

PROCESSO DE NODULIZAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS<sup>(1)</sup>

Adalberto Bierrenbach de Souza Santos (2)

Edmundo Alberto Beckert (3)

Ronaldo Fenilli (4)

Adolar Pieske (5)

R E S U M O

Apresentam-se as influências das principais variáveis que interferem no tratamento de nodulização de ferros fundidos. Descrevem-se os principais processos desenvolvidos em que o agente nodulizante é o magnésio.

Relatam-se os resultados experimentais obtidos com o emprego de magnésio puro, coque impregnado de magnésio, briquetes contendo magnésio e uma massa refratária e ligas Fe-Si-Mg (5 a 7% Mg e 8 a 10% Mg). Os processos utilizados foram os de conversor, usando um equipamento desenvolvido na própria Fundação Tupy S.A., panela rotativa, "sandwich", panela com tampa dotada de orifício afunilado ("tundish cover") e "in mold".

- 
- (1) Trabalho a ser apresentado no Seminário de Tecnologia em Fundição.
  - (2) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista e Mestre em Engenharia Metalúrgica. Gerente do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - Fundação Tupy S.A. Joinville - SC.
  - (3) Membro da ABM, Técnico Metalúrgico e Economista. Especialista Metalúrgico do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - Fundação Tupy S.A. - Joinville - SC.
  - (4) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista. Pesquisador do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - Fundação Tupy S.A. - Joinville - SC.
  - (5) Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista e Doutor em Engenharia. Diretor Técnico - Fundação Tupy S.A. - Joinville - SC.

## 1. INTRODUÇÃO

Na fabricação de ferros fundidos nodulares um dos aspectos mais importantes é o tratamento do metal líquido, razão pela qual os desenvolvimentos mais significativos no que se refere a essa liga tem ocorrido nessa área.

Dentre os vários elementos que possibilitam, através de adição aos ferros fundidos, a obtenção de grafita esferoidal no estado bruto de fusão, sem qualquer dúvida foi o magnésio o que apresentou maior desenvolvimento e interesse industrial. Dessa forma a grande maioria da produção de ferros fundidos nodulares se verifica através de utilização de magnésio como elemento nodulizante; a utilização de ligas a base de cério e outras terras-raras (1), cálcio (2) ítrio (3) e telúrio (4, 5) tem apresentado importância muito menor. Os teores residuais de magnésio necessários para a obtenção de grafita de forma exclusivamente esferoidal nos ferros fundidos nodulares devem se situar, em geral, entre 0,03 e 0,06% embora fatores como as características grafitizantes do banho, a composição química base e a velocidade de esfriamento possam alterar essa faixa (6). Para teores menores pode ocorrer formação de grafita degenerada na estrutura (nódulos do tipo II, grafita vermicular, em grumos, ou até, mesmo em veios) (7), enquanto para teores superiores a essa faixa pode haver formação de carbonetos eutéticos.

A adição de magnésio a banhos de ferro fundido tem sido efetuada através da utilização desse elemento puro ou na forma de ligas ou produtos, como será descrito neste trabalho, que tem por objetivo discutir o efeito das principais variáveis envolvidas no tratamento, descrever sucintamente os processos desenvolvidos e apresentar resultados experimentais obtidos em alguns desses processos.

## 2. RENDIMENTO DE ADIÇÃO DE MAGNÉSIO

Um dos parâmetros mais utilizados para avaliação de processos de nodulização e agentes nodulizantes é o rendimento de adição de magnésio. A abordagem geralmente feita é a de que o teor de magnésio adicionado ( $\%Mg_{adic}$ ) corresponde a soma dos teores de magnésio residual ( $\%Mg_{res}$ ), de magnésio consumido para dessulfuração ( $\%Mg_{dess}$ ), de magnésio perdido por vaporização ( $\%Mg_{vapor}$ ) e de magnésio consumido para desoxidação ( $\%Mg_{desox}$ ). O rendimento de adição seria então expresso pela relação  $100 ( \%Mg_{res} + \%Mg_{dess} + \%Mg_{desox} ) / Mg_{adic}$

Com o teor de magnésio consumido na desoxidação é geralmente pequeno e o teor de magnésio consumido para dessulfuração pode ser calculado estequiometricamente utilizando-se os pesos atômicos (PA) pela expressão:

$$\frac{PA_{Mg}}{PA_S} (\%S_{inicial} - \%S_{final}) = 0,76 (\%S_{inicial} - \%S_{final}), \text{ tem-se:}$$

$$PA_S$$

$$\eta_{Mg} = \frac{0,76 (\%S_{inicial} - \%S_{final}) + \%Mg_{res}}{\%Mg_{adic}} \times 100 \quad (8)$$

Nos casos em que o teor inicial de enxofre já é reduzido, a diferença entre as porcentagens inicial e final desse elemento é pequena e pode ser desprezada (8), sendo então o rendimento de adição de magnésio expresso em porcentagem pela relação entre os teores residual e adicionado.

### 3. EFEITO DE VARIÁVEIS DE PROCESSO NO TRATAMENTO DE NODULIZAÇÃO

As principais variáveis de processo no tratamento de nodulização de ferros fundidos referem-se à composição química base, ao agente nodulizante empregado (tipo, composição e granulometria), a temperatura de tratamento, a quantidade de metal a ser tratada e, evidentemente, ao próprio processo utilizado. Descrever-se-á, a seguir, cada um desses aspectos.

#### 3.1. Composição Química Base

A composição química base do ferro fundido tem grande importância, principalmente no que se refere aos teores de enxofre, oxigênio dissolvido e de elementos deletérios à morfologia da grafita esferoidal; os teores dos demais elementos tem menor influência, embora evidentemente afetem a solubilidade do magnésio na liga.

As influências do enxofre e do oxigênio devem-se aos efeitos do sulfurante e desoxidante do magnésio; dessa forma tendo-se teores elevados desses elementos, parte do magnésio utilizado no tratamento de nodulização será consumido através das reações com esses dois elementos.

Quando o metal base apresenta alto teor de enxofre, pode-se industrialmente efetuar dessulfuração antes do tratamento de nodulização ou então, pode-se realizar os dois processos de modo concomitante. No primeiro caso a dessulfuração pode ser realizada através do processo plug-poroso, de forma intermitente (9 - 11), realizando-se um posterior super-aquecimento, ou contínua (12, 13), ou, para maiores quantidades de ferro fundido, pode-se efetuar o tratamento em painéis vibratórias ou outros tipos de agitadores mecânicos (2). A outra alternativa é a de se empregar processos em que simultaneamente se realize a dessulfuração e a nodulização, como ocorre em tratamentos com magnésio puro, coque impregnado com magnésio, ligas, briquetes ou outras formas de misturas mecânicas, que contém teores mais elevados de magnésio. Um outro aspecto importante com referência ao enxofre é o de que se deve proceder a eficaz retirada da escória resultante do tratamento de nodulização das painéis em que o processo se verifica, uma vez que a presença dessa escória também causará elevação no consumo de magnésio nos tratamentos posteriores, podendo, inclusive, ocorrer reversão do enxofre da escória para o metal.

Os teores de oxigênio dissolvido nos ferros fundidos geralmente não são elevados (14-16), não tendo assim muita influência, no entanto, o oxigênio combinado, presente na escória na forma de óxidos e/ou silicatos, reagi-

rá com o magnésio, diminuindo assim o rendimento da adição do elemento nodulizante; essa é a razão pela qual deve-se evitar que o tratamento seja realizado com metal base oxidado ou apresentando escória.

A presença de pequenos teores de chumbo, bismuto, arsênio, antimônio e titânio, pode causar a degenerescência da grafita em ferros fundidos nodulares (17-21), podendo-se, no entanto, através de adições de cério e outras terras-raras, neutralizar esse efeito deletério.

### 3.2. Agentes Nodulizantes

No que se refere ao agente nodulizante já se mencionou que se pode utilizar magnésio puro, ou na forma de ligas ou produtos.

Como o magnésio apresenta elevada pressão de vapor na faixa de temperaturas em que é efetuada sua adição aos banhos de ferro fundido, normalmente se utilizam equipamentos especiais para a adição desse elemento puro. Os processos empregados utilizam injeção desse elemento granulado, ou na forma de arames ou fios de magnésio, câmaras ou painéis de pressão, conversores ( 8 ) , ou ainda, imersão por sino do elemento revestido por refratário (Processo Pont a Mousson) (22).

Pode-se também fabricar ferro fundido nodular através de tratamento com coque impregnado de magnésio, que contém cerca de 43 a 45% Mg e apresenta baixo peso específico, empregando painéis dotados de uma espécie de grelha (22-24), painéis rotativos (23, 25), ou ainda imersão por sino (8, 26, 27),

Há ainda citações de uso de briquetes e/ou misturas mecânicas de magnésio (24, 28, 29), contendo 5 a 15% Mg, adicionados geralmente através de imersão por sino ou utilização de painel rotativo.

Deve-se também citar que nos processos em que o tratamento é efetuado com magnésio puro, coque impregnado de magnésio, briquetes ou misturas mecânicas, geralmente se efetua a adição de cério e outras terras-raras, para se evitar a influência de elementos prejudiciais à morfologia da grafita que possam estar presentes nas matérias-primas.

Os principais compostos a base de magnésio utilizados para a fabricação de ferros fundidos nodulares são as ligas Fe-Si-Mg, as mais empregadas comercialmente, tendo-se ainda as ligas Ni-Mg ou Cu-Mg, que podem também conter Si.

Dentre as ligas Fe-Si-Mg, destacam-se as com 5 a 7% Mg e 8 a 10% Mg e, mais recentemente, tem surgido citações (8, 23, 30) relativas ao emprego de ligas com 2,5 a 3,5% Mg. Essas ligas são utilizadas nos processos de simples transferência "sandwich", "in mold", plug poroso, painel com tampa dotada de orifício afunilado ("tundish cover") e nos processos mais recentes-"Vortex", "TIP", "Flotret" e "I knock" - tendo-se ainda as ligas com 15 a 20% Mg, empregadas principalmente no processo de imersão por sino (23, 27, 31).

As ligas Fe-Si-Mg contém, geralmente, teores controlados de cério (e outras terras raras) (até 1,2%), cálcio (0,7 a 1,5%) e alumínio (1,2% máx).

Através de um estudo baseado na termodinâmica das soluções Mg-Si, examinando como parâmetros a pressão de vapor do magnésio e o coeficiente de atividade raoultiano, Robison (32) chegou a formulação de uma liga contendo 1 a 1,75% Mg, 1% Ca, 1% Al e 45 a 50% Si, que apresentou um rendimento médio de adição de magnésio superior a 90%, utilizando os processos "sandwich" e imersão por sino. Verificou ainda o autor citado (32) que a adição dessa liga de baixo teor de magnésio como inoculante possibilitava elevação do teor residual de magnésio e diminuía a cinética de vaporização do Mg a partir do ferro fundido tratado.

A influência do cério e de outras terras-raras é complexa e importante. Para teores de magnésio próximos aos limites inferiores com os quais se obtém grafita nodular nos ferros fundidos, teores residuais de cério e outras terras-raras contribuem para melhorar a forma da grafita (33, 34). Além disso, constatou-se que, para iguais teores de terras-raras (0,4 a 0,6%) a utilização de terras-raras com baixos teores de cério e altos teores de lantânio promove melhoria da morfologia da grafita em ligas com 5% Mg, possibilitando uma diminuição de 10% do consumo de liga nodulizante (33).

Resultados experimentais (33, 35-37) evidenciam também que a presença de teores residuais de cério entre 0,005 e 0,02% nos ferros fundidos nodulares tratados com ligas a base de Mg possibilitam elevação do número de nódulos. Ainda no que se refere a influência do teor de ério contido nas ligas Fe-Si-Mg com 4 a 6% Mg - Dong et al (37) constataram que teores crescentes de Ce entre 0,3 a 1,0% promoviam elevação do número de nódulos de grafita.

O cério e outras terras-raras, além de atuarem como nodulizantes e de apresentarem o efeito de neutralizar a influência prejudicial de elementos deletérios, atuam ainda contribuindo para a nucleação da grafita a partir do líquido (38) e para evitar a ocorrência de grafita em grumos em seções espessas (39).

O cálcio é, a exemplo do cério e do magnésio, um elemento nodulizante (2), além de possuir como o alumínio, um efeito grafitizante bastante acentuado (40, 41). Além disso, deve-se mencionar que teores crescentes de cálcio causam diminuição da reatividade de ligas Fe-Si-Mg (30); assim ligas contendo cerca de 0,5% Ca apresentam reação rápida, o que normalmente é o desejável no processo "in mold", enquanto para teores da ordem de 3% se constata que o tratamento passa a ser bastante lento, não havendo, no entanto, aparentemente, relação entre o teor de cálcio e o rendimento de adição de magnésio obtido (30).

As ligas Ni-Mg, Ni-Si-Mg, Cu-Mg, Cu-Si-Mg e Fe-Ni-Mg apresentam

5 a 15% Mg (8, 24, 28, 42), sendo utilizadas nos processos de simples transferência e "sandwich", empregando-se ainda o processo de imersão por sino, no caso de ligas com teores mais elevados de magnésio. O emprego dessas ligas geralmente se verifica em aplicações em que se necessita proceder a adição de níquel ou cobre (elementos de liga grafitizantes e perlitizantes) aos ferros fundidos nodulares.

### 3.3. Forma Física do Nodulizante

A forma física do agente nodulizante, por ter marcante influência na cinética de sua dissolução, precisa também ser considerada. Em determinados processos esse fator já está pré-fixado, como é o caso do processo Pont a Mousson, ou o de injeção de magnésio puro na forma de fios, ou ainda da utilização de briquetes contendo ferro e magnésio. Deve-se ainda citar que no caso dos processos "in mold" (43), "Vortex" e "Flotret" a granulometria da liga Fe-Si-Mg constitui uma variável com importância relativa ainda maior que em outros processos, como o de simples transferência, "sandwich" ou imersão por sino, por se verificar a reação e, conseqüentemente, a dissolução da liga, no interior do molde no primeiro caso, e numa câmara intermediária antes do vazamento nos outros dois processos.

A granulometria das ligas Fe-Si-Mg utilizadas nos processos de simples transferência, "sandwich", "tundish cover" e imersão por sino, depende basicamente da quantidade de metal a ser tratada, tendo-se, como regra geral, a indicação de uso de maiores partículas de liga para maiores quantidades de metal. Deve-se evitar, no entanto, a utilização de partículas muito grandes, pois estas flutuariam na superfície, diminuindo o rendimento de adição de magnésio; partículas muito finas, por outro lado, reagem muito rapidamente, aumentando assim as perdas de magnésio.

Uma recomendação prática seria o uso de partículas de 3 a 30mm (28, 44) ou de até 75 mm (45) para os processos acima referidos; todavia Barton (46) menciona que várias fundições empregam uma mistura de tamanhos de partícula, o que conferiria um empacotamento da liga mais denso que o obtido com o emprego de uma faixa granulométrica bem definida.

### 3.4. Temperatura de Tratamento

Outra variável de processo bastante importante é a temperatura de tratamento. Quanto maior a temperatura, maior é a pressão de vapor de magnésio e, conseqüentemente, mais intensa será a perda por volatilização. Dessa forma dever-se-ia efetuar o tratamento à menor temperatura possível, sendo o limite inferior estabelecido em função da própria seqüência de processamento, isto é, das temperaturas e dos procedimentos adotados para inoculação e vazamento e do tipo de peça em fabricação (geometria, peso e, principalmente, requisitos de qualidade).

A temperatura de tratamento depende também, de certo modo, do

processo de nodulização empregado. Assim, apenas como exemplo, no caso de utilização de conversor a magnésio puro operando com metal base de baixo teor de enxofre, a temperatura pode ser um pouco menor que a utilizada com processo "sandwich"; no processo de imersão por sino empregando magnésio puro (Pont a Mousson) a temperatura de tratamento é geralmente ainda menor, enquanto no processo "in mold", a temperatura coincide com a de vazamento.

### 3.5. Quantidade de Metal a ser Tratada

A quantidade de metal a tratar deve também ser considerada, uma vez que condicionará, em virtude das perdas de calor decorrentes, a temperatura de vazamento a ser utilizada. Como foi citado para a temperatura de tratamento, a quantidade de metal a tratar também depende do processo adotado. Dessa forma, para menores pesos de metal a tratar não é usual utilizarem-se equipamentos especiais como os referentes aos processos de nodulização empregando magnésio puro (conversor, "Pont a Mousson", panela ou câmara de pressão), sendo geralmente empregados processos como os de simples transferência e "sandwich", por exemplo, e de maneira semelhante, o processo "in mold" não é usado para produção de peças que demandem grande quantidade de metal.

Outro aspecto importante é o relativo à distância entre a superfície livre de metal e o agente nodulizante, que deve ser a maior possível, sendo evidentemente limitada por fatores operacionais.

Além dos pontos mencionados, constituem também outras limitações de utilização os aspectos relacionados à própria necessidade de transporte do ferro fundido, desde o forno de fusão até as linhas de vazamento.

## 4. PROCESSOS DE TRATAMENTO

### 4.1. Panela de pressão ou Câmara de pressão

Esses processos, apresentados esquematicamente na figura 1, baseiam-se na realização do tratamento com magnésio puro em recipiente selado e sob pressão ou então contido em uma câmara especial, também selada (47, 48) submetida a pressões da ordem de 30 atmosferas. Dessa forma consegue-se minimizar as perdas por volatilização do magnésio, obtendo-se rendimentos de adição entre 70 e 80%. As duas alternativas são operacionalmente complexas, requerendo altos investimentos (27) e necessitando muitos cuidados com a segurança, tendo-se acentuadas perdas de temperatura. Nesse processo costuma-se adicionar maiores teores de magnésio, efetuando-se posteriormente a diluição com quantidades 3 a 4 vezes maiores de metal não tratado (24).

### 4.2. Injeção

O processo de injeção, apresentado na figura 2, foi desenvolvido para se efetuar a dessulfuração e o tratamento de nodulização simultaneamente, podendo também ser empregado apenas para dessulfuração. O magnésio, na forma de partículas esféricas, é carregado por uma corrente de gás inerte (geral-

mente nitrogênio), por intermédio de uma espécie de lança de grafita dotada de orifício, mergulhada em uma panela contendo o ferro fundido a ser tratado (8).

O tratamento geralmente é realizado para cerca de 1 t de metal, tendo-se uma reação controlada e obtendo-se rendimentos de adição de cerca de 35 a 40% (27, 46).

Uma outra alternativa é a de se proceder a adição de magnésio na forma de fios, tiras ou arames (2).

Um recente desenvolvimento, baseado nesse princípio de dissolução de magnésio puro e conseqüente absorção de magnésio pelo banho metálico, é o relativo à utilização de tiras ou arames de magnésio encapsulados em aço, em pregados em processo de tratamento por injeção, podendo também ser usado para ferros fundidos com elevados teores de enxofre (49).

Esses processos apresentam como desvantagens principais os elevados custos de investimento e de manutenção, além de se necessitar o uso de magnésio condicionado de forma determinada (27).

#### 4.3. Conversor

O conversor apresentado na figura 3 desenvolvido pela Georg Fischer de Schaffhausen (Suíça) (50, 51) é um reator de forma cilíndrica que pode sofrer rotação de quase 180° em torno de um eixo horizontal, havendo ainda outros equipamentos, baseados no mesmo princípio, desenvolvidos e patenteados (52).

O conversor contém uma câmara de reação revestida de refratário, dotada de orifícios, situada, na extremidade oposta a bica de vazamento, mas aproximadamente no mesmo plano horizontal, de maneira que, ao se preencher o reator com ferro fundido não há possibilidade de contato com o magnésio puro, que se apresenta em pedaços no interior da câmara. Após toda a transferência de metal o conversor é fechado, efetuando-se então a rotação de 90° para se iniciar a reação de nodulização que dura cerca de 1 a 3 min, em função do teor de enxofre e da quantidade de metal a tratar, removendo-se a escória ao final do tratamento (8, 31).

O processo possibilita a obtenção de rendimentos de adição de magnésio de 50 a 60%, sendo também empregado para materiais base com altos teores de enxofre (8, 31), de até 0,2% (27).

As principais limitações do processo referem-se a necessidade de se efetuar o tratamento de maiores quantidades de metal (geralmente mais de 1 t) e de se realizar 3 a 4 reações por hora no mínimo, em virtude das perdas de temperatura que ocorrem para menores freqüências de utilização (27), embora a perda de temperatura no tratamento propriamente dito seja apenas de 30 a 40°C (50, 51).

A reação é violenta, o que evidencia a necessidade de atenções redobradas quanto a segurança (8) e, em virtude do grande volume de fumos gera

do, enquanto a reação se efetua é necessário um eficaz sistema de exaustão(46).

O referido processo, que seria o mais empregado dentre os que utilizam magnésio puro (46), está sendo usado em vários países, tendo-se na Alemanha e no Japão os maiores números de unidades em operação.

#### 4.4. Pont a Mousson

O processo Pont a Mousson (53) utiliza um equipamento convencional de imersão por sino. O agente nodulizante é o magnésio puro, na forma de lingotes revestidos com uma lama refratária, figura 4a, de dimensões e espessura bem determinadas (geralmente 2 a 3 mm), para assim controlar a reação que é processada em uma estação especial de imersão (53).

A reação ilustrada na figura 4b, verifica-se em 30 a 45 s e a perda de temperatura depende essencialmente da quantidade de metal a tratar, sendo de cerca de 30°C para 1 t e de apenas 10°C para 5 t (53). O processo seria assim mais indicado para maiores quantidades de metal, embora haja menção de utilização industrial de tratamento de 700 kg de ferro fundido, com bons resultados (53).

Embora seja o processo relativamente simples, sua utilização em outras fundições além das Pont a Mousson seria restrita (46).

#### 4.5. Panela rotativa e panela dotada de grelha

Esses dois equipamentos, ilustrados nas figuras 5 e 6, foram desenvolvidos com o objetivo básico de possibilitar o tratamento com um produto de baixo peso específico, como é o caso do coque impregnado de magnésio (43 a 45% Mg), que também pode ser adicionado através de imersão por sino.

A panela de tratamento pode ser dotada de uma grelha de refratário, podendo-se retirar seu fundo, onde é colocado o agente nodulizante (figura 5). O fechamento da panela, após a colocação do nodulizante é geralmente efetuado através de uma espécie de vedação de areia de moldagem, obtendo-se rendimentos de adição semelhantes aos referentes à imersão por sino, apresentando o processo, no entanto, algumas dificuldades operacionais (27). Para se evitar o uso de panelas constituídas de duas partes, mas que operassem também com uma grelha no fundo, foram feitas adaptações desse equipamento colocando-se um orifício no fundo da panela através do qual se podia efetuar a colocação do agente nodulizante, orifício esse que seria fechado com refratário antes do vazamento (27).

A panela rotativa (figura 6) é um reator de forma cilíndrica, geralmente com 500 kg a 3 t de capacidade (54), que se movimenta em torno do seu eixo. É dotada de uma câmara de reação separada do corpo cilíndrico, constituída por refratários vazados, onde é colocado o coque impregnado de magnésio. Após o preenchimento da panela com ferro fundido gira-se o reator de cerca de 120°, colocando o metal líquido em contato com o nodulizante, até que a câmara fique situada na posição vertical.

Para tratamento de cerca de 550 kg de ferro fundido, a uma temperatura de 1500°C, obteve-se um rendimento de adição de magnésio de 45 a 50%, com diminuições de temperatura de cerca de 60 a 90°C (25). Uma vantagem adicional, decorrente do uso de coque impregnado de magnésio, seria a de se poder utilizar ferros fundidos com elevados teores de enxofre (23), tendo alguns autores (54) obtido bons resultados empregando uma composição base com até 0,15% S.

#### 4.6. Plug poroso

O processo plug poroso, indicado na figura 7, é bastante utilizado, como já se mencionou, para se proceder à dessulfuração de ferros fundidos (9-11), podendo também ser usado para se processar a reação de nodulização.

A panela utilizada para o tratamento é dotada, na parte inferior, de um plug poroso de refratário, ajustado a uma peça de grafita na forma de cone oco que, é encaixada em uma outra peça de grafita solidária ao revestimento da panela. Através do plug poroso efetua-se a injeção de nitrogênio para proceder à agitação do banho, sendo o agente dessulfurante utilizado o  $\text{CaC}_2$ .

Quando o processo é empregado para fabricação de nodular, após o término da dessulfuração desliga-se a insuflação do nitrogênio, efetua-se a retirada da escória formada, torna-se a injetar nitrogênio e procede-se, na superfície do banho, a adição de liga Fe-Si-Mg contendo 5 a 7% Mg (ou 8 a 10% Mg). Podem-se obter com o processo rendimentos de adição de magnésio de 40 a 50% (31), embora haja necessidade de rígido controle para não se prosseguir a insuflação de nitrogênio após o término da reação, o que aumenta bastante as perdas de magnésio pelo banho (8).

De modo geral, a utilização do processo plug poroso para fabricação de ferro fundido nodular apresenta como principal limitação as diminuições de temperatura que ocorrem durante os dois tratamentos (22), sendo recomendável por isso sua utilização em panelas de mais de 500 kg de capacidade (31).

#### 4.7. Simple Transferência

O processo de simples transferência, o primeiro a ser empregado e o mais comum, sendo ainda um dos mais utilizados em todo o mundo (31, 46, 55), utiliza uma panela comum, figura 8, com relação altura:diâmetro de 2:1 e de até 3:1 (31). A liga nodulizante, geralmente Fe-Si-Mg com 5 a 7% Mg ou 8 a 10% Mg, ou ainda uma liga com alto peso específico - Ni-Mg ou Cu-Mg, por exemplo (27, 46)-é colocada no fundo, de um dos lados da panela, efetuando-se o vazamento de metal do lado oposto.

Os rendimentos de adição de magnésio obtidos não são muito elevados, situando-se entre 20 e 25% (8), mas a simplicidade e a segurança de operação, aliados à boa reprodutibilidade de resultados quanto a teor residual de magnésio é que tem contribuído para a confiabilidade e aceitação desse processo.

#### 4.8. Processo Sandwich

O desenvolvimento do processo de simples transferência resultou no processo sandwich, o processo mais usado industrialmente em todo mundo, apresentado na figura 9, em que se mantém a configuração da panela de tratamento, com relação altura:diâmetro de 2:1 a 3:1.

O processo também é de operação bastante simples, tendo-se como principal diferença a existência de um degrau no fundo da panela onde é colocada a liga nodulizante (Fe-Si-Mg - 5 a 7% Mg ou 8 a 10% Mg, em geral), sendo esta coberta com cavacos de ferro fundido ou com pequenas chapas de aço, correspondendo a cerca de 1 a 2% do peso total de metal a ser tratado (8, 27, 31, 46).

A cobertura tem a finalidade de retardar a reação de nodulização, minimizando, assim, as perdas de magnésio, notadamente por oxidação e vaporização, uma vez que a reação só se inicia após ter-se transferido um certo volume de metal (ou até mesmo, e preferivelmente, todo o volume) para a panela. Um outro fator que contribuiria para a obtenção de rendimentos de adição mais elevados seria o fato de que, junto à cobertura, a temperatura do ferro fundido seria mais baixa, em virtude de um efeito localizado de esfriamento (31). Os rendimentos de adição de magnésio obtidos podem ser de até 40 a 50% (8, 27, 31, 46).

Ainda no que se refere ao processo sandwich foram desenvolvidas algumas outras alternativas como materiais de cobertura, tais como o Fe-Si (45 ou 75% Si) (8) e o  $CaC_2$  (2) e areia (27), sendo a liga nodulizante somente colocada em contato com o ferro líquido após total preenchimento da panela, o que contribui para elevar o rendimento de adição de magnésio.

Recentemente mencionou-se (29) a utilização do processo "sandwich" empregando briquetes de magnésio e ferro, obtendo-se rendimentos de adição de 60 a 70% com o uso de 5% de cobertura.

#### 4.9. Panela com tampa dotada de orifício afunilado ("tundish cover")

O princípio de desenvolvimento do processo que utiliza panela com tampa dotada de orifício afunilado ("tundish cover") baseia-se em se limitar o volume de ar colocado em contato com o banho metálico no interior da panela, como mostra a figura 10 que apresenta alguns das alternativas disponíveis (56). Resulta desse procedimento uma menor evolução de fumos de óxido de magnésio e uma redução do efeito pirofórico da reação, diminuindo assim os problemas de poluição ambiental e possibilitando a obtenção de rendimentos de adição de magnésio mais elevados com ligas Fe-Si-Mg (56-59) que os referentes aos processos de simples transferência e sandwich.

Há menções de utilização de panelas deste tipo em 14 países com desde 80 kg até 8,5 t de capacidade, havendo alternativas quanto à utilização de tampas removíveis, verificando-se o tratamento junto ao forno (sistema convencional) ou em estações próprias (sistema "indireto"), ou ainda com tampas fi

xas (sistema "UPQ" - nome de uma fundição na Finlândia - ou "tea pot") (56).

No que se refere ao rendimento de adição, há muitos resultados disponíveis, registrando-se, em uma média de 25 resultados, aumentos de 43 para 59% com a substituição de simples transferência pela panela com tampa dotada de orifício afunilado para liga Fe-Si-Mg (10% Mg) (58, 59) e reduções no consumo de liga nodulizante variando de 6 a 60%, estando os valores mais frequentes situados entre 20 e 30% (56).

Em 1979 haviam 4 fundições utilizando o processo e em 1982 já há mais de 100 usuários, evidenciando assim que o uso de panelas com tampa dotadas de orifício afunilado ("tundish cover") tem assumido rapidamente uma posição de destaque (56).

As principais desvantagens do processo relacionar-se-iam às maiores dificuldades operacionais em todos os sistemas citados e ao maior tempo de transferência e reação necessário no sistema convencional (57).

#### 4.10. Imersão por sino

O processo de imersão por sino é o mais utilizado para se proceder a adição de ligas de baixo peso específico (8, 27, 31), tais como as ligas Fe-Si-Mg contendo 15% Mg ou mais ou, até mesmo, coque impregnado de magnésio (31), sendo realizado em equipamentos como o apresentado na figura 11.

O sino, geralmente de aço, revestido com refratário e dotado de vários orifícios, é submerso por um dispositivo mecânico no banho metálico, sendo usualmente mantido em uma posição pré-fixada em relação a superfície livre do metal, ocorrendo então a reação de nodulização.

O projeto do sino é importante em virtude da dissolução da liga nodulizante e da absorção de magnésio pelo banho, que dependem essencialmente da posição relativa ocupada pelo sino no interior da panela, do número e das dimensões dos orifícios através dos quais se processará a reação e do peso total de metal a ser tratado, que deve ser superior a 1t para evitar diminuição muito acentuada da temperatura (27).

Para a utilização do processo, usualmente utiliza-se uma estação em que se efetua a reação, em virtude da necessidade de se empregar um sistema de extração de fumos (27).

Este processo possibilita a obtenção de rendimentos de adição de magnésio geralmente superiores a 50% (8, 31), podendo-se utilizar ferros fundidos com altos teores de enxofre (27), sendo, depois dos processos sandwich e simples transferência, um dos mais usados.

Além do já mencionado problema de diminuição de temperatura, o processo de imersão por sino apresenta como desvantagens, maiores investimentos e maior custo de mão-de-obra de operação (55), possuindo ainda pouca flexibilidade para tratamento de diferentes quantidades de ferro fundido, em virtude dos aspectos referentes a dissolução da liga (8, 27) já mencionados.

#### 4.11. Processo de nodulização no molde

O processo de nodulização no molde ("in mold"), que tem apresentado crescente nível de aplicação (46), baseia-se no princípio de se minimizar as perdas de magnésio procedendo-se a adição do agente nodulizante, geralmente liga Fe-Si-Mg 5%, granulada (60-65), ou na forma de placas (66), no próprio molde, em uma câmara situada junto ao sistema de canais, como mostra a figura 12. Uma outra possibilidade quanto ao agente nodulizante é a utilização de misturas mecânicas de magnésio puro e Fe-Si (50% Si) (65).

As principais vantagens do processo referem-se ao elevado rendimento de magnésio, que pode ser superior a 80%, não ser necessário efetuar a adição de compostos grafitizantes, a maior segurança de operação, e a eliminação quase completa de fumos (31, 63, 64, 65). Entre os problemas decorrentes da utilização do processo "in mold" menciona-se a necessidade de utilização de ligas em condições muito controladas quanto a composição, granulometria e estado da superfície, de se utilizar ferros fundidos com baixos teores de enxofre (geralmente menores que 0,010%), de se controlar individualmente as peças fabricadas e de se obter um rendimento metalúrgico menor que em outros processos (31, 65).

No processo "in mold" as condições da liga nodulizante são muito mais críticas que em outros processos, porque toda a cinética de dissolução do magnésio estará condicionada a esse fator, além evidentemente, do dimensionamento da câmara de reação e do sistema de canais. Para teores de enxofre no metal base mais elevados o principal problema observado é a ocorrência de "drosses", que muito dificilmente podem ser retidas no sistema de canais, enquanto os outros dois fatores citados (controle de qualidade e rendimento metalúrgico) contribuem para aumentar os custos de fabricação.

Apesar da aparente complexidade quanto aos aspectos citados, a opinião de especialistas (67-69), é a de que a participação relativa do processo no que se refere à fabricação de peças em ferro fundido nodular deverá progredir de forma crescente.

#### 4.12. Outros processos

Há ainda outros processos desenvolvidos mais recentemente que apresentam potencial de utilização industrial, como é o caso do "Vortex", do "TIP" do "Flotret" e do "I - knock".

O processo "Vortex", desenvolvido pelo TNO da Holanda (70), recebeu esta denominação porque a mistura entre o dessulfurante ou nodulizante e o banho se verifica em um vórtice, como ilustrado na figura 13, em virtude da vazão de ferro fundido se verificar tangencialmente a um dispositivo na forma de funil em que o reagente é adicionado. O processo é contínuo, podendo ser utilizado para tratamentos de 50 a 1000 kg de ferro fundido com até 0,06% S, empregando ligas Fe-Si-Mg contendo 8 a 20% Mg, com rendimento de adição a 1450°C

de 50% e perda de temperatura inferior a 550C (70).

Outro processo recente é o "TIP" (71) ("tratamento, inoculação e vazamento"), apresentado na figura 14, em que se utiliza um reator cilíndrico dotado de uma espécie de câmara de reação (nº 1) em que é colocada liga Fe-Si-Mg (5-10 Mg) (nº 2).

A panela pode girar em torno dos eixos horizontal (h) e vertical (v), dando-se o seu preenchimento na posição horizontal. Após o término da transferência de peso determinado de metal, a panela é fechada e gira para a posição vertical; terminada a reação a panela retorna à posição horizontal, removendo-se a escória pela abertura (nº 3). A panela é então transportada para a estação de vazamento, que é realizado com rotação pelo sistema nº 4, segundo o eixo horizontal, ocorrendo o vazamento pelo sifão (nº 5).

O processo "Flotret" (72) figura 15, baseia-se no princípio de se efetuar o tratamento com liga Fe-Si-Mg em uma câmara que opera de forma contínua, através do fluxo de metal líquido, diminuindo-se assim a luminosidade e a emissão de fumos no processo de nodulização. O ponto principal de desenvolvimento do processo parece ter sido o estabelecimento da relação entre as áreas de entrada e saída da câmara, que controlam o fluxo e, conseqüentemente, a cinética de dissolução (72). Após esse estudo foram construídas câmaras com capacidade de tratamento de 1 t/h, em que se pode utilizar ferros fundidos contendo até 0,020 a 0,025% S, tendo-se cerca de 800C de perda de temperatura entre a transferência para a câmara e o vazamento nos moldes, e rendimentos de adição de magnésio de 55 a 70% (72).

O processo "T - knock" (55) utiliza um recipiente em que se verifica a reação com a liga Fe-Si-Mg que é adicionada através de um tubo refratário, de certo modo semelhante a descrita para o processo "Vortex". A adição de liga é interrompida quando cerca de 50 a 75% do volume de ferro fundido já tiver sido transferido, obtendo-se rendimentos de adição de magnésio a 14800C próximos a 75% (55).

## 5. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS

Foram efetuadas experiências de fabricação de ferro fundido nodular utilizando magnésio puro, coque impregnado de magnésio, briquetes contendo magnésio e uma massa refrataria, e ligas Fe-Si-Mg (5 a 7% Mg e 8 a 10% Mg). Os processos de nodulização empregados foram os de conversor, usando um equipamento desenvolvido na própria Fundação Tupy S.A. (73), panela rotativa, "sandwich", panela com tampa dotada de orifício afunilado ("tundish cover"), e "in mold". Descrevem-se, a seguir, os procedimentos adotados e os resultados obtidos.

### 5.1. Processo de nodulização com conversor empregando magnésio puro

Nas experiências foi utilizado metal base proveniente de forno a

indução, com teor de enxofre entre 0,019 e 0,030%.

O carbono equivalente, manteve-se entre 4,25-4,40%, tendo sido efetuada inoculação com 0,6% de Fe-Si-75 e 0,01% de mischmetal na panela de vazamento.

A temperatura de tratamento situou-se em torno de 1520°C e a de vazamento variou de 1360 a 1410°C.

A adição de magnésio efetuada foi de 0,12% em relação à quantidade de metal tratado, que foi de 500 kg, em um conversor desenvolvido na Fundação Tupy S.A. (73).

Na tabela I, são apresentados alguns resultados de experiências realizadas com a utilização do conversor (experiências C-1).

**TABELA I:** Resultados das experiências referentes ao uso de conversor (C) a magnésio puro.

EXPERIÊNCIA	% S inic.	% S final	% Mg adic.	% Mg resi.	Mg (%)	N % <sup>2</sup>
C-1	0,030	0,022	0,12	0,046	43	100
C-2	0,030	0,014	0,12	0,033	38	100
C-3	0,019	0,014	0,12	0,050	45	100
C-4	0,026	0,015	0,12	0,035	36	100

$$1) \quad \% \text{ Mg} = \frac{0,76 (\% S_{\text{inicial}} - S_{\text{final}}) + \% \text{ Mg}_{\text{res}}}{\% \text{ Mg}_{\text{adic}}} \times 100$$

2) Porcentagem de grafita nodular na estrutura.

Constata-se assim que o processo possibilitou rendimentos de adição de magnésio situados entre 35 e 45%, para temperaturas de tratamento de 1520°C, o que deve ter contribuído para aumentar as perdas de magnésio.

### 5.2. Processo de nodulização com panela rotativa

Utilizou-se metal base com teor de enxofre entre 0,016 e 0,018% numa primeira série e de 0,070% numa segunda série.

O carbono equivalente manteve-se entre 4,20 e 4,40%, tendo sido efetuada uma inoculação com 0,6% de FeSi 75 e 0,01% de mischmetal na panela de vazamento.

A temperatura de tratamento situou-se entre 1500 e 1530°C e a de vazamento entre 1360 e 1420°C sendo a quantidade de metal tratado de 500 kg.

O magnésio foi introduzido através de coque impregnado com magnésio (43% Mg) (experiências PR-1-CM) tendo a quantidade empregada variado de 0,35 a 0,70%.

Ainda nessa mesma série de experiências com a panela rotativa, empregaram-se briquetes de forma cilíndrica (experiências PR-1-B), constituídos de uma mistura de cavacos de Mg, uma massa refratária e um ligante, contendo cerca de 35% Mg, sendo empregadas quantidades desse agente nodulizante de 0,40 e 0,70%. A tabela II apresenta os resultados das experiências realizadas.

**TABELA II:** Resultados das experiências obtidas com o uso de panela rotativa (PR) de nodulização utilizando coque impregnado de magnésio (CM) e briquetes de magnésio (B).

EXPERIÊNCIA	% S inicial	% S Final	% Mg adic.	% Mg res.	Mg (%)	N (%)
PR-1-CM	0,016	0,013	0,15	0,043	31	100
PR-2-CM	0,018	0,014	0,15	0,043	31	100
PR-3-CM	0,070	0,015	0,26	0,040	32	100
PR-4-CM	0,070	0,013	0,26	0,044	36	100
PR-5-CM	0,100	0,013	0,29	0,030	33	100
PR-6-CM	0,11	0,015	0,29	0,045	39	100
PR-7-B	0,018	0,011	0,14	0,042	34	100
PR-8-B	0,060	0,012	0,24	0,023	24	90

Com a utilização de coque impregnado de magnésio foram obtidos rendimentos de adição de 30 a 40%, portanto um pouco inferiores aos relatados na literatura (25), o que provavelmente se deve às mais altas temperaturas de tratamento utilizadas. Deve-se ainda citar a obtenção de 100% de grafita nodular na estrutura mesmo para materiais base com cerca de 0,100% S. No caso de utilização de briquetes compostos de cavacos de magnésio e uma massa refratária, contendo ligante, os rendimentos obtidos foram menores.

### 5.3. Processo "Sandwich"

Foram utilizadas composições com carbono equivalente entre 4,25 a 4,40% empregando-se panelas de tratamento com uma relação entre a altura de metal e o diâmetro interno de 2:1, com 600 kg de capacidade, sendo efetuadas inoculações com 0,6% de Fe-Si-75 em panelas de vazamento de 200 kg de capacidade.

As temperaturas de tratamento variaram de 1510 a 1530°C e as de vazamento de 1390 a 1415°C.

O material de cobertura utilizado foi o cavaco de ferro fundido num teor de 1,0% em relação a quantidade de metal tratado. Foram empregados dois tipos de liga nodulizante Fe-Si-Mg, a primeira contendo de 5 a 7% Mg (experiências S-i-5/7 Mg) e a outra com 8 a 10% Mg (experiência S-i-8/10 Mg). Em ambos os casos a porcentagem de liga nodulizante empregada foi de 1,9% sobre a quantidade de metal tratado.

Os teores inicial e final de enxofre, o residual de magnésio e os rendimentos de magnésio estão apresentados na tabela III.

Os resultados apresentados na tabela III evidenciam, assim, que os rendimentos de adição de magnésio obtidos com as duas ligas nodulizantes experimentadas (Fe-Si-Mg 5-7% Mg e Fe-Si-Mg 8-10% Mg) foram semelhantes, situando-se em torno de 30%, estando ainda de acordo com os resultados obtidos em produção normal.

**TABELA III:** Resultados das experiências referentes ao processo "sandwich" (S) de nodulização

EXPERIÊNCIA	% S inic.	% S final	% Mg adic.	% Mg resid.	Mg(%)	N(%)
S-1-(5/7 Mg)	0,020	0,015	0,123	0,038	33,0	100
S-2-(5/7 Mg)	0,020	0,016	0,123	0,034	29,0	100
S-3-(5/7 Mg)	0,020	0,015	0,123	0,033	29,0	100
S-4-(5/7 Mg)	0,020	0,016	0,123	0,034	29,0	100
S-5-(8/10Mg)	0,018	0,016	0,152	0,039	27,0	100
S-6-(8/10Mg)	0,017	0,015	0,152	0,044	30,0	100
S-7-(8/10Mg)	0,017	0,014	0,152	0,044	30,0	100
S-8-(8-10Mg)	0,016	0,013	0,152	0,043	30,0	100
S-9-(8-10Mg)	0,017	0,015	0,153	0,042	29,0	100

**5.4. Processo de nodulização empregando panela com tampa dotada de orifício afunilado ("tundish cover")**

O metal base empregado nessas experiências foi obtido em forno a indução, sendo que o carbono equivalente manteve-se entre 4,22 e 4,47% , tendo sido efetuada uma inoculação com 0,6% de Fe-Si-75. A temperatura de tratamento situou-se entre 1520-1530°C e a de vazamento entre 1410 e 1420°C.

Empregou-se o Fe-Si-Mg (5-7% Mg) como nodulizante sendo efetuadas adições de 1,4 (experiências TP-1(1,4L)) e 1,5% (experiências TP-1(1,5L)), sendo utilizadas coberturas com cavacos de ferro fundido de 1,0 e 1,5% em peso.

A quantidade de metal tratado foi de 800 kg, tendo sido utilizada a panela tipo "tea pot", conforme o esquema da figura 10c.

Na tabela IV estão apresentados os resultados das experiências efetuadas.

**TABELA IV:** Resultados das experiências referentes a panela de nodulização com tampa dotada de orifício afunilado, tipo "Tea Pot" (TP)

EXPERIÊNCIA	%S inicial	%S final	%Mg adic.	%Mg resid.	Mg (%)	N (%)
TP-1(1,4 L)	0,020	0,017	0,070	0,032	49	100
TP-2(1,4 L)	0,020	0,017	0,070	0,035	53	100
TP-3(1,4 L)	0,015	0,015	0,070	0,037	53	100
TP-4(1,5 L)	0,020	0,015	0,075	0,032	48	100
TP-5(1,5 L)	0,020	0,014	0,075	0,030	46	100
TP-6(1,5 L)	0,015	0,014	0,075	0,040	54	100

Os rendimentos de adição de magnésio obtidos com a utilização de panela com tampa dotada de orifício afunilado, do tipo "tea pot", foram bastante elevados, situando-se em torno de 50%. Dessa forma, esse processo se constitui em alternativa interessante havendo no entanto que se examinar ainda os aspectos referentes a determinação em uso corrente dos problemas referentes a tempo médio de operação necessário, retirada de escória custos de manutenção, pontos estes também muito importantes para utilização industrial.

**5.5. Processo de nodulização no molde ("in mold")**

Foram utilizadas composições base para fabricação de ferro fundido nodular, submetidas a um tratamento prévio de dessulfuração com a finali-

dade de se obter teores de enxofre em torno de 0,01%, tendo-se mantido o carbono equivalente entre 4,25-4,40%.

O sistema de canais, bem como a câmara de reação foram dimensionados de acordo com as recomendações de Holden e Dunks (65), tendo-se mantido a velocidade de vazamento entre 1,4 e 1,6 kg/s.

A liga nodulizante empregada foi o Fe-Si-Mg (5% Mg), nas porcentagens de 0,8% (experiências IM-i-0,8%) e 0,9% (experiências IM-j-0,9%), com uma faixa granulométrica entre 1,75 a 3,15 mm, sendo a temperatura de vazamento mantida em torno de 1400°C. O tempo de vazamento variou de 13 a 13,5 segundos para um peso de conjunto (canais + câmara + corpo-de-prova) de 20 kg, sendo as amostras para análise química retiradas desse corpo-de-prova.

Na tabela V estão apresentados os teores de enxofre inicial e final, o teor de magnésio residual bem como o rendimento da adição de magnésio.

TABELA V: Resultados das experiências referentes ao processo In-mold (IM) de nodulização

EXPERIÊNCIA	%S inicial	%S final	%Mg adic..	%Mg resid.	(Mg %)	N (%)
IM-1-0,8%	0,012	0,008	0,040	0,030	82	95
IM-2-0,8%	0,012	0,008	0,040	0,030	82	95
IM-3-0,9%	0,012	0,008	0,045	0,031	75	95
IM-4-0,9%	0,012	0,008	0,045	0,032	78	95

Os resultados da tabela V evidenciam rendimentos de adição de magnésio bastante elevados, de acordo com os dados apresentados na literatura (63-66), sendo este um dos aspectos que tem, sem dúvida, contribuído para o crescente interesse que o processo "in mold" tem apresentado.

#### 5.6. Síntese dos resultados experimentais obtidos

Dentre os processos avaliados neste trabalho (conversor a magnésio puro, nodulização com panela rotativa, "sandwich", panela com tampa dotada de orifício afunilado e "in mold"), obtiveram-se rendimentos de adição de magnésio mais elevados com o processo "in mold" (75 a 82%) e com panela tipo "tea pot" (46 a 53%).

Os resultados referentes a utilização de conversor a magnésio puro e panela rotativa com coque impregnado de magnésio foram ligeiramente inferiores aos apresentados na literatura, devendo ter contribuído para isso a utilização de temperaturas de tratamento mais elevadas.

Com o processo "sandwich" obtiveram-se rendimentos de adição semelhantes, da ordem de 30%, com as ligas Fe-Si-Mg 5-7% e Fe-Si-Mg 8-10%.

#### 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos de nodulização constituem uma das etapas mais importantes na fabricação de peças de qualidade de ferro fundido nodular.

O magnésio é o elemento nodulizante mais empregado industrial-

mente, na forma metálica, de compostos, ou ainda ligas, sendo esta última a de maior utilização. No que se refere às ligas, constata-se a tendência de utilização de menores teores de magnésio, por apresentarem maiores rendimentos de adição, efetuando-se também desenvolvimentos visando utilizar melhor os importantes efeitos de cério, outras terras-raras, e cálcio.

Os processos de nodulização mais empregados são, ainda, o desimples transferência e o "sandwich". Observa-se a tendência de utilização crescente de processos em que são melhores as condições de proteção ao meio ambiente associadas ao aumento do rendimento de adição de magnésio, tais como o uso de panela dotada de tampa com orifício afunilado ("tundish cover") e "in mold". O processo "in mold", em particular, tem apresentado participação relativa crescente quanto à produção de ferro fundido nodular, devendo persistir essa tendência.

A utilização de processos em que se emprega magnésio puro deverá prosseguir, em virtude das vantagens econômicas decorrentes da substituição de ligas, o que fornece um interesse potencial importante para esses desenvolvimentos.

Dessa forma, a escolha do processo de tratamento e do agente nodulizante é bastante complexa, uma vez que está condicionada aos aspectos econômicos de investimento, custos de manutenção, de mão-de-obra, depreciação, custo do próprio agente nodulizante, condições operacionais existentes, envolvendo desde arranjo físico até parâmetros metalúrgicos (composição química base, temperatura de tratamento, quantidade de metal a ser tratado) e condições ambientais.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) MICKELSON, R.L. & MERRILL, T.W. AFS Transactions, 76:289-96, 1968
- 2) MOLD, E.K. The British Foundryman, 63(6):193-9, jun. 1970
- 3) KANTER, J.J. et alii. Foundry M & I, 90(1):52-6, jan. 1962.
- 4) DAWSON, J.V. AFS Cast Metals Research Journal, 7(4):165-70, 1971
- 5) NIESWAAG, H. & ZUIHOFF, A.J. AFS Cast Metals Research Journal, 7(4):165-70, dec. 1971
- 6) SOUZA SANTOS, A.B. de et alii. Meturgia ABM, 30(201):568-71, ago. 1974
- 7) SOUZA SANTOS, A.B. de et alii. Fundição e Materias-Primas, 1(7):25-30, maio 1979
- 8) AFS Ductile iron molten Metal Processing. Des Plaines, 1974, 26 p.
- 9) SPIRE, E. AFS Transactions, 59:201, 1951
- 10) COATS, R.B. & LEYSHON, A.J. BCIRA Confidential Report nº 745, 1964
- 11) SUGIYAMA, N. et alii. Meturgia ABM, 29(192):727-33, nov. 1973
- 12) MCGLOTHLIN, G. AFS Transactions, 85:5-8, 1977
- 13) BISSIG, J.C. Foundry M & I, 105(5):92-5, maio 1977.
- 14) BOYLES, A. The structure of cast iron. Metals Park, ASM, 1947
- 15) HENSCHEL, C. & HEINE, R.W. AFS Cast Metals Journal, 8(3):116-21, sept. 1971
- 16) HOMMA, M. & HUKUOKA, K. AFS Cast Metals Journal, 8(3):116-21, sept. 1972.
- 17) MORROGH, H. AFS Transactions, 60:439-52, 1952
- 18) LOWRIE Jr., H.W. AFS Transactions, 64:115-6, 1956
- 19) SCHELLENG, R.D. & PAUL, D. AFS Transactions, 74:700-8, 1966
- 20) SAWYER, J.C. & WALLACE, J.F. AFS Transactions, 76:386-404, 1968
- 21) TYBULCZUK, J. et alii. Fonderie (355):123-38, avr. 1976
- 22) SOUZA SANTOS, A.B. de & CASTELLO BRANCO, C.H. Meturgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares. São Paulo, IPI, 1977, 241 p.
- 23) KARSAY, S.I. Ductile iron the state of the art 1960. s.l. QIT-Fer et Titane
- 24) McCLUHAN, T.K. Nodulizing material In: QUALITY DUCTILE IRON PRODUCTION TODAY & TOMORROW CONFERENCE. Rosemont, 14-16 oct. 1975, p. 105-25

- 25) BARTON, R. BCIRA Confidential Report nº 1350, 1979
- 26) MAGNESIUM treatment of molten iron. IN: QUALITY DUCTILE IRON PRODUCTION TODAY AND TOMORROW CONFERENCE. Rosemont, 14-16, oct. 1975, p. 260-6
- 27) BARTON, R. BCIRA Confidential Report nº 1188, 1975
- 28) BORGEAUD, P. Hommes et Fonderie (80):25-30, dec. 1977
- 29) SIMMONS, W. The British Foundryman 73(11):xxii-xxv, nov. 1980
- 30) DIXON, H.T. & HINCHLEY, D. The British Foundryman, 73(8):xi-xiv, aug. 1980
- 31) NODULIZING methods. IN: QUALITY DUCTILE IRON PRODUCTION TODAY AND TOMORROW CONFERENCE Rosemont, 14-16 oct. 1975 p. 126-42
- 32) ROBINSON, M. AFS Transactions, 84:585-92, 1976
- 33) LALICH, M.J. AFS Transactions, 82:441-8, 1974
- 34) CHURCH, N.L. & MERICA, P.D. AFS Transactions, 81:301-13, 1973
- 35) AMIN, A.S. & LOPER Jr., C.R. AFS Transactions, 86:505-12, 1978
- 36) HORSFALL, M.A. BCIRA Confidential Report nº 1305, 1978
- 37) DONG, J.M. et alii. AFS Transactions, 86:163-8, 1978
- 38) NARD, R.L. & WALLACE, J.F. AFS Cast Metals Research Journal, 6(3):131, sep. 1970
- 39) BASUTKAR, P.K. & LOPER Jr., C.R. AFS Transactions, 79:247-52, 1971
- 40) McCCLURE, N.C. et alii. AFS Transactions, 66:340-51, 1957
- 41) LUX, B. Modern Casting, 45(5):222-32, May 1964.
- 42) BCIRA Broadsheet nº 200
- 43) DAVIS, K.G. et alii. AFS Transactions, 86:379-84, 1978
- 44) MILLER & COMPANY. The ductile iron process. Chicago, 1976, 418 p. 11.
- 45) KARSAY, S.I. Ductile iron production practices. Des Plaines, AFS, 1975. 188 p. 11.
- 46) BARTON, R. Magnesium treatment processes. IN: BCIRA. Foundry Technology for the 80's. Birmingham, 1979. p. 4-1 - 4-13.
- 47) HEINRICH, W. AFS Transactions, 70:1121-24, 1962
- 48) TANAKA, K. AFS Transactions, 70:265-79, 1962
- 49) HIEBER, A.F. & WATMOUGH, T. Modern Casting, 71(2):48-9, feb. 1981
- 50) ALT, A. et alii. AFS Transactions, 80:167-72, 1972
- 51) ALT, A. et alii. Foundry M & I, 100 (7):55-7, jul. 1972.
- 52) ALEMANHA, P. 28.48.890. Schmelzenbehandlungsanlage mit einem kippbarer Behältergefäß. 1978
- 53) MASSE, D. & HEINE, H.J. Foundry M & I, 102(9):86-88, 91 sep. 1974
- 54) BRYANT, M.D. Foundry Trade Journal, 145(3143):381-90, aug. 1978
- 55) SPHEROIDIZING IN: KARSAY, S.I. Ductile iron production practices. Des Plaines, AFS, 1975 p. 54-71
- 56) FORREST, R.D. The British Foundryman, 75(4):41-51, apr. 1982
- 57) BARTON, R. BCIRA Confidential nº 1309, 1978
- 58) FORREST, R.D. & WOLFENBERGER, H. AFS Transactions, 83:421-6, 1980
- 59) FORREST, R. D. & WOLFENBERGER, H. Foundry Trade Journal, 150(3208):411-2, 421-2, 424, 427, mar. 12, 1981.
- 60) McCAULAY, J.L. Foundry Trade Journal, 130(2836):327-32, 335, abr. 12, 1971
- 61) MOORE, H. Modern Casting, 63(3):37, mar. 1973
- 62) REMONDINO, M. E. S. AFS Transactions, 82:239-52, 1974
- 63) PILASTRO, F. et alii. Tratamento in moldel hierro nodular In: CONGRESSO LATINO AME RICANO DE FUNDIÇÃO, 19. Rio de Janeiro, ILAFA/ABM/ABIFA/IBS, nov. 1976.
- 64) THOMAS, R.W. AFS Transactions, 88:501-2, 1980
- 65) HOLDEN, W.W. & DUNKS, C.M. The British Foundryman, 73(9):265-74, sep. 1980
- 66) MEDANA, R. et alii. AFS Transactions, 87:349-58, 1979
- 67) LOPER Jr., C. Comunicação verbal. Joinville, 1981.
- 68) BARTON, R. Comunicação verbal, abr. 1982
- 69) WALLACE, J.F. Comunicação verbal, maio 1982.
- 70) BAKKERUS, H. & HOLST, B.J. Modern Casting, 71(3):41-4, mar. 1981
- 71) MOOR, D.W. Foundry Trade Journal, 151(3217):90, 93-94, 97, jul. 16, 1981
- 72) DUNKS, C.M. & RACE, B. The British Foundryman, 74(5):xv-xix, may, 1981.
- 73) BRASIL. PI 7602124. Processo e equipamento para adição, com incorporação de materiais vaporizáveis em metais fundidos ou ligas metálicas fundidas. Fundação Iupy S.A., INPI, 1976.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Técns. João Acácio de Araujo e Humberto Dominoni, que participaram do desenvolvimento experimental realizado, e a Sra. Lizete Maria Schwalbe pela datilografia do texto.

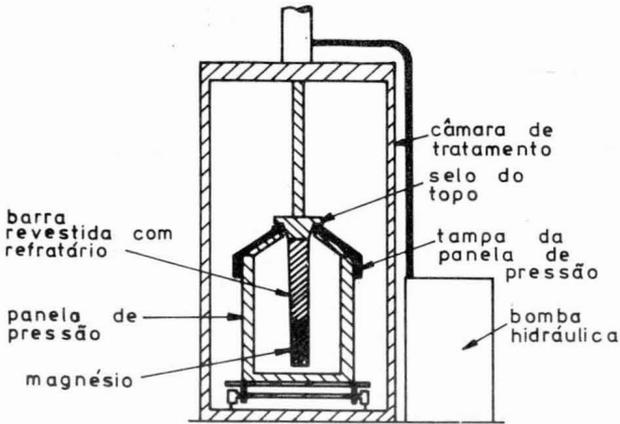


FIG. 1: Panela de pressão (8)

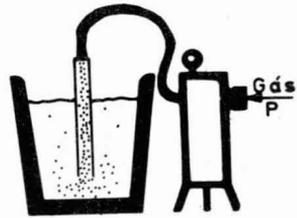


FIG. 2: Processo de injeção (22)

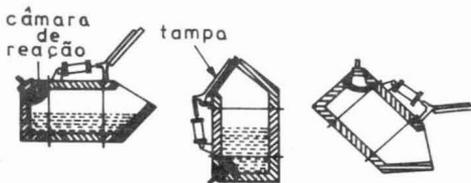


FIG. 3: Conversor Georg Fischer (51)



(a)



(b)

FIG. 4: Processo "Pont a Mousson", sendo a) sino de imersão e b) panela de tratamento, mostrando o sino imerso e o processamento da reação (53).

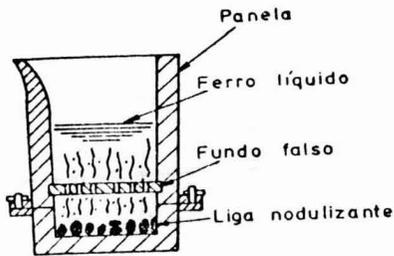


FIG. 5: Panela dotada com grelha (8)

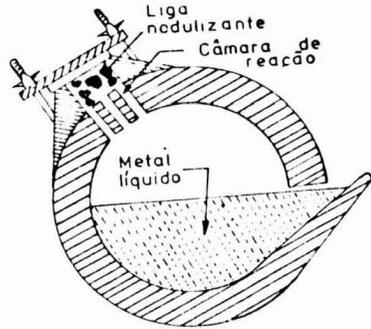


FIG. 6: Panela rotativa (26)

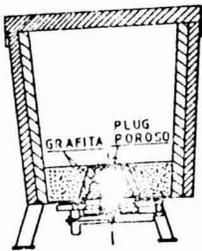


FIG. 7: Processo plug poroso (22)

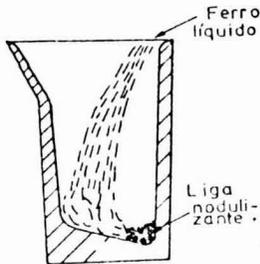


FIG. 8: Processo de simples transferência (31)

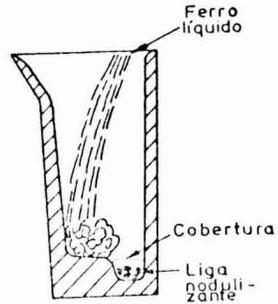
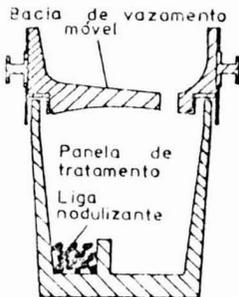
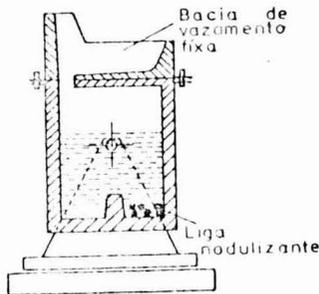


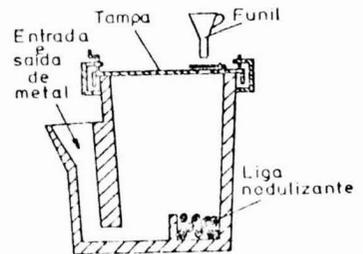
FIG. 9: Processo "sandwich" (31)



a) Panela convencional



b) Panela com tampa fixa



c) Panela com bico de chá (tea pot)

FIG. 10: Principais alternativas do processo que utiliza panela com tampa dotada de orifício afunilado ("tundish cover") (55)

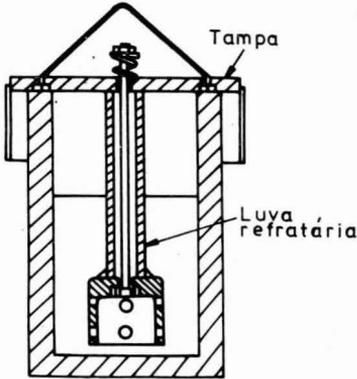


FIG. 11: Processo por imersão por sino (27)

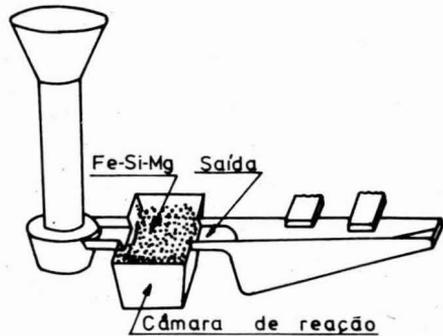


FIG. 12: Processo "In mold" (23)

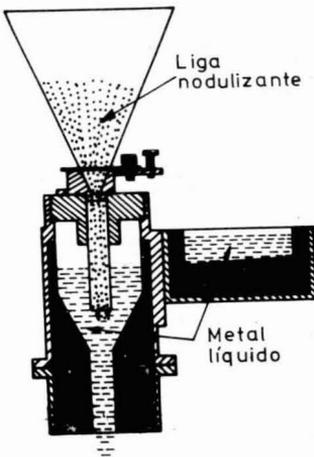
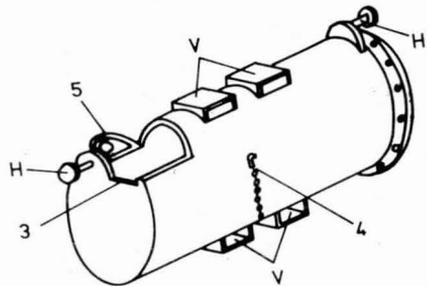
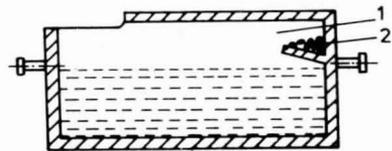


FIG. 13: Processo "Vortex" (49)

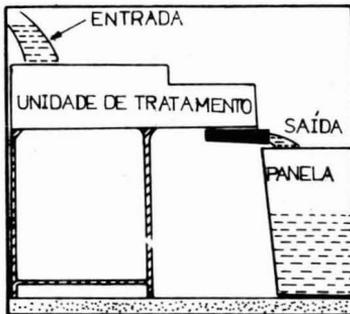


(a)

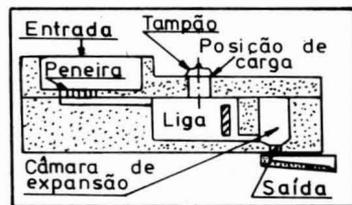


(b)

FIG. 14: Processo "TIP" a) vista lateral e b) vista em corte (71)



(a)



(b)

FIG. 15: Processo "flotret", vista lateral (a) e vista em corte (b) (72)

