

LIGAS UTILIZADAS NA NODULIZAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS (1)

Jorge Finardi (2)

### R E S U M O

Os elementos que podem ser utilizados para a nodulização de ferros fundidos são o magnésio, o cálcio e os metais de terras raras. Por razões econômicas e de reprodutibilidade o magnésio tem sido o preferido.

O magnésio pode ser utilizado na forma elementar, na forma de ligas NiMg, de ligas CuMg e de ligas FeSiMg.

A forma elementar é a adição mais econômica, no entanto requer equipamento sofisticado e escala mínima de produção.

Na forma de liga NiMg, a adição pode ser feita diretamente na panela aberta e o rendimento do magnésio é elevado. A liga CuMg é uma forma alternativa mais econômica.

As ligas FeSiMg constituem a forma mais difundida de adição de magnésio. Estas ligas possuem inúmeras variações, permitindo a utilização pela maior parte dos processos e com ferros base de diferentes teores de enxofre.

---

(1) - Contribuição técnica apresentada no Seminário Sobre Tecnologia em Fundição, ABM/COFUN, São Paulo, Setembro de 1982.

(2) - Engenheiro metalurgista e doutor. Diretor Técnico Comercial da Bozel Mineração e Ferroligas, Professor Ass. Dr. da Escola Politécnica da USP e Professor Titular da Esc. Eng. Univ. Mackenzie.

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento de nodulização tem a finalidade de modificar a composição e as condições físicas do ferro líquido de maneira que, após a inoculação, a grafita precipite na forma nodular. Esta definição implica que o tratamento de nodulização deve ser seguido por uma inoculação. Existem práticas onde o ferro fundido tratado é vazado sem inoculação, porém constituem basicamente exceções.

## 2. ELEMENTOS NODULIZANTES

Desde o desenvolvimento inicial do ferro fundido nodular até hoje, toda produção tem sido baseada na utilização do magnésio como nodulizante principal. Seu uso tem sido baseado em razões econômicas e pela consistência dos resultados obtidos. Entretanto, o magnésio tem alta tensão de vapor sendo a temperatura de vaporização de 11070°C e também baixa solubilidade no ferro. Como resultado a introdução do magnésio no ferro líquido pode produzir violenta reação e baixo rendimento. Na produção do ferro fundido nodular o teor de magnésio residual deve variar normalmente na faixa de 0,02 a 0,06%, e de preferência, entre 0,03 a 0,05%.

A quantidade de magnésio a ser adicionado é baseada no rendimento, o qual é função de diversos fatores: tipo de liga adicionada, temperatura de tratamento, profundidade de metal na panela de tratamento, método de tratamento e teor de enxofre e de oxigênio no ferro a ser tratado.

A manutenção do ferro tratado durante um tempo excessivo é também um fator a ser considerado pois, a 1480°C, pode ocorrer uma perda de magnésio a uma taxa de 0,001% por minuto (7).

Quando o ferro líquido é tratado pelo magnésio, ocorrem as seguintes mudanças básicas de composição:

- redução do teor de enxofre para nível menor do que 0,02%,
- redução no teor de oxigênio de um valor típico entre 100 e 140 ppm para aproximadamente 30 ppm,
- o teor de magnésio passa a ser de 0,02% no mínimo, e de uma maneira geral, entre 0,03 e 0,06%.

Os teores de enxofre, oxigênio e magnésio encontrados na análise de ferros fundidos tratados, não refletem obrigatoriamente seus teores reais na forma elementar. Na realidade, em virtude da forte afinidade entre eles, grande parte destes elementos poderão estar na forma de óxido de magnésio ou de sulfeto de magnésio.

Além do magnésio, outros elementos podem acompanhar o processo de nodulização. Entre eles é importante citar inicialmente os metais de terras raras. Os metais de terras raras representam uma combinação de elementos cuja composição varia de acordo

com a origem mineral e o processo de extração e de refino. A tabela I apresenta algumas composições típicas de metais de terras raras. A forma mais comum é a de mish-metal.

O efeito dos metais de terras raras em ferros fundidos nodulares é mais complexo do que o do magnésio. Em primeiro lugar, o seu efeito é dessulfurante e desoxidante, como no caso do magnésio. No entanto, além desse efeito, ele age também como nodulizante, neutraliza os elementos deletérios e tem um efeito importante no processo de nucleação.

Os metais de terras raras podem ser utilizados isoladamente como nodulizantes, como foi inicialmente demonstrado pelas pesquisas pioneiras de Morrogh (1). No entanto, por razões econômicas é preferível utilizar metais de terras raras em combinação com o magnésio. Neste sentido é possível diminuir a quantidade de magnésio e obter uma estrutura nodular mais definida.

O mish-metal e as outras formas de metais de terras raras constituem uma mistura de 15 elementos. No caso particular do mish-metal, a composição apresenta 50%Ce, sendo o restante os outros elementos de terras raras. Em alguns países do mundo, em virtude da demanda por determinados elementos contidos nas terras raras, passaram a ser disponíveis materiais contendo maior teor de cério, como indica a tabela I.

Existe muita discrepância na literatura sobre o efeito particular de cada elemento contido nos metais de terras raras. A opinião mais comum é a de que o cério é o elemento mais efetivo no processo de nodulização da grafita (2), embora outros autores tenham chegado à conclusão que outros elementos dos metais de terras raras possam ser equivalentes ao cério ou mesmo mais efetivos (8,9). Em virtude do cério acima de um certo valor promover a formação de carbonetos, existe um teor ótimo para esse elemento. Pesquisas recentes (3) mostram que o teor ótimo de Ce está compreendido na faixa de 0,01 a 0,02%.

Além do magnésio e do cério, um outro elemento que pode atuar como nodulizante é o cálcio (4). Este elemento, embora não seja utilizado isoladamente, é regularmente adicionado para melhorar a ação nodulizante em conjunto com a liga contendo magnésio e a liga inoculante.

O teor ótimo de magnésio residual está na faixa de 0,03 a 0,05%. Teor mais reduzido pode não fornecer nodulização adequada e teor mais elevado produz tendência à formação de carbonetos livres. A determinação da quantidade de magnésio a ser adicionado a um ferro para a obtenção de nodulização efetiva, deve ser feita pela adição ao teor de magnésio residual, do teor de magnésio necessário para dessulfuração, para a desoxidação e para compensar as perdas por volatilização. Na realidade, a quantidade de magnésio necessária para desoxidação pode ser negligenciada e o cálculo pode ser assim resumido:

$$M_{ad} = M_{deS} + M_{res} + M_{vol}$$

onde:

- $Mg_{ad}$  = quantidade de magnésio adicionado, %  
 $Mg_{deS}$  = quantidade de magnésio usada para dessulfuração, %  
 $Mg_{res}$  = quantidade de magnésio residual necessária para nodulização, %  
 $Mg_{vol}$  = quantidade de magnésio perdido por volatilização, %.

Em virtude do magnésio realmente utilizado compreender a soma do teor de magnésio residual com a quantidade necessária para dessulfuração, o rendimento do magnésio pode ser assim calculado:

$$\eta = \frac{Mg_{deS} + Mg_{res}}{Mg_{ad}} \times 100 = \frac{Mg_{ad} - Mg_{vol}}{Mg_{ad}} \times 100 \quad (2)$$

A quantidade de magnésio a ser adicionada, partindo-se dos respectivos pesos atômicos, pode então assim ser expressa:

$$Mg_{ad} = \frac{0,76 (S_{in} - S_{fin}) + Mg_{res}}{\eta} \times 100$$

onde:

- $S_{in}$  = teor em enxofre no ferro base, %  
 $S_{fin}$  = teor em enxofre no ferro tratado, %  
 $\eta$  = rendimento do magnésio

Uma vez que o teor de magnésio residual ótimo ( $M_{res}$ ) deve ser compreendido entre 0,03 a 0,05%, a quantidade de magnésio adicionada será função do teor de enxofre no ferro base e do rendimento do magnésio. É possível diminuir a quantidade de magnésio a ser adicionado quando o ferro base tiver baixo teor em enxofre e quando o processo de nodulização e a liga de tratamento garantirem rendimento elevado. Em virtude do magnésio, quer na forma elementar ou na forma de ferroligas constituir uma parte substancial do custo do metal líquido, é importante minimizar a quantidade de magnésio a ser adicionado, o que é conseguido por:

- seleção do material da carga e do processo de elaboração para obter um ferro base com baixo teor em enxofre,
- seleção de um processo de nodulização que forneça rendimento elevado do magnésio,
- seleção de um material nodulizante que forneça rendimento elevado do magnésio.

### 3. MATERIAIS NODULIZANTES

A produção de ferro nodular é baseada no tratamento do ferro por magnésio. Esse elemento pode ser adicionado por diferentes processos, na forma de magnésio elementar e de ligas de

magnésio. Entre as ligas de magnésio temos as baseadas em níquel, as baseadas em cobre e as baseadas em ferro-silício. Os materiais nodulizantes podem ainda ser constituídos de misturas de ligas e compostos.

### 3.1 Nodulização com magnésio elementar

O magnésio elementar tem sido utilizado em muitas formas e usualmente cada forma requer uma técnica de adição específica. Essas técnicas são especialmente designadas com o intuito de minimizar a violência da adição do magnésio, uma vez que o magnésio elementar não pode ser utilizado em panela aberta por simples transferência ou pelo processo sandwich.

O magnésio elementar pode ser utilizado nas seguintes formas: 1) lingote de magnésio, 2) pó de magnésio e magnésio granulado, 3) vergalhão de magnésio, 4) magnésio recoberto por refratário, 5) magnésio briquetado com cavaco ou pó de ferro e 6) coque impregnado por magnésio.

O magnésio na forma de lingotes tem sido utilizado em painéis pressurizados e basculantes, o conversor Fisher constituindo a maneira mais aceita (5).

Embora o magnésio na forma pulverizada ou granulada possa ser utilizado por injeção no meio líquido, essa técnica não encontrou aceitação em virtude de partículas finas de magnésio serem extremamente pirofóricas. A injeção de materiais reativos na forma pulverizada é uma técnica que tem sido amplamente difundida em aciarias. No entanto, em virtude de ser aplicável com vantagem quando a quantidade de metal a ser tratada for superior a 25t, a utilização da técnica de injeção em fundições tem encontrado pouca aceitação.

Para o magnésio ser utilizado na forma de vergalhões, deverá ser introduzido no banho líquido numa velocidade tal que a reação ocorra a uma certa profundidade do metal líquido contido na panela. No entanto, a velocidade de introdução do vergalhão não deve ser tão alta que venha a se chocar contra o fundo da panela.

Uma variação interessante da utilização do magnésio na forma elementar é o processo Pont-A-Mousson. Consiste na cobertura do lingote de magnésio com diversas camadas de material refratário e deixando uma extremidade livre. O lingote assim coberto é imerso no ferro líquido por intermédio de um sino especial.

O magnésio elementar pode também ser briquetado juntamente com cavaco ou pó de ferro. Consegue-se dessa maneira um material de maior densidade e onde a velocidade de evolução do magnésio não é tão violenta. Os produtos disponíveis no mercado contêm de 15 a 35%Mg e podem conter ainda 1% de mish-metal.

Recentemente foi introduzida uma nova forma de briquete, contendo 5 a 10% Mg em pó, 2 a 5% SiCa, pó de ferro e grafita como aglomerante. O SiCa é adicionado com a finalidade de controlar a velocidade de evolução do magnésio. Em virtude da elevada densidade e do baixo teor em magnésio, essas briquetes podem ser utilizadas diretamente no sistema de painéis abertas por simples transferência ou técnica sandwich.

Outra forma de diluição é a impregnação de coque com 43 a 45% Mg. Em virtude de sua baixa densidade ( $0,7 \text{ g/cm}^3$ ), o coque impregnado por magnésio deve ser introduzido através de sino especial ou através de panela basculante contendo uma grelha.

A adição de magnésio na forma elementar goza de três grandes vantagens: 1) utilização da forma de magnésio mais barata, 2) não introdução de um elemento portador e 3) possibilidade de tratar ferro com teor de enxofre até 0,2%. A principal desvantagem é a necessidade de equipamento especial, que limita a quantidade mínima a ser tratada e representa um alto dispêndio em capital.

### 3.2 Nodulização com ligas níquel-magnésio

O desenvolvimento inicial do ferro fundido nodular foi feito em escala industrial com a utilização de ligas a base de níquel. Entre os elementos utilizados para introduzir o magnésio, o níquel é o que se combina mais facilmente com este elemento. Além disso, as ligas Ni-Mg são as mais densas, as mais fáceis de serem utilizadas e as que apresentam maior rendimento, conforme mostra a figura 1. A tabela II apresenta as ligas Ni-Mg mais comuns.

A liga NiMg15 foi a liga básica utilizada no desenvolvimento inicial do processo de tratamento em panela aberta. O níquel na liga tem a finalidade de transportar o magnésio, promove a grafitização e estabiliza a perlita. Esse produto pode ser utilizado na mais variada gama de processos, sendo que o rendimento do magnésio pode atingir até 70%.

A variante NiMg15R, contendo terras raras, produz nódulos mais bem definidos e neutraliza os elementos deletérios sem necessidade de adição do cério em separado. A liga NiMg16BC foi desenvolvida para a desoxidação de aços inoxidáveis, não sendo basicamente utilizada em ferros fundidos nodulares.

As ligas NiSiMg15, NiSiMg15R e NiFeMg15R são simplesmente alternativas mais econômicas das ligas NiMg15 e NiMg15R. O silício ou o ferro adicionado nessas ligas tem a finalidade básica de abaixar o seu custo, embora o rendimento do magnésio seja mais reduzido.

As ligas NiMg4 e NiFeMg4 são as que contêm menor teor de magnésio nesse grupo. Em contrapartida são as ligas que apresentam maior densidade e maior rendimento do magnésio. Em virtude

de serem mais densas que o ferro líquido, permitem a adição direta em panelas cheias, simplesmente jogando os pedaços de liga sobre o ferro líquido.

As ligas restantes, contendo 18 a 52%Mg, não devem ser usadas em panelas abertas, a sua utilização sendo restrita ao emprego de sinos e panelas especiais.

Resumindo, as ligas de alta densidade contendo níquel, e com teor de magnésio até 16%, apresentam as seguintes vantagens: 1) o tratamento por simples transferência é satisfatório para qualquer peso de metal, 2) não há necessidade de investimento em capital, 3) elevado rendimento do magnésio, 4) não provoca aumento do teor de silício independente da quantidade adicionada e 5) pequena perda de temperatura durante o tratamento.

Em contrapartida apresentam as seguintes desvantagens: 1) custo extremamente elevado da liga, 2) não promove efeito inoculante, 3) elevação do teor em níquel na liga, o que é uma séria desvantagem quando for desejada a estrutura ferrítica.

### 3.3 Nodulização com ligas cobre-magnésio

As ligas do tipo Cu-Mg foram desenvolvidas como substitutos mais econômicos das ligas Ni-Mg. A tabela III apresenta a composição básica dessas ligas. Além de serem mais baratas, tem ponto de fusão extremamente baixo.

As vantagens e desvantagens dessas ligas são similares a das ligas Ni-Mg. No entanto, as ligas Cu-Mg não apresentam rendimento de magnésio tão elevado como as ligas Ni-Mg.

### 3.4 Nodulização com ligas ferro-silício-magnésio

As ligas do grupo ferro-silício-magnésio são os materiais nodulizantes mais comumente empregados. Além de terem menor preço, permitem a obtenção de maior quantidade de ferrita e tendem a diminuir a tendência à formação de carbonetos livres no ferro.

A tabela IV apresenta as ligas do grupo padronizadas segundo as normas brasileiras. No exterior é bem maior a quantidade de ligas do grupo. A tabela V apresenta as composições usuais encontradas no mercado norte-americano. O exame destas tabelas mostra que as ligas apresentam essencialmente as seguintes variações: teor em magnésio, teor em cério, teor em terras raras, teor em cálcio e teor em alumínio.

A primeira dessas variáveis é o teor em magnésio. A medida que aumenta o teor em magnésio diminui o rendimento desse elemento na liga. A preferência é portanto pela utilização de ligas com menor teor em magnésio. No entanto, a possibilidade de utilização de ligas com menor teor em magnésio é ditada pelo teor de enxofre no metal base e incremento do teor em silício. A fim de possibilitar a utilização de ligas com baixo teor em magnésio,

é feito um tratamento prêvio de dessulfuração no ferro. As ligas contendo cerca de 3%Mg apresentam rendimento extremamente elevado, porém obrigam à utilização de ferro base com baixo enxofre. A dessulfuração prêvia do gusa é uma prática que está ganhando terreno nos EUA (10). Quanto maior o teor de enxofre no ferro base, tanto maior deverá ser o teor de Mg no material de tratamento. As ligas com teor de magnésio mais elevado, acima de 13%, obrigam à introdução por métodos especiais, como panela pressurizada e sino de tratamento.

A segunda variável que existe é o teor em cêrio. Foi mostrado que o teor ótimo de cêrio no ferro tratado varia entre 0,01 e 0,02% (3). Dentro dessa faixa, os nódulos apresentam melhor definição e maior contagem, e a estrutura não tende a apresentar tendência à formação de carbonetos. Considerando uma adição de FeSiMg de 2%, a liga nodulizante deve conter de 0,5 a 1,0%Ce para a obtenção da composição final mencionada. Os outros elementos presentes nos metais de terras raras tem efeito similar ao cêrio, porém não na mesma intensidade, isto é, o cêrio pode ser substituído parcialmente por maior quantidade de outros elementos de terras raras.

A terceira variável é o teor em cálcio. A ausência desse elemento na liga nodulizante ou na liga inoculante tende a produzir a estrutura nodular mal definida. Todas as ligas nodulizantes utilizadas no mercado norte-americano contêm 0,7 a 1,5%Ca. A liga FeSiMg3AC, com menor teor em cálcio, é utilizada em tratamento complementar.

No Japão foram desenvolvidas ligas com maior teor em cálcio, podendo atingir até 28% deste elemento, conforme mostra a tabela VI. O cálcio, em teores mais elevados, além de contribuir para a obtenção de estrutura nodular, reduz a velocidade de evolução do magnésio, produzindo reação mais suave.

Na tabela VI constam também algumas ligas com alto teor em magnésio, superior a 12%. São adequadas para o tratamento de ferro base com teor em enxofre elevado, porém requerem a utilização de equipamento apropriado, como panela pressurizada ou sino.

As ligas com alto teor em magnésio são disponíveis também na forma de peças fundidas na extremidade de uma haste especial. O conjunto, na forma de um pirulito pode ser diretamente introduzido em uma panela cheia de metal.

As ligas FeSiMg contêm também um certo teor em alumínio. Este elemento age como nucleante da grafita, diminuindo a tendência à formação de carbonetos livres. Por outro lado, um excessivo teor em alumínio provoca a tendência à formação de "pin-holes" em peças vazadas em moldes de areia a verde.

Uma aplicação particular de ligas FeSiMg constitui o processo "In-Mold". Nesse caso, para obtenção de resultados satisfatórios, a liga deve ter composição e granulometria bem definida, como mostra a tabela VII.



A tabela VIII mostra a composição de ligas disponíveis do tipo FeSiMg que também contém cobre. A finalidade principal do cobre é a de promover perlitização. Além disso, aumenta a densidade da liga melhorando o rendimento do magnésio. Essas ligas são encontradas nos EUA e Japão.

As ligas mais difundidas do grupo contêm magnésio até 10%. As vantagens dessas ligas são as seguintes: 1) o tratamento de nodulização a ser aplicado é simples, não requerendo investimento em capital, com exceção de panelas com maior profundidade; 2) bom rendimento pela utilização do processo sandwich; 3) o tratamento de nodulização também tem algum efeito inoculante; 4) pequena perda de temperatura do metal durante o tratamento, embora possa ser apreciável pela técnica sandwich; 5) não são necessárias precauções especiais durante o tratamento; 6) não há limitações quanto ao peso do ferro a ser tratado.

Em compensação essas ligas apresentam as seguintes desvantagens: 1) o aumento do teor de silício acompanhado do tratamento restringe a aplicação da liga para ferros bases com no máximo 0,05%S; 2) mais sujeita à variação de rendimento do magnésio do que as ligas Ni-Mg; 3) maior evolução de fumaça do que as ligas Ni-Mg.

### 3.5 Nodulização com mistura de ferroligas

Nesse grupo estão os materiais compostos de uma mistura de FeSiMg, SiCa e terras raras na forma de sais ou siliceto de mish-metal. A sua composição é mostrada na tabela IX.

Uma outra categoria constitui as ligas utilizadas como adição suplementar de terras raras, com o intuito de complementar o tratamento feito com magnésio elementar e ligas que não contêm cério.

Recentemente foi utilizada uma mistura de ferro-silício 50% e magnésio atomizado na produção de peças pelo processo "In-Mold" (11). A proporção julgada conveniente é de 15 partes de FeSi para 1 parte de Mg, e os resultados são considerados compatíveis com os obtidos com ligas FeSiMg porém a um menor custo.

## 4. FORMA FÍSICA DOS MATERIAIS DE NODULIZAÇÃO

O magnésio elementar é disponível nas seguintes formas físicas: lingotes, arames e grânulos.

As briquetes e o coque-impregnado por magnésio tem tamanho típico geralmente menor do que 50mm.

As ligas do tipo Ni-Mg, Cu-Mg e Fe-Si-Mg são frágeis e permitem a moagem para a obtenção de praticamente qualquer granulometria. Por razões de velocidade de dissolução, a granulometria

máxima utilizada na prática está ao redor de 40 a 50 mm. As ligas com granulometria muito reduzida, menor do que 1 a 2 mm, não são geralmente utilizadas em virtude do baixo rendimento do magnésio.

## 5. SELEÇÃO DE NODULIZANTES

Com a variedade de ligas descrita, a seleção adequada de uma liga nodulizante não é simples. Depende principalmente da composição do ferro base em comparação com a composição final desejada, da quantidade de ferro a ser tratada e do equipamento de tratamento disponível.

De maneira geral pode ser dito que o magnésio elementar é a forma de adição mais barata. No entanto a sua utilização está limitada à quantidade de ferro a ser tratado e à instalação de equipamentos especializados. As ligas com maior teor em magnésio requerem também equipamentos especializados.

A preferência é por ligas com baixo teor em magnésio, que não necessitam equipamento especializado e apresentam bom rendimento. No entanto a utilização dessas ligas só é possível para ferro base com baixo teor em enxofre.

A tabela X apresenta a recomendação de liga a ser aplicada em função do teor em enxofre do ferro base e do equipamento disponível e também as propriedades indicativas dos materiais nodulizantes.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MORROGH, H. - "Production of nodular graphite structures in gray cast iron". AFS Transactions, 56, 1948, p.72.
2. MC CLUHAN, T.K. - "Nodulizing materials". Proc. of Joint AFS-DIS Conf., out. 1975.
3. AMIN, A.S. e LOPER JR, C.R. - "Cerium and rare earths in ductile cast irons". AFS Transactions, 86, 1978, p.505.
4. AFS. "Ductile iron molten metal processing". Publicação da AFS, 1974.
5. ALT, A.; GUT, K.; LUSTENBERGER, H. e TRAPP, H.G. - "New method of treatment with pure Mg to produce nodular irons". AFS Transactions, 80, 1972.
6. BRADASCHIA, C. - "produção experimental de ferro fundido nodular". Boletim Ass. Bras. Metais, 16, nº 58, jan. 1960, p. 123 a 138.
7. KARSAY, S.I. - "Spheroidizing". Ductile Iron Production Practices, publ. AFS, 1979, p. 54 a 71.

8. LALICH, J.J. - "Effective use of rare earths in magnesium treated ductile cast irons". AFS Transactions, 82, 1974, p.441 a 448.
9. KANTER, J.J. et al. - "Yttrium nodular iron". Foundry, 90, jan. 1962, p. 52.
10. AFS - "Survey of ductile iron practice". AFS Transactions, 87, 1979, p. 7 a 10.
11. SHEA, M.M. e HOLTAN, S.T. - "In-the mold treatment using elemental magnesium to produce ductile iron". AFS Transactions, 86, 1978, p. 13 a 22.
12. BARTON, R. - "Magnesium treatment processes". Foundry Technology for the 80's, Univers. of Warwic, Birmingham, abr. 1979, p. 4.1 - 4.13.

Tabela I - Análises típicas de metais de terras raras

	Mish metal	Concentrado de cério	Didímio
% Cério	45 a 55	90	-
% Lantânio	22 a 30	5	-
% Neodímio	10 a 18	2	75
% Praseodímio	atê 5%	1	25
% Outros elementos das terras raras	atê 2%	2	max.1
% Fe	0,5 a 3%	-	-

Tabela II - Composição de ligas nodulizantes do tipo NiMg

Liga	%Mg	%Ni	%Si	%MTR	%Fe	%C
NiMg15	13/16	82	-	-	-	2,0
NiMg15R	13/16	82	-	0,7/0,85	-	2,0
NiMg16BC	15/17	80	2 max.	-	0,2max.	0,1max.
NiSiMg15	13/16	51	26/33	-	5 max.	-
NiSiMg15R	13/16	50	26/33	0,7/0,85	5 max.	-
NiFeMg15R	13/16	67/70	-	0,8/1,2	rest.	-
NiMg4	4,2/4,8	93	-	-	-	2,0max.
NiFeMg4	4,0/4,5	57	-	-	32/36	2,5max.
FeNiMg4	4,0/4,5	32/36	-	-	rest.	2,5max.
NiSiMg10-20	18/23	8/12	40/50	-	22/28	-
NiSiMg30-20	18/23	28/32	30/40	-	12/18	-
NiSiMg40-20	18/23	38/42	25/35	-	6/13	-
NiMg50-50	48/52	48/52	-	-	-	-
NiMg80-20	18/23	77/83	-	-	-	-

Tabela III - Composição de ligas nodulizantes do tipo CuMg

Liga	%Mg	%Cu	%Si	%Ca
CuMg50-50	48/52	48/52	-	-
CuMg80-20	18/23	77/83	-	-
CuMg85-15	13/17	82/88	-	-

Tabela IV - Especificações de ligas FeSiMg segundo a norma brasileira ABNT EB 945/78

Classe	Tipo	%Mg	%Si	%MTR	%Ca	%Mn max.	%Al max.
FeSiMg 5/7	A	5/7	43/48	-	-	1,2	1,0
	B	5/7	43/48	-	0,8/1,5	1,2	1,0
	C	5/7	43/48	0,8/1,2	0,8/1,5	1,2	1,0
	D	5/7	43/48	0,8/1,2	-	1,2	1,0
FeSiMg 8/10	A	8/10	43/48	-	-	1,2	1,0
	B	8/10	43/48	-	0,8/1,5	1,2	1,0
	C	8/10	43/48	0,8/1,2	0,8/1,5	1,2	1,0
	D	8/10	43/48	0,8/1,2	-	1,2	1,0
FeSiMg CaTR	-	8/13	43/48	3,5/4,5	3,5/4,5	1,2	1,0

Tabela V - Composições de ligas norte-americanas do tipo FeSiMg

Liga	%Mg	%Si	%Ce	%MTR	%Ca	%Al
FeSiMg3	2,8/3,3	44/48	-	-	0,8/1,3	1,2 max
FeSiMg3R	2,8/3,3	44/48	0,35/0,5	0,7/1,0	0,8/1,3	1,2 max.
FeSiMg3HC	2,8/3,5	44/48	1,5/2,1	1,8/2,5	0,2/0,5	0,75/1,25
FeSiMg5	4,8/6,2	44/48	-	-	0,7/1,3	1,25 max.
FeSiMg5BC	4,8/6,2	44/48	0,3/0,4	0,3/0,5	0,7/1,3	1,25 max.
FeSiMg5C	4,8/6,2	44/48	0,5/0,75	0,6/0,9	0,7/1,3	1,25 max.
FeSiMg5R	4,8/6,2	44/48	0,3/0,45	0,6/0,9	0,8/1,3	1,20 max.
FeSiMg5HR	4,8/6,2	44/48	0,45/0,6	0,9/1,2	0,8/1,3	1,20 max.
FeSiMg5HC	4,8/6,2	44/48	0,95/1,2	1,1/1,4	0,7/1,3	0,75/1,25
FeSiMg6	6,0/7,0	44/48	-	-	0,7/1,3	1,25 max.
FeSiMg6BC	6,0/7,0	44/48	0,3/0,4	0,3/0,5	0,7/1,3	1,25 max.
FeSiMg6C	6,0/7,0	44/48	0,5/0,75	0,6/0,9	0,7/1,3	1,25 max.
FeSiMg9	8,5/10	44/48	-	-	1,0/1,5	1,2 max.
FeSiMg9BC	8,5/10	44/48	0,3/0,4	0,35/0,5	1,0/1,5	1,2 max.
FeSiMg9C	8,5/10	44/48	0,5/0,75	0,6/0,9	1,0/1,5	1,2 max.
FeSiMg9R	8,5/10	44/48	0,35/0,5	0,7/1,0	0,8/1,3	1,2 max.
FeSiMg15	13/17	48/52	-	-	0,8/1,5	1,5 max.
FeSiMg16C	15/17	45/52	0,4/0,6	0,8/1,2	0,8/1,5	1,5 max.
FeSiMg18C	16/20	60/65	0,5/0,75	0,6/0,9	1,0/1,5	1,25 max.

Tabela VI - Composição de ligas FeSiMg com alto cálcio ou magnésio

Liga	%Mg	%Si	%MTR	%Ce	%Al max.
FeSiMg4RL	4,0/5,0	45/50	0,8/1,2	2,0/3,0	1
FeSiMg5AHL	4,0/7,0	48/60	-	23/28	-
FeSiMg6BRL	5,5/7,0	45/50	0,8/1,2	2,5/3,5	1
FeSiMg6RL	5,5/7,0	45/50	1,5/2,5	2/3	1
FeSiMg6HRL	5,5/7,0	45/50	2,8/3,2	1,5/2,5	1
FeSiMg8RL	7,5/9,0	45/50	0,8/1,2	2,0/3,0	1
FeSiMg8HRL	7,5/9,0	45/50	2,8/3,2	3,0/4,0	1
FeSiMg10RL	9,0/11	44/48	0,8/1,2	3,0/4,0	1
FeSiMg10HRL	9,0/11	44/48	3,5/4,0	3,5/4,5	1
FeSiMg10HL	8,0/12	45/55	-	18/23	1,5
FeSiMg15RL	14/16	44/48	0,8/1,2	5,0/6,0	1,5
FeSiMg15L	13/17	45/55	-	3,0/7,0	1,5
FeSiMg15HL	13/17	43/56	-	13/18	1,5
FeSiMg20	18/22	45/50	-	-	1
FeSiMg20L	18/22	45/52	-	3/7	1,5
FeSiMg25	23/27	50/55	-	-	1
FeSiMg30	28/32	48/52	-	-	1
FeSiMg30RL	28/33	45/55	0,8/1,2	3/7	-
FeSiMg30HR	28/33	40/50	40/50	4,0/6,0	1

Tabela VII - Composição e granulometria de ligas para processo "In-Mold"

	Especificação típica Europa	Especificação típica EUA
%Si	45/50	45/50
%Mg	5,5/6,5	4,8/5,2
%MTR	0,50/0,80	0,7/0,9
%Ca	0,35/0,60	2,6/2,8
%Al	0,8/1,0	0,9/1,2
Granulometria	0,6 a 4,0 mm	1,0 a 3,4 mm

Tabela VIII - Composição de ligas do tipo FeSiMgCu

Liga	%Mg	%Si	%Cu	%MTR	%Ca	%Al
FeSiMgCu8R-5	8,0/9,5	43/47	4,5/6,5	1,0/1,5	0,7/1,3	1,25 max.
FeSiMgCu12-15	11/13	38/42	14/16	-	0,7/1,3	1,25 max.
FeSiMgCu20-5	18/23	40/50	3/7	-	-	-
FeSiMgCu20-10	18/23	35/45	8/12	-	-	-
FeSiMgCu30-20	18/23	30/40	28/32	-	-	-

Tabela IX - Composição de misturas de ferroligas e ligas de tratamento suplementar

Liga	%Mg	%Si	%Ce	%MTR	%Ca
FeSiMg9HR	8,5/9,0	41/45	1,75/2,0	3,5/4,0	Não esp.
FeSiMg9R	8,5/9,0	41/45	0,4/0,5	0,8/1,0	Não esp.
FeSiCe	-	36/40	9/11	10,5/15,0	-
FeSiMTR	-	30/35	15/17,5	30/35	-
FeSiMg5HR	4/5	40/43	2,0/2,5	4/5	Não esp.

Tabela X - Propriedades de materiais nodulizantes e recomendações de aplicação

Material nodulizante	Teor em magnésio	Densidade g/cm <sup>3</sup>	Temperatura de fusão, °C	Teor máx. de S no ferro base	Processo típico de nodulização
Mg metal	100%	1,72	650	0,20%	G. Fisher, PAM
FeMg35	35%	3,4	-	0,12%	Sino, pan.basc.
Mag-coke	42-45%	0,7	-	0,12%	Sino, pan.basc.
NiMg15	15%	6,2	1050-1130	0,05%	Panela aberta
NiFeMg15	15%	6,0	1050-1070	0,05%	Panela aberta
NiMg4	4%	7,7	1210-1260	0,03%	Panela aberta
FeNiMg4	4%	7,3	1205-1260	0,03%	Panela aberta
FeSiMg3	3%	5,2-5,6	-	0,02%	Panela aberta
FeSiMg5	5%	4-5	950-1250	0,03%	Panela aberta
FeSiMg10	10%	3,8-4,8	950-1220	0,04%	Panela aberta
FeSiMg30	30%	2,3-2,6	910-1000	0,12%	Sino, pan.basc.

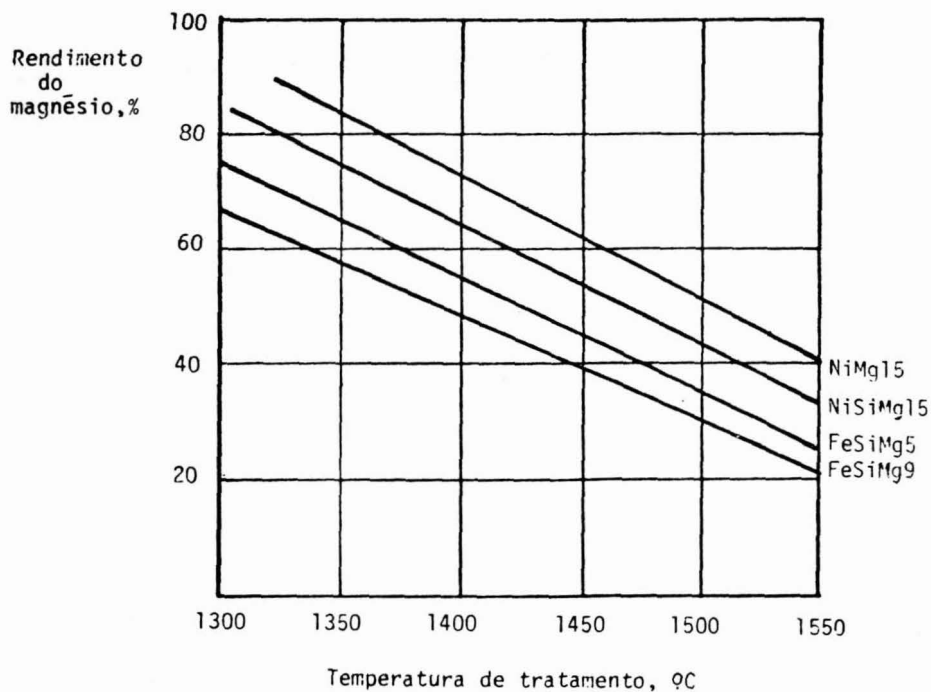


Fig. 1 - Rendimento do magnésio em função da temperatura do tratamento de nodulização e do tipo de liga utilizado, técnica de simples transferência (adaptado de Karsay, ref. 7, e de Barton, ref. 12)