

Fornos Elétricos a Arco na Produção de Ferro Fundido⁽¹⁾

MIGUEL SIEGEL⁽²⁾

RESUMO

Vários tipos de fornos podem ser utilizados na produção de ferros fundidos. Examinadas as vantagens e os inconvenientes dos fornos normalmente empregados para produção em escala industrial conclue-se pela preferência do forno a arco o qual se adapta ôtimamente às necessidades da maioria de nossas fundições.

1. INTRODUÇÃO

Os tipos de fornos mais comumente utilizados na fundição de ferro são os seguintes:

- a) FORNOS A COMBUSTÍVEL:
 - Fornos Cubilô
 - Fornos de Reverbero:
 - longos
 - curtos
 - Fornos de Cadinho
- b) FORNOS ELÉTRICOS:
 - Fornos a arco:
 - direto
 - indireto
 - Fornos a resistência
 - Fornos a indução
 - com núcleo ou de canal
 - sem núcleo ou de cadinho:
 - freqüência de linha
 - média freqüência
 - alta freqüência

2. FORNOS A COMBUSTÍVEL

Os fornos a combustível ainda produzem a parcela mais ponderável de peças de ferro fundido, tanto no estrangeiro como em nosso meio, principalmente devido ao fato de permitirem produções elevadas com investimentos reduzidos.

Forno cubilô — Dentre os fornos a combustível utilizados, é o forno cubilô o de emprêgo mais generalizado por se tratar de unidade de bom rendimento térmico e que exige o menor investimento por tonelada de ferro líquido produzido. Utiliza coque de fundição como combustível e conduzido com pericia permite produzir ferro fundido de boa qualidade. O cubilô comum, com revestimento sílico-aluminoso e insulado com ar frio, é essencialmente um forno de fusão, permitindo apenas um grau de refino limitado, pelo que a qualidade de ferro produzido depende intimamente da natureza da carga metálica e do combustível utilizados. O seu rendimento térmico é favorável principalmente no período de pré-aquecimento e fusão das cargas, alcançando cêrca de 60%, baixando porém para 7% na fase de superaquecimento do metal líquido.

As inovações introduzidas recentemente, tais como o pré-aquecimento de ar e os cubilôs sem revestimento, resfriados a água, conduzidos pelo processo básico, vêm expandindo muito o campo de aplicação desses fornos, porquanto permitem campanhas mais longas (de várias semanas), economias de combustível e aprimoramento do processo metalúrgico através de melhor contrôle de temperatura e melhor refino. Conseguem-se, assim, vantagens econômicas tanto no que se refere à economia de combustível, como através do uso de cargas metálicas de menor custo.

Fornos de reverbero — Fornos de reverbero longos (air furnaces) têm sido muito utilizados, principalmente nos EE.UU. para a produção de maleável de coração preto (tipo americano).

(1) Contribuição apresentada no Simpósio sobre Eletrosiderurgia; Salvador, BA; setembro 1968.

(2) Vice-Presidente da ABM; Engenheiro Civil e Eletricista. Diretor de EISA Ltda.; São Paulo, SP.

São aquecidos, de preferência, a carvão pulverizado de qualidade adequada (alto teor de voláteis) e quando operados sem pré-aquecedores, apresentam rendimento térmico baixo, da ordem de 15%. Podem também utilizar óleo combustível ou mesmo a combinação de carvão, óleo ou gás.

As perdas por oxidação são elevadas, o que exige cargas com alta porcentagem de gusa, da ordem de 30 a 40%. Pelas razões acima, são preferidos para operarem em Duplex ou como fornos de espera em conjunto com fornos cubilô.

Esses fornos são normalmente construídos para capacidades de carga acima de 10 t (10 a 40 t), pelo que não se prestam para pequenas fundições. Nessas, são utilizados fornos de reverbero curtos de menor capacidade, os quais são construídos para capacidades desde 150 kg de carga. Esses fornos são geralmente designados por nomes comerciais, destacando-se os fornos do tipo Sklenar e Reverbale, aquecidos geralmente a óleo ou a gás e que, graças aos recuperadores rudimentares com que são equipados, apresentam rendimentos térmicos aceitáveis para pré-aquecimento e fusão de ferro.

Fornos rotativos, conhecidos como Fulmina e Brackelsberg, são também empregados, em escala limitada, devido ao seu custo inicial elevado e a problemas de refratários, que oneram muito o custo de operação.

Pequenas fundições ainda utilizam fornos de cadinho para fusão de ferro, nos quais consegue-se produzir ferro fundido ou maleável de qualidades, devido à ausência de contato da carga com os gases de combustão, porém com o inconveniente do alto custo dos cadinhos e do baixo rendimento térmico. Esses fornos são geralmente aquecidos a óleo, gás ou a coque, e suas capacidades vão normalmente de 50 a 500 kg de carga.

3. FORNOS ELÉTRICOS

A medida que se expande mundialmente a capacidade de geração de energia elétrica, vem se generalizando a tendência de emprêgo de fornos elétricos na produção de ferro fundido, principalmente devido à sua versatilidade metalúrgica.

Os tipos de fornos elétricos empregados para fundição de ferro são os seguintes:

— Fornos a arco:

- direto
- indireto

— Fornos a resistência

— Fornos a indução:

- com núcleo ou de canal
- sem núcleo ou de cadinho:
 - frequência de linha
 - média frequência
 - alta frequência

Fornos a arco direto — Fornos a arco direto têm sido os mais amplamente utilizados para a fundição de ferros de qualidade ou ligados pelo fato de permitirem grande flexibilidade metalúrgica, pois que trabalham tanto pelo processo ácido ou básico ou com escória neutra, podendo produzir uma larga gama de produtos a partir de cargas metálicas as mais variadas.

Nos fornos trifásicos, tipo Heroult, o arco, que é mantido entre os eletrodos e a carga metálica, gera a maior parte do calor, que também é provocado em pequena proporção pela passagem da corrente através da carga.

Fornos a arco direto são fabricados comercialmente para capacidades de carga de 2 a 200 t, vindo equipados com transformadores de 1.000 a 50.000 kVA.

Esses fornos apresentam ótimo rendimento térmico no período de pré-aquecimento e fusão das cargas (cêrca de 75%) e rendimentos aceitáveis no superaquecimento do banho, da ordem de 25%. Demandam porém investimento elevado, sendo o seu custo de operação sensivelmente onerado pelo consumo de eletrodos.

Se bem que, fornos a arco direto venham sendo fabricados desde o princípio do século, vêm passando por aperfeiçoamentos constantes que justificam a sua preferência por parte das fundições de ferro. Esses aperfeiçoamentos referem-se aos dispositivos de regulação de eletrodos (regulação hidráulica) e de comando do forno que permitiram aumentos ponderáveis da potência de alimentação por unidade de carga de forno, melhorias nos métodos de carregamento (carga de tópo), mudanças sob carga de "taps" de voltagem e de reatâncias, garras de eletrodos comandados à distância, melhorias dos dispositivos de basculamento, melhorias do refratário e de suspensão das abóbadas. O consumo nesses fornos, para fundição de ferro, oscila entre 450 e 600 kWh/t, dependendo das condições de operação e o dispêndio de eletrodos é da ordem de 5 a 6 kg/t.

Fornos a arco indireto — Para pequenas fundições, que visam produções inferiores a 2 t de ferro líquido por hora, não se recomenda o uso de fornos a arco direto, e sim fornos a arco indireto, que são construídos para capacidades de carga menores: 10 a 2.000 kg.

Nos fornos a arco indireto, o arco é formado entre os eletrodos, sendo o calor transferido à carga por irradiação. Esses fornos apresentam necessariamente rendimento inferior ao dos fornos a arco direto, porém em sua construção mais divulgada, forno basculante tipo "Detroit", contam com boa aceitação por parte das fundições de ferro de porte médio e pequeno.

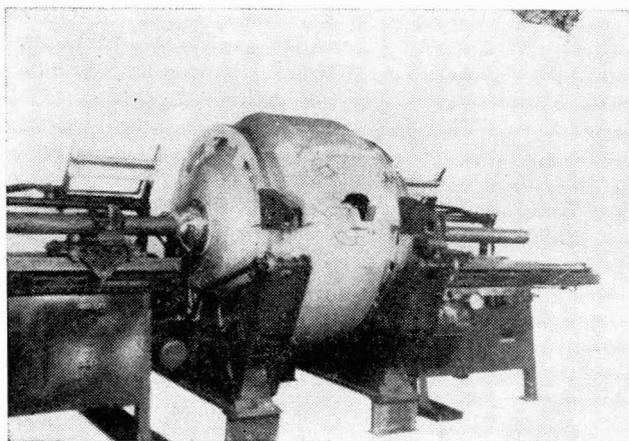


Fig. 1 — Forno elétrico a arco monofásico, basculante, tipo Detroit, com suporte independente dos eletrodos e regulação automática do forno.

Os fornos “Detroit” são essencialmente fornos de fusão, pois que não comportam escórias reativas. São construídos com carcaças em forma cilíndrica ou de tronco — cone duplo, dispostas horizontalmente. Funcionam com corrente monofásica e seus dois eletrodos são instalados em posição horizontal e munidos de regulação automática. A carcaça é animada de movimento basculante alternativo, cuja amplitude aumenta automaticamente à medida que a carga se funde, a ponto de atingir um ângulo de 160° com a carga inteiramente fundida. Por esse artifício, aumenta-se o rendimento térmico do forno, absorvendo no banho líquido calor irradiado às partes do forno que não seriam cobertas pelo banho, caso o forno fôsse estacionário.

Os fornos “Detroit” são utilizados pelas vantagens que apresentam, principalmente para fundições menores:

- exigem menor investimento no custo inicial e de instalação;
- pela sua simplicidade são de fácil operação, podendo ser operados por elementos menos habilitados, do que os exigidos pelos fornos a arco direto;
- funcionam com voltagem e reatância constantes, prefixadas pelas características da rede de fornecimento de energia, e utilizam potência máxima praticamente durante toda a corrida;
- baixa oxidação dos elementos de liga, resultando na economia desses elementos e em melhor rendimento metálico na fusão;
- em sua versão moderna, apresentam ainda a vantagem de permitir uma rápida substituição de carcaças, reduzindo ao mínimo as paradas para troca de revestimento, tanto em fins de campanha, como para aplicações em fundições de serviço variado.

Por outro lado, o tamanho do forno é limitado por restrições impostas pelas empresas elétricas quanto à carga monofásica permitida sobre a rede trifásica, por dificuldades mecânicas

da sustentação dos eletrodos em posição horizontal e devido a tendência de redução do rendimento térmico do forno, dificuldades essas que restringem a capacidade de carga dos fornos de fabricação corrente a cerca de 2.000 kg, alimentados com transformadores de 1.000 kVA. O consumo de energia nesses fornos é da ordem de 600 kWh/t e o consumo de eletrodos varia entre 4 a 5 kg/t.

Fornos a resistência — Fornos elétricos a resistência, utilizados geralmente para a fusão de ligas não ferrosas, encontram também aplicação em fundição de metais ferrosos, como fornos de fusão ou de espera, em operações duplex. Esses fornos podem ser estacionários ou basculantes, de construção semelhante aos fornos “Detroit”, nos quais os eletrodos são substituídos por bastões de grafita, que irradiam o calor ao banho.

Fornos a resistência, mesmo do tipo basculante, são de menor rendimento do que os fornos a arco, porém apresentam a vantagem de poderem ser usados indiscriminadamente tanto para metais de ponto de fusão elevado, quanto para metais e ligas de baixo ponto de fusão, devido ao fato de não provocarem concentração de temperatura elevada, como ocorre nos fornos a arco. O custo desses fornos é relativamente baixo devido à simplicidade de seu equipamento e dos dispositivos de controle e de comando, sendo a regulação de temperatura nesses fornos feita, variando-se a voltagem aplicada às resistências de grafita por meio de transformador de voltagem variável.

Fornos desse tipo eram inutilizados na última guerra, pela sua versatilidade, em navios porta-aviões, para a fundição de peças em ligas as mais diversas, destinadas a reparações de emergência.

O consumo de energia desses fornos é superior ao dos fornos a arco, elevando-se, para fornos fundidos, a cerca de 700 a 900 kWh/t.

Fornos a indução — Os fornos a indução têm merecido aceitação crescente em fundições de ferro, a medida que vêm sendo aperfeiçoada sua construção e a técnica de sua utilização.

Empregados inicialmente em unidades de pequena capacidade, principalmente na Europa, atingiram hoje capacidades tais que justificam a sua adoção nas maiores fundições, seja para fusão, como para operações Duplex ou como fornos de espera.

Fornos de indução de 40 t de capacidade já são de uso corrente, podendo se antecipar a instalação de unidades de maior capacidade, atingindo cerca de 100 t de carga.

Os fornos a indução podem ser classificados em: fornos a indução com núcleo ou canal; e fornos a indução sem núcleo ou de cadinho.

Fornos a indução com núcleo — Adotados inicialmente para fusão de metais não ferrosos, encontram hoje em dia ampla aplicação na produção de ferros fundidos.

Funcionam em frequência de linha e a bobina do forno é enrolada sobre um núcleo de aço laminado fechado, semelhante ao dos transformadores. Ao redor do núcleo forma-se um canal refratário que deve ser mantido cheio de metal líquido durante toda a operação. A necessidade de se manter permanentemente metal líquido no canal do forno, obriga à sua utilização contínua, ou de mantê-lo ligado em baixa potência durante as horas de não funcionamento. Esse fato dificulta a mudança do tipo de metal a ser fundido, pois que a substituição do metal exige o emprêgo de um forno auxiliar. A solidificação acidental do metal do canal, exige geralmente providências dispendiosas para a demolição e reconstituição de mesmo.

A fusão de ferro fundido em fornos a indução com núcleo pode acarretar sérios problemas de refratários, principalmente devido ao desgaste de canal, influenciando de maneira crítica a temperatura máxima a ser atingida durante a operação, a qual não deve ultrapassar 1450°C. Mesmo quando aplicados para fusão, o banho líquido a ser mantido é da ordem de 20% a 30% de capacidade de carga, o que torna difícil a mudança da composição do metal a ser produzido.

Por conseguinte, esses fornos são indicados de preferência para fundições de ferro com fornos de espera e superaquecimento. São fabricados correntemente para fundições de ferro em forma cilíndrica para capacidades de cargas que variam entre 10 e 100 t demandando potências desde 500 a 2.000 ou 4.000 kW, conforme a sua finalidade. Os fornos maiores são hoje equipados com canais múltiplos. O consumo de energia nesses fornos oscila entre 550 e 700 kWh/t, conforme seu tamanho e aplicação.

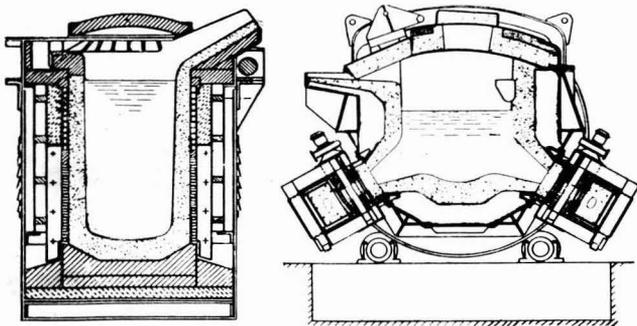


Fig. 2 — Aspecto típico de forno a indução sem núcleo, tipo cadinho e de forno a indução com núcleo de canal.

Fornos a indução sem núcleo — O forno a indução sem núcleo funciona também segundo o princípio de um transformador, porém desprovi-

do do seu núcleo magnético. O primário do transformador é constituído de uma bobina, em geral construída em tubo de cobre, de poucas espiras, a qual é percorrida pela corrente primária alternada e refrigerada por água em circulação.

Fornos a indução sem núcleo são construídos para trabalhar em correntes de frequências, variando desde 50 ou 60 Hz (frequência de linha) até 20.000 Hz, pelo que oferecem excelente flexibilidade de aplicação a qualquer tipo de metal.

Em primeira aproximação, pode-se relacionar a frequência desejável apenas à capacidade do forno, recomendando-se para várias capacidades as seguintes frequências de corrente:

Capacidade do forno (kg)	Frequência (Hz)
1 — 25	10.000
5 — 250	3.000
100 — 2.000	1.000
1.500 — 7.000	180 (150)
4.000 — 10.000	60 (50)

A potência aplicada ao forno é, no entanto, um fator inter-relacionado e que deve ser selecionado conforme a aplicação do forno. A escolha criteriosa da frequência e da potência do forno segundo sua capacidade e finalidade, são fatores de importância primordial para o êxito da operação.

Há sempre a tendência de se escolher frequências mais baixas e potências excessivas por motivo de economia, resultando daí sérios problemas de turbulência e desgaste do refratário.

Para capacidades menores e para fusão a partir de carga sólida, onde se requer mudanças frequentes de composição, recomenda-se o forno de média frequência desde 180 Hz (150 Hz) a 960 Hz. Para maiores capacidades, e no caso de pouca diversidade de composições, recomenda-se o forno de indução de frequência de linha.

Esses fornos não são recomendados para fusão a partir de carga fria, por necessitarem a manutenção de um banho líquido de cerca de 1/3 de sua capacidade para operarem em regime de bom rendimento. O rendimento do forno de indução sem núcleo é inferior ao do forno a arco, na fase de pré-aquecimento da carga e fusão, da ordem de 60%, atingindo porém valores favoráveis no período de superaquecimento da carga líquida, cerca de 60%.

Também os fornos a indução de cadinho se ressentem de sérios problemas de refratários, pois que a espessura do cadinho deve ser mantida ao mínimo, sob pena de comprometer seriamente o rendimento do forno. Tratando-se, geralmente, de massas apizoadas de pouca resistência mecâ-

nica e mais sujeitas a ataques químicos, as condições de trabalho — temperatura, escória, turbulência — devem ser cuidadosamente controladas a fim de evitar insucessos desastrosos e riscos de ruptura do cadinho sob carga.

A fim de superar-se o problema da fusão de cargas frias em fornos a indução, vêm sendo desenvolvidos muitos esforços no sentido de se desenvolver um método de superaquecimento econômico e que não submetta a carga metálica a oxidação excessiva. Um pré-aquecedor a gás natural surgiu recentemente, o qual permite aquecer as cargas contidas em recipientes especiais, a temperaturas da ordem de 1.000°C em 6 a 7 minutos. Essa operação permite grande economia de energia, em zonas que dispõem de gás natural a custo conveniente, permitindo ainda aumentar ponderavelmente a produção do forno elétrico sem aumento de demanda de energia.

Fornos a indução sem núcleo são fabricados correntemente para capacidades de carga desde 1,5 a 40 t, equipados com transformadores de 400 a 2.500 ou 7.000 kW, conforme a função a que se destinam. Fornos maiores, com capacidades até 100 t, já vêm sendo instalados com êxito.

O consumo de energia para fusão a partir de carga fria oscila nesses fornos entre 500 e 600 kWh/t, sendo porém bastante mais favorável para marcha contínua a partir de banho líquido.

4. PROCESSO DUPLEX

A fusão e refino de ferro fundido nem sempre se processa em um só forno, havendo casos em que a fusão se processa em um forno e o refino ou ajuste final de composição e de temperatura é efetuado em outro forno; êste processo é denominado duplex. O segundo forno pode também ser utilizado como forno de espera (holding) para manutenção e ajuste de temperatura de uma corrida fundida em forno intermitente, a medida que se procede ao vasamento contínuo da mesma. O processo duplex é adotado somente em fundições de ferro de maior produção, a partir de 5 t/horárias de metal líquido, visando objetivos diversos, tais como:

- economia no custo de fusão de metal, quando se destina a peças de qualidade; procedendo-se à fusão em forno a combustível mais econômico e o refino e ajuste final em forno elétrico;
- aumento de capacidade de produção de um forno elétrico; fundindo-se em forno mais barato do ponto de vista de investimento, permitindo assim duplicar ou triplicar a capacidade do forno elétrico;
- melhor aproveitamento da demanda de energia elétrica disponível, aumentando ponderavelmente a produção com pequeno aumento da demanda exigida pelo forno a combustível;

— necessidade de se sincronizar a produção de um forno intermitente com uma demanda contínua de metal (caso de fundição mecanizada);

— necessidade de se manter a composição do metal e temperatura dentro de estreitos limites para se atingir nas peças determinadas propriedades mecânicas ou físicas, dentro de especificações rigorosas.

Conforme será visto adiante, do ponto de vista econômico, cada forno apresenta vantagens para determinadas fases metalúrgicas, podendo-se, no processo duplex, escolher sob êsse aspecto o forno mais econômico para determinada fase, pré-aquecimento e fusão de carga por exemplo e, para a fase seguinte, adotar também o forno mais apropriado para o superaquecimento do metal.

Do ponto de vista estrito do rendimento térmico um forno cubilô, por exemplo, apresenta um rendimento da ordem de 60%, quando utilizado apenas para pré-aquecimento e fusão da carga, caindo seu rendimento para 4 a 7% para o superaquecimento do banho líquido. Assim, também o forno a arco direto apresenta rendimento da ordem de 75% na fase de fusão e de apenas 25% no superaquecimento, ao passo que o forno a indução apresenta rendimento de cerca de 60% no superaquecimento, sendo portanto preferido, tanto em seu tipo de cadinho, como no de canal, para essa função.

A escolha dos fornos não obedece apenas a critérios de economia térmica, pois que entram na escolha principalmente critérios metalúrgicos e de economia com matérias primas, que permitam a produção econômica — custo do ferro na bica — do tipo de ferro desejado. Há também a considerar o problema de investimento e confiança no equipamento.

Uma solução bastante adotada é a fusão em forno cubilô e refino e superaquecimento em forno a arco ou a indução. É também freqüente o uso de forno de fusão a arco com superaquecimento e "holding" em forno a indução.

Pré-aquecedores a gás, citados no capítulo referente a fornos a indução, podem — pela sua economia em zonas que dispõem de gás natural sempre a baixo custo — ser utilizados também em conjunto com fornos a arco ou outros fornos que utilizam energia mais cara.

5. CRITÉRIOS DE ESCOLHA DE FORNO DE FUNDIÇÃO DE FERRO

Examinados os tipos de forno correntemente utilizados para a fundição de ferro, passa-se a analisar os critérios de escolha do forno mais apropriado para determinada aplicação.

Os fatores principais de escolha na ordem de sua importância seriam:

- aspecto metalúrgico
- custo de operação
- importância do investimento

— *Aspecto metalúrgico*: A primeira questão a se considerar é se o forno ou fornos se prestam à produção, em regime industrial, das peças desejadas dentro das características exigidas.

Um dos aspectos freqüentemente discutidos é sobre se existem ou não diferenças intrínsecas nas propriedades dos ferros fundidos, produzidos em diferentes tipos de fornos. Os “tabús” atribuídos a fornos de fusão no que se refere à sua influência sobre a qualidade do ferro produzido, bem como os atribuídos à “hereditariedade”, provenientes das próprias matérias primas, vêm sendo progressivamente derimidos à luz dos conhecimentos modernos da metalurgia do ferro fundido. Admite-se hoje em dia a possibilidade de se produzir ferros fundidos de qualidade equivalente em qualquer tipo de forno.

A vantagem dos fornos elétricos sobre os de combustível, que é real e justificada, deve-se principalmente pela facilidade de assegurarem a reprodução das propriedades desejadas, de corrida para corrida.

As propriedades de um ferro fundido são determinadas basicamente pelos seguintes fatores metalúrgicos:

- matérias primas
- pequenos aditivos ou elementos residuais
- ambiente do forno
- ciclo tempo/temperatura

Os materiais da carga determinam em grande parte a composição química final do ferro produzido. Os teores de elementos básicos — carbono, silício, manganês, fósforo e enxôfre — são normalmente determinados em laboratório, não sendo porém por vezes suficientes para caracterizar as propriedades do ferro fundido, pois que elementos residuais cujos teores são raramente determinados podem afetar profundamente as propriedades das peças produzidas, mesmo quando ocorrem em teores diminutos. Quantidades diminutas de elementos tais como, cromo, antimônio, arsênico, boro, titânio, vanádio e estanho, mesmo em teores considerados como traços, afetam por vezes drasticamente a nucleação por motivos até hoje inexplicados. Exemplos há de ruptura em serviço de peças de ferro fundido de grande porte, devido à ocorrência de teores de chumbo de 0,003% ou teores de telúrio e bismuto da ordem de 0,0005%, provocando a formação de reticulados grosseiros de grafita.

Esses elementos são introduzidos com os materiais da carga ou absorvidos no forno durante a fusão e podem ser eliminados parcialmente em forno cubilô por oxidação, ao passo que em fornos a indução não se dá a sua eliminação, podendo seus efeitos se tornarem cumulativos. Além da composição química, também as características físicas da carga podem influir sobre as propriedades finais do ferro resultante. Assim, a densidade aparente relacionada com a superfície exposta ao ambiente do forno afeta sensivelmente a sua capacidade de absorver impurezas durante a fusão. A superfície de uma carga consistindo de cavacos de torno pode ser 100 vezes superior à de uma carga constituída de lingotes de gusa, o que torna desaconselhado o emprego de cargas daquele tipo, em fornos dotados de ambientes altamente oxidantes ou ricos em outros elementos prejudiciais tais como enxôfre, introduzido pelo coque em fornos cubilô.

Na escolha da matéria prima para a produção de determinado produto é, portanto, indispensável que se tome em consideração o tipo de forno a ser utilizado. Fornos a combustível exigem em geral na carga porcentagens elevadas de gusa, ao passo que fornos elétricos podem operar com cargas de baixa densidade aparente e constituídas inteiramente de sucata de aço. Fornos elétricos a arco admitem grande latitude na escolha das cargas, uma vez que se pode controlar a natureza da atmosfera e proceder a algum refino durante a fusão. Fornos a indução são mais limitados quanto aos materiais de carga, no que se refere a suas características físicas, e exigem matérias primas limpas devido a não se prestarem a refino e pela necessidade de se manter ao mínimo o volume de escória que provoca ataque do cadinho, além de introduzir pela turbulência do banho inclusões não metálicas no mesmo.

A técnica da introdução de aditivos de natureza grafitizante (inoculantes) ou de endurecedores, também varia conforme o tipo de forno de fusão adotado; exige-se, por exemplo, maior inoculação em fornos elétricos provavelmente devido à deficiência de nucleação causada pelas temperaturas mais elevadas de superaquecimento, ou mesmo devido aos próprios materiais de carga.

De um modo geral, corridas de forno elétrico, e particularmente forno a indução, tendem a apresentar propriedades mecânicas mais elevadas do que as do forno cubilô, mesmo para composições aparentemente iguais, em parte devido aos elementos residuais e em parte devido a diferenças de nucleação provocadas por desigualdades de ciclo tempo/temperatura das corridas.

O ambiente do forno é caracterizado essencialmente pelos seguintes elementos:

- atmosfera do forno
- revestimento refratário
- escória

e pode variar drásticamente não só de forno para forno, como também em determinado forno segundo as condições de fusão. Assim, no forno cubilô o ambiente favorece absorção de enxôfre e oxidação da carga, o que pode ser evitado em fornos elétricos. Por outro lado, nos fornos elétricos e mesmo em um forno a indução, a carga pode ser submetida tanto a condições oxidantes — no caso de fusão lenta de uma carga inteiramente sólida — como a ambiente redutor — no caso de forno coberto, trabalhando com grandes porcentagens de banho líquido e pequenas adições de material sólido.

O efeito dos gases sobre as propriedades do ferro fundido é por vêzes marcante, e aparentemente sua ação se processa por via indireta em combinação com outros elementos de composição. Na maioria dos casos os gases nos fornos sendo oxidantes em maior ou menor grau, provocam a oxidação dos elementos residuais mais prontamente oxidáveis.

A ocorrência de gases redutores ou neutros, geralmente prejudiciais, hidrogênio e azoto é mais freqüente nos fornos elétricos e, principalmente, nos a indução, devido à atmosfera redutora, devendo ser tomados cuidados especiais a fim de evitar a formação desses gases: secagem ou desengraxamento das cargas.

A escória formada pela reação entre óxidos metálicos, refratários e as adições de materiais de escória, varia de natureza de forno para forno e conforme o processo metalúrgico utilizado.

Para ferro fundido o revestimento mais utilizado é o sílico-aluminoso e a escória resultante é de natureza ácida, e pouco reativa. Com o evento do ferro nodular, utiliza-se cada vez mais revestimento básico, tanto em fornos cubilô, como nos elétricos, o que permite refino do banho e principalmente a eliminação parcial do enxôfre. Nos fornos a indução e fornos a arco indireto e de reverbero, evita-se dentro do possível a formação de escória.

O ciclo tempo/temperatura durante a fusão e superaquecimento do ferro fundido, influencia profundamente as suas propriedades agindo sobre a nucleação e conseqüentemente sobre a grafitização do ferro. Fornos cubilô oferecem pouca flexibilidade no controle desses importantes parâmetros, porém quando operados em condições normais produzem ferro com boa tendência a grafitização. Em fornos elétricos e, principalmente, nos a indução, pode-se prolongar sem risco o tempo e a temperatura de superaquecimento, o que resulta em ferro com menor tendência a

grafitização e que exige inoculação mais intensa, caso se vise a produção de peças de ferro cinzento de fácil usinagem.

Conclue-se, portanto, que através do controle criterioso dos materiais de carga e das condições de fusão, e utilizando-se técnica de inoculação apropriada, pode-se conseguir nos diversos fornos ferros fundidos de propriedades equivalentes — o processo e não o forno é que determina as propriedades finais das peças produzidas.

Convém ressaltar, porém, que fornos elétricos, pela sua maior facilidade de controle, garantem mais fielmente a reprodução das propriedades exigidas de corrida para corrida. Oferecem também maior flexibilidade de operação, o que permite maior latitude na escolha das matérias primas e dos tipos de metais que podem ser produzidos.

— *Custo de Operação*: Os requisitos de produção de metal quente na base horária diária, ou semanal, bem como o grau de regularidade exigido de vasamento determinam em grande parte a escolha da unidade de fusão. O custo de operação caracterizado pelo custo de energia ou de combustível, da mão de obra, de refratários, de eletrodos, de controle, etc. e o investimento por tonelada de metal fundido podem variar drásticamente segundo a modalidade de operação da fundição conforme se trata de fundição destinada a fundir continuamente grandes toneladas de metal ou de fundição de pequena produção tipo "jobbing". Fornos cubilôs prestam-se a fundição contínua na razão mínima de 3 ou 4 t/h e em regime de 8 a 10 h de trabalho. Fornos elétricos apresentam maior economia quando operados em 3 turnos por conseguirem assim redução da taxa de energia elétrica mantendo a demanda máxima constante, e da taxa de investimento, além das outras economias operacionais.

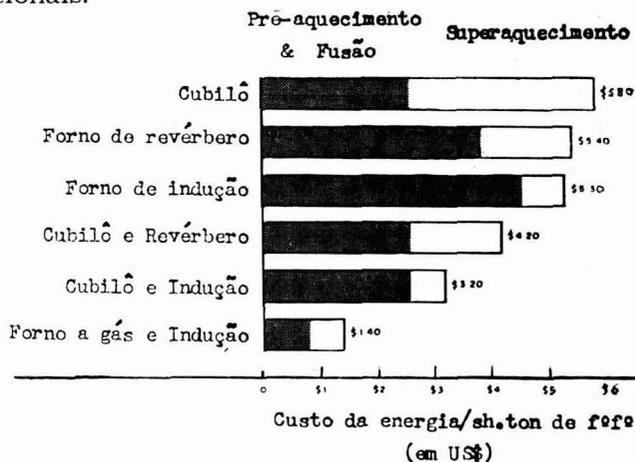


Fig. 3 — Valores comparativos do custo de energia na operação de vários tipos de fornos e na utilização dos mesmos em operação duplex.

Como os custos de energia ou de combustíveis variam de região para região, não é possível estabelecer-se normas fixas de comparação entre os vários fornos, quando encarados exclusivamente sob o aspecto do custo energético de operação. Contudo, estudos feitos para uma determinada região podem servir de norma para aplicação a outras regiões, no que se refere a valores comparativos. Assim, um trabalho publicado recentemente nos Estados Unidos comparando custos energéticos para vários tipos de fornos contém dados que passamos a examinar por merecerem interesse também em nosso meio. Uma premissa que convém destacar é que os valores energéticos na fusão e superaquecimento do metal se distribuem a grosso modo da seguinte forma: 65% para o pré-aquecimento da carga, até a temperatura de fusão de 1.260°C, 22% para fusão da carga à temperatura de 1.260°C e 13% para o superaquecimento da carga até 1.482°C.

Os fornos analisados segundo a sua eficiência nas diversas fases de operação apresentam os seguintes rendimentos aproximados: pré-aquecimento e fusão apenas — forno cubilô 60%, forno a indução 60%, forno a arco 75%; no superaquecimento do banho líquido — forno cubilô 7%, forno a indução 60%, forno a arco direto 25%. Aplicados para os três fornos mencionados os rendimentos acima, no cálculo do custo energético de fusão processada em um mesmo forno e tomando por base o custo por caloria de aproximadamente 1 para o coque e 2 para energia elétrica, chega-se a resultados comparativos de custo, exclusivamente do aspecto energético, por tonelada de ferro líquido de cerca de 5,8 para o cubilô e 5,4 para os fornos elétricos.

Caso, porém, as condições de trabalho e a capacidade de fusão da fundição comportem ope-

ração em duplex, os fornos podem ser combinados dois a dois, de modo a se utilizar cada forno em sua posição mais vantajosa. Chega-se, neste caso, para a combinação cubilô-forno a arco a um valor de 4,2, cubilô-forno de indução a um valor de 3,2 e forno a arco e forno a indução a um valor de 4,4, sempre inferiores aos dos fornos em operação simplex. Conforme já exposto, o artifício ultimamente utilizado de se pré-aquecer as cargas sólidas em forno a gás do tipo especial ou mesmo de proceder à fusão em fornos evoluídos a gás, cujos rendimentos para pré-aquecimento e fusão já atingem cerca de 40% e para os quais se prevê possibilidade de se chegar a 60% de rendimento, permitiria grande economia em regiões que disponham de gás natural a baixo custo. Avalia-se que uma operação duplex combinando forno a gás para fusão com forno a indução para superaquecimento, permitiria baixar o custo energético da operação para 1,4 aproximadamente. Depreende-se, portanto, que uma solução criteriosa do processo de fusão pode acarretar economias substanciais exclusivamente do ponto de vista energético.

O custo energético da fusão é apenas uma parte do custo total do metal líquido na bica, devendo ser computados no custo total diversas outras despesas, tais como: consumo de eletrodos e de refratários, manutenção, mão de obra, contrôles, além de outros gastos diretos e indiretos, tais como amortização e juros sobre o investimento.

Em outro estudo publicado recentemente nos Estados Unidos, comparou-se o custo de operação de várias combinações de fornos elétricos para se atingir produções de 5, 10 e 15 t/h, em períodos de dois turnos, e chegou-se aos resultados comparativos indicados na tabela I.

TABELA I — Resultados comparativos do custo de diversas combinações de fornos nos EE.UU.

Produção	Custo de Operação US\$/ton	Taxa de Investimento US\$/ton	Total US\$/ton
5 t/h			
Duplex — forno a arco direto — forno a indução	14,43	2,41	16,84
Forno a indução — carga fria	11,41	2,55	13,96
Forno a indução com pré-aquecimento a gás	11,27	3,01	14,28
10 t/h			
Duplex — forno a arco direto — forno a indução	13,55	2,01	15,56
Forno a indução — carga fria	10,20	2,56	12,74
Forno a indução com pré-aquecimento a gás	10,19	2,36	12,55
15 t/h			
Duplex — forno a arco direto — forno a indução	13,27	1,89	15,16
Forno a indução — carga fria	9,77	2,54	12,31
Forno a indução com pré-aquecimento a gás	10,30	2,14	12,44

Os números indicados na tabela I referem-se a custo de fusão por tonelada curta, excluído o custo da carga metálica. A taxa de investimento foi considerada na razão de 14% do custo do capital empregado. Observa-se de imediato que os custos de operação das várias alternativas são suficientemente próximas para tornar o custo da carga metálica um fator decisivo na escolha da melhor solução. É sabido que o forno a arco representa a solução mais flexível para aproveitamento de diversos tipos de matérias primas. No entanto, freqüentemente ocorrem condições que permitem pré-fixar o tipo de matéria prima a ser utilizado, podendo a mesma ser mais apropriada para fusão em forno a indução, por exemplo. Também o tipo de produto pode determinar a escolha do processo, pois que como vimos, o forno a indução seria indicado para casos em que se pretende produzir um número limitado de tipos de ferros fundidos, ao passo que fornos a arco são especialmente indicados para operações que exijam variações freqüentes de composições. O custo da energia é fator preponderante do custo de operação, seguindo-se em importância ao da carga metálica, pois que representa aproximadamente 40% do custo de operação total sem a carga. No forno a arco, segue-se o custo dos eletrodos.

Importância do Investimento: O valor do investimento de um conjunto de fusão inclui muitos itens, além do preço do equipamento em si, conforme cotado pelo fabricante. Muitos desses itens podem variar de fundição a fundição, dependendo de condições locais, de peculiaridades de instalação e de exigências específicas da operação. Torna-se, portanto, difícil emitir conceitos visando generalizações, cabendo apenas apontar alguns dos itens que merecem destaque em um estudo de implantação de fundição. Assim, numa operação instalada próxima de uma área urbana, a área exigida para fusão, com determinado tipo de forno, representa fator ponderável de escolha. Exigências sanitárias podem obrigar

a instalação de dispositivos contra poluição de ar, muito dispendiosos para fornos cubilô e mais baratos para fornos a arco direto, podendo, no entanto, ser dispensados nos fornos a indução. O estudo citado anteriormente encerra também dados comparativos de investimento dos três tipos de instalações mencionadas e para os níveis de produção indicados chega-se aos valores em moeda americana indicados na tabela II.

Verifica-se, portanto, que do ponto de vista de investimento, a solução da operação duplex é a mais favorável, havendo vantagem de pré-aquecimento prévio relacionado com o forno a indução para as produções mais elevadas, isto é, 10 e 15 toneladas por hora.

6. CONCLUSÕES

Como foi visto, são várias as alternativas que se apresentam ao se buscar solução para a escolha de fornos para a produção de ferro fundido.

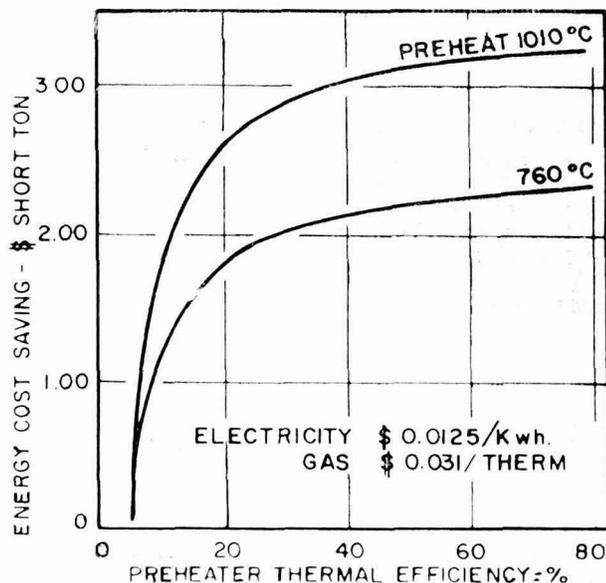


Fig. 4 — Economia de energia proveniente do preaquecimento de ar no cubilô.

TABELA II — Dados de investimentos para as instalações indicadas na tabela I.

	5 t/h US\$	10 t/h US\$	15 t/h US\$
Duplex — forno a arco direto — forno a indução			
Custo total forno a arco instalado	230.000	356.000	475.000
Forno de espera a indução	84.000	169.000	260.000
Total, inclusive imprevistos	345.000	575.000	810.000
Forno a indução	365.000	725.000	1.090.000
Forno a indução com pré-aquecimento	430.000	675.000	915.000

Para cada caso em estudo, os fatores de escolha apontados, aspecto metalúrgico, custo de operação e importância do investimento, devem ser considerados à luz das condições de operação previstas e das demais condições peculiares ao caso. No entanto, os dados apresentados permitem chegar a algumas conclusões de caráter geral aplicáveis às nossas fundições como critérios de escolha de fornos de fusão, quais sejam:

- fornos a combustível não se apresentam em nosso meio como equipamentos recomendados para a produção constante de ferros fundidos de qualidade, principalmente pelo fato de não permitirem reprodução fácil de propriedades mecânicas e físicas dentro de normas rígidas; não são recomendados para ferros ligados ou para peças que exigem propriedades elevadas;
- para produções elevadas, fornos a combustível do tipo cubilô podem desempenhar economicamente a função, quando utilizados em processo duplex com fornos elétricos;
- no que se refere ao investimento, o forno cubilô usual de revestimento ácido, utilizando ar frio oferece a vantagem de menor investimento por tonelagem de produção. Contudo, o seu custo operacional é relativamente alto; maiores economias são possíveis com fornos insuflados com ar quente, sem revestimento, munidos de camisa d'água e operados em regime básico, demandando estes, porém, investimento elevado, principalmente se for necessário também um equipamento de eliminação de poeira;
- do ponto de vista metalúrgico, a utilização de fornos elétricos para a produção de peças de ferros fundido de qualidade, de maleável e de nodular, é muito vantajosa quando se visa qualidade e regularidade do produto;

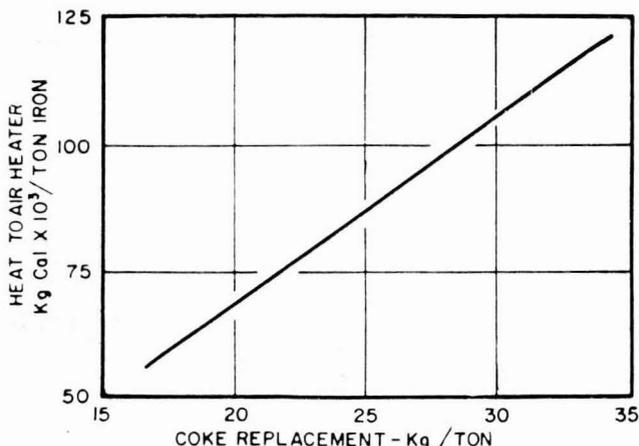


Fig. 5 — Economia de coque em cubilô, através do preaquecimento de ar com combustível de menor custo.

Os fornos elétricos apresentam, em relação aos a combustível, as seguintes vantagens:

- possibilidade de atingir temperaturas elevadas, limitadas apenas pela resistência ao calor do refratário;
- a carga metálica não sofre contaminação por parte de elementos prejudiciais, que ocorrem geralmente nos gases de combustão;

- devido à sua estabilidade de funcionamento, fornos elétricos permitem controlar facilmente tôdas as fases da operação através de elementos de regulagem precisos;
- fornos elétricos podem ser escolhidos de modo a operar com ou sem escória, de acôrdo com a conveniência da operação — refino ou simples fusão — podendo ser operados com refratários ácidos, básicos ou neutros;
- facultam menores perdas por oxidação e portanto menor perda de elementos de liga e maior rendimento metálico resultando daí maior precisão no atendimento das especificações quanto à composição química do produto e, portanto, capacidade de manter um padrão uniforme de qualidade;
- menor refugo devido a desacertos de especificações e de defeitos de fundição;
- operação mais limpa tanto quanto ao ambiente da própria fundição, como na contaminação atmosférica dos arredores.

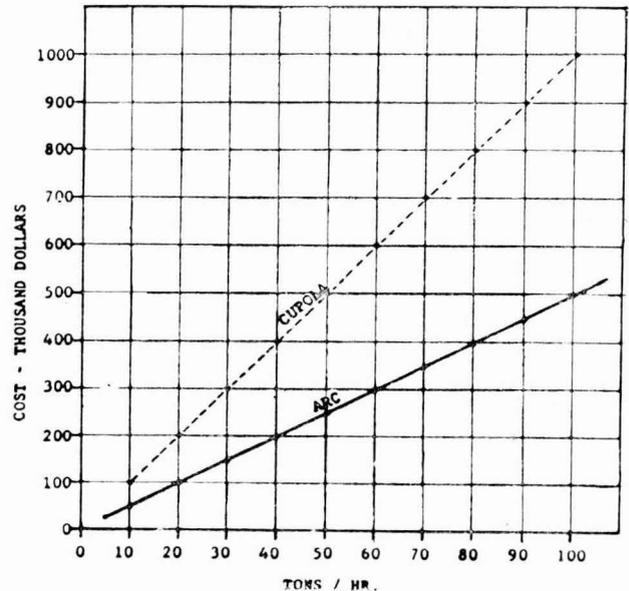


Fig. 6 — Custo comparativo da instalação de eliminação de pó para fornos cubilô e a arco, em função da capacidade de fusão.

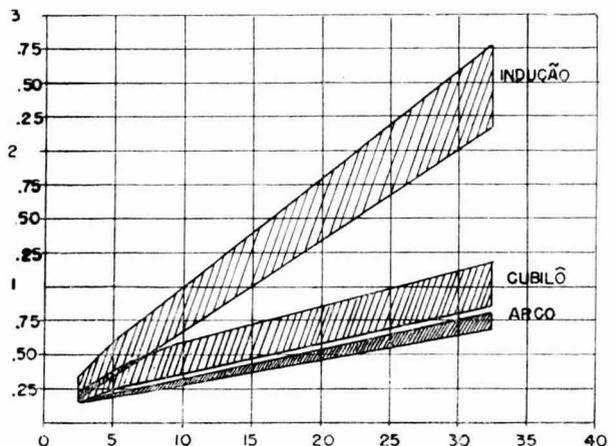


Fig. 7 — Comparação do custo instalado de fornos arco, cubilô e a indução, em função da capacidade de fusão em t/h.

As vantagens enumeradas não se aplicam indiscriminadamente a todo os tipos de fornos elétricos, apresentando cada um vantagens que o recomendam para determinados fins ou inconvenientes que tornam desaconselhados para outras finalidades. Assim:

- fornos a arco são próprios para a produção de ferros fundidos de composições variadas sendo por isso também recomendados para fundições tipo "jobbing";
- fornos a arco indireto são vantajosos para simples fusão e fundições de baixa produção, recomendando-se fornos a arco direto para produções superiores a 2 t/h, a partir de carga fria;
- fornos a arco comportam grande latitude de matérias primas e principalmente os a arco direto que admitem refino;
- fornos a arco admitem uma grande latitude de produtos desde ferros fundidos comuns até maleáveis, nodular e ferros de alto teor de ligas; comportando o forno a arco indireto até a fusão de não ferrosos e o a arco direto a produção de aços;
- fornos a arco facultam grandes facilidades de controle metalúrgico e grande amplitude na variação do ciclo tempo/temperatura;
- fornos a arco podem resultar mais econômicos do que fornos a combustível se forem levados em consideração as economias possíveis com matérias primas da carga, menores perdas de elementos de liga, por oxidação e, com a redução de refugo de fundição;
- fornos a indução de frequência de linha são especialmente indicados para fusão contínua sendo desaconselhados para fusão a partir de carga sólida;
- fornos de indução de alta e média frequência são aplicáveis a fusão a partir de cargas sólidas porém o seu custo raramente justifica o seu uso para ferro fundido salvo quando se destinam a composições de altos teores de ligas;
- fornos a indução de frequência de linha são ideais para produção contínua de composição pouco diversificada onde se possa conservar sempre 1/3 do banho líquido no forno;
- fornos a indução com núcleo são próprios para serem utilizados como fornos de espera ou para duplex em operações que exijam adições moderadas de materiais sólidos;
- pontos críticos de fornos a indução de frequência de linha, são o refratário e, a temperatura máxima que podem atingir sem risco que é limitada geralmente a 1450°/1500°C.

BIBLIOGRAFIA

1. ABM — Curso de Fundição; maio-agosto 1963.
2. CARLSON R. — Evaluation of cast iron melting in the cupola arc furnace and induction furnace; Charles Edgar Hoyt Memorial Lecture, 1967.
3. MOORE, H. C. — Do irons differ?; Foundry, dez. 1967, p. 64.
4. LILLY, N. P. — Melting practice is determining factor; Foundry, dez. 1967, p. 66.
5. LOPER, G. R. — Control of variables produces equivalent irons; Foundry, dez. 1967, p. 72.
6. LOWNIE Jr., H. W. — Comparing melting energy costs; Foundry, dez. 1967, p. 76.

7. FOSTER, F. W. — Which electric furnace; Foundry, fev. 1968, p. 113.
8. REHDER, J. E. — Modern iron meltig techniques and their application; Modern Casting, jan. 1967, p. 51.
9. GIESSEREI KALENDER, 1968.

DISCUSSÃO

ERICO AMBROS ⁽¹⁾ — Parece-me que, da exposição, ficou uma dúvida a respeito da possibilidade, ou não, da fabricação de nodular em cubilô. Quero esclarecer que tenho conseguido sucesso fundindo ferro nodular em cubilô. A principal diferença entre ferro fundido em forno elétrico e em cubilô, seria a do teor de enxôfre. Durante o processo no cubilô, se esse enxôfre permanecer até 0,06% há, perfeitamente, possibilidade de se obter um nodular, adicionando quantidade suficiente de agente nodulizante, como o magnésio. Não há inconveniente nenhum. A reação se processa normalmente e se obtém nodular 100%, com esferóides perfeitos. Se por acaso o teor de enxôfre passar de 0,06%, há necessidade real de uma dessulfuração; ela poderá ser feita numa panela, trazendo aí certos inconvenientes, porque o processo é um pouco endotérmico; há resfriamento do material e necessidade de uma fonte externa de aquecimento ou então, no próprio cubilô que, reconheço, não é um modo eficiente. Há possibilidade, então, com esse metal líquido, de se fazer inoculação da liga de magnésio na panela e obtermos um nodular perfeito.

No Brasil, devido ao fato do nodular se ter introduzido mais na indústria automobilística, cujas fundições já estavam equipadas com fornos elétricos, existe certa dúvida a respeito do uso do cubilô, porque quem realmente tem possibilidade de fabricar um ótimo ferro nodular já tem fornos elétricos; é natural que vá usá-los. Se já usa o forno elétrico para ferro fundido comum, com muito mais razão vai usá-lo para nodular. Mas deixo aqui bem claro que há possibilidade perfeita de se usar o cubilô para o ferro nodular.

MIGUEL SIEGEL ⁽²⁾ — Os senhores fazem todos os tipos de nodular, ou apenas nodular ferrítico?

E. AMBROS — A diferença entre um nodular ferrítico e um não ferrítico ou misto é mais uma questão de composição química do metal base, depois da inoculação da panela, de ferro-silício, para alterar a estrutura durante a solidificação da peça; não é o forno em si que vai possibilitar a obtenção de ferrítico ou perlítico, e sim a composição do metal.

M. SIEGEL — Pergunto, devido às especificações mecânicas: os senhores vão até nodular perlítico de alta resistência, e com maior alongamento em forno cubilô?

E. AMBROS — Com alongamento em tórno de 10 ou 15%, já consegui em cubilô.

M. SIEGEL — Na verdade, não disse que não podia ser feito no cubilô. Estou ligado à fundição onde também ferro fundido nodular é feito em cubilô. Reconheço assim que é possível, tanto mais que também estamos fazendo. Mas como o senhor disse, é muito

- (1) Membro da ABM. Engenheiro Mecânico e Metalúrgico; de Giuseppe Trincanato & Cia. Ltda.; São Paulo, SP.
- (2) Vice-Presidente da ABM e autor do trabalho. Engenheiro Civil e Eletricista; Diretor de Equipamentos Industriais Eisa Ltda.; São Paulo, SP.

mais segura a produção de nodular dentro das especificações estreitas em um forno elétrico, do que em um cubilô. Nêle, é perfeitamente possível, mas não é fácil.

E. AMBROS — Nisso estou de pleno acôrdo, porque o problema é mais de contrôle.

FELIPPE A. V. FRANCESCHINI (3) — Minha pergunta se refere ao pré-aquecimento de cargas. Pelos dados expostos, fica mais uma vez patenteado o enorme proveito que se pode ter com pré-aquecimento de cargas. Foi pôsto em evidência, especialmente para casos de forno de indução, mas, ôbviamente, como está no trabalho, serve para qualquer tipo de forno elétrico. Quanto ao tipo de combustível, houve certa insistência sôbre o uso de gás. Aparentemente, não é obrigatório o uso de gás; o óleo combustível também pode servir para aquecimento. Apenas, aparentemente, essa prática está menos propagada. Gostaria, e muito, de conhecer dados sôbre pré-aquecimento de carga, principalmente para forno a arco, usando óleo combustível.

M. SIEGEL — Infelizmente, os elementos são escasos. Parece-me que há um processo que está sendo estudado no estrangeiro e que deve ser patenteado; por isso a literatura fala muito pouco em detalhes. Apenas diz que o pré-aquecimento é feito em recipientes especiais, que imagino sejam caçambas de carga de forno, já com capacidade do forno e, graças a determinados artificios, talvez grande velocidade de passagem de gases, consegue-se fazer aquecimento muito rápido, a 1000°C em seis ou sete minutos, o que seria muito difícil de se fazer com óleo, a não ser que êle fôsse gaseificado. Pode ser que com a gaseificação do óleo e utilizando os gases para êsse mesmo processo, consigna-se êsse mesmo resultado. A finalidade da alta velocidade de aquecimento é reduzir ao mínimo a oxidação.

F. FRANCESCHINI — Estou lembrando um dado lido numa conferência, que cita indiferentemente gás ou óleo apenas, e não limita o tempo ou técnica; não faz referência nenhuma ao tempo. O gráfico de rendi-

mento térmico do cubilô é muito expressivo. O rendimento é muito bom até uma temperatura de carga relativamente baixa; daí para cima vai caindo tremendentemente, conforme os dados apresentados. O cubilô de ar quente, aquecido com os próprios gases, apresenta dificuldades; mas, as dificuldades geralmente encontram suas soluções. A solução de se usar combustível externo é simples, mas não é uma solução térmicamente lógica. Pergunto se êste assunto de pré-aquecimento do ar com os gases do cubilô, tem sido estudado com o cuidado que mereceria?

M. SIEGEL — A pergunta se divide em duas partes: quanto à questão do rendimento do forno ser diferente nas duas fases, é uma questão de modalidade de transferência de calor. Na fase inicial, o material está frio e a transferência se faz rapidamente, por convecção, pela diferença de temperatura e devido à grande superfície apresentada pela carga. Com o banho líquido, as condições não são favoráveis a uma transferência de calor por irradiação dentro do cubilô. O banho apresenta uma superfície relativamente pequena e não há possibilidade de se transferir calor eficientemente. De modo que sobe muito o consumo de coque, quando se quer superaquecer o metal a mais de 1300°C. O cubilô, trabalhando a baixa temperatura, trabalha bem economicamente, com relação coque/metall de 1 para 15. Mas, querendo-se trabalhar a 1500°C, então pode ir a 30% o consumo de combustível. Quanto ao pré-aquecimento do ar, a questão é a seguinte: para fornos abaixo de certa capacidade de fusão, o custo, o investimento de uma instalação recuperativa, é alto demais e não se justifica em face das economias que se podem obter utilizando gases do próprio forno; acima de certa capacidade, já se torna justificável. Tomamos, empiricamente, da ordem de 10 a 12 t/h, como limite prático para iniciar o pré-aquecimento por processo recuperativo. É o caso da SOFUNGE, que todos conhecem. Abaixo disso, é questão de se substituir o combustível mais caro (o coque) por um mais barato (o óleo). Se tivéssemos um combustível muito mais barato, aplicado em um trocador de calor, um pré-aquecedor de alto rendimento, de 85% de rendimento, poder-se-ia tirar vantagens bastantes grandes, apesar do pré-aquecedor independente parecer pouco lógico do ponto de vista técnico. É questão de se dispor do combustível mais barato.

(3) Membro da ABM. Engenheiro Civil; Livre-Docente da EPUSP e Diretor da Cerâmica São Caetano S/A; São Paulo, SP.