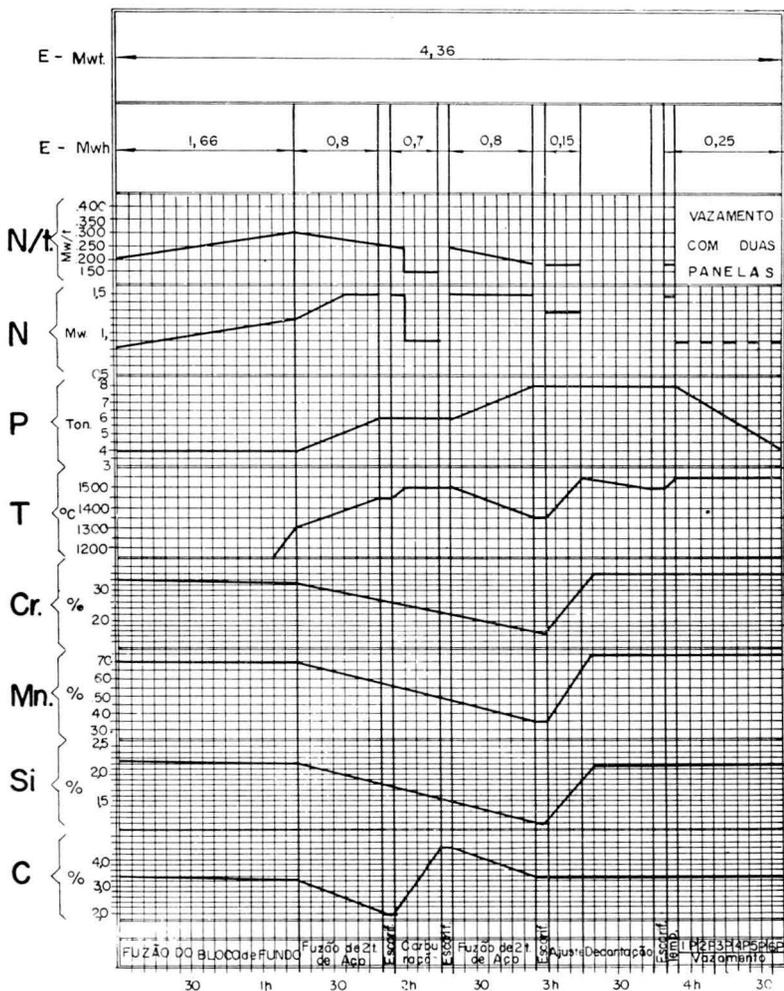


Fig. 7 — Comportamento das principais variáveis durante uma corrida típica de ferro fundido.

- b) Ao término de quase dois anos de operações, durante os quais fundimos cerca de 16.000 t, confirmamos em prática industrial tôdas as previsões iniciais. Esse sucesso é devido a algumas vantagens do forno a baixa frequência, como: Alto rendimento, bom controle de temperatura e perfeito acerto da composição do banho.
- c) Outra inegável vantagem desse tipo de forno é a de que se pode obter por seu intermédio, um ferro fundido com baixo teor de enxôfre e fósforo, usando-se exclusivamente sucata de aço com

baixa concentração de enxôfre e fósforo e elementos puros de liga (Grafite, Manganês, Silício, etc.). Esta condição permite considerável economia de inoculantes na fabricação de ferro nodular.

- d) A finalidade dêste desprezencioso trabalho, foi a de trazer ao conhecimento da ABM alguns aspectos da operação do forno de indução a baixa freqüência, na produção de ferro fundido sintético. A fusão do ferro por indução, técnica tão nova quanto inexplorada em nosso meio, está a exigir maior atenção dos metalurgistas e demais interessados no ramo, principalmente daqueles ligados aos nossos institutos de ensino e pesquisas. A questão dos revestimentos, a diversificação dos tipos de carga, salientando-se a utilização de ferro-esponja e muitos outros aspectos, constituem vasto campo para investigação e desenvolvimento.

Está pois lançado o apelo a todos aquêles que se interessam pelo progresso da metalurgia em nosso País.

\*

#### COLABORARAM NESTE TRABALHO:

Eng. Paulo Brandão Nogueira

Eng. Helmuth Sorger

Metal. Edgard Collino (atualmente na Ford Argentina S. A.)

Metal. Roberto Colletti (atualmente na I. R. F. Matarazzo)

Quím. Paulo Paes

Quím. Antônio dos Santos