

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES  
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
CÂMPUS DE ERECHIM  
DEPARTAMENTO DAS ENGENHARIAS E CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**LEONARDO DAL VESCO ZILL**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE NODULARIZAÇÃO EM FERRO FUNDIDO**

**ERECHIM – RS  
2020**

**LEONARDO DAL VESCO ZILL**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE NODULARIZAÇÃO EM FERRO FUNDIDO**

**Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do grau de Engenheiro Químico,  
Departamento das Engenharias e Ciências  
da Computação da Universidade Regional  
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –  
Câmpus de Erechim.**

**Orientador: Prof. Dr. Alexander Junges**

**ERECHIM – RS  
2020**

**LEONARDO DAL VESCO ZILL**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE NODULARIZAÇÃO EM FERRO FUNDIDO**

**Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do grau de Engenheiro Químico,  
Departamento das Engenharias e Ciências  
da Computação da Universidade Regional  
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –  
Câmpus de Erechim.**

Erechim, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcelo Luis Mignoni  
Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

---

Prof. Dr. Rogério Marcos Dallago  
Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

---

Prof. Dr. Alexander Junges  
Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família por todo apoio prestado durante essa trajetória, aos ensinamentos repassados e aos incentivos dados sem medir esforços para que tudo se realizasse.

Agradeço aos mestres que estiveram comigo durante todo esse período, onde me repassaram diversas experiências das quais fortaleceram minha vida pessoal e acadêmica.

Aos meus amigos que estiveram ao meu lado nos momentos difíceis e também na diversão.

Ao meu orientador Dr. Alexander Junges, do qual compartilho uma amizade verdadeira fora e dentro da universidade.

Aos colegas de trabalho que me guiaram na área da fundição, com muitos ensinamentos compartilhando informações essenciais.

E para finalizar à toda equipe da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI Campus Erechim, em especial ao Departamento de Engenharia de Ciência da Computação pelo curso de Engenharia Química onde aprendi muito sobre valores e possibilidade de carreira profissional.

## RESUMO

O ferro fundido pode ser dividido em diferentes classificações de materiais, entre eles, cinzento, vermicular, maleável e nodular. O processo de formação dos ferros fundidos consiste no derretimento da sucata e tratamento desse material em estado líquido. Existem diversas técnicas para realizar a formação do ferro nodular, entre elas a mais utilizada pelas fundições, é a *sanduíche*, método também utilizado para estudo nesse projeto. Os experimentos foram baseados na adição de diferentes ligas em uma panela de reação tipo *sanduíche*, com diferentes percentuais de liga adicionada sobre o material. Foram realizadas análises de dureza, composição química e microestrutural das amostras, para compreender a reação do magnésio no momento da formação da grafita nodular. Além do estudo das diferentes ligas utilizadas foi possível observar a diminuição no custo para tratamento do ferro fundido nodular.

**Palavras Chaves:** Ferro fundido nodular, nodularização, técnicas.

## **ABSTRACT**

The casting iron can be divided into different kind of materials, between them, gray iron, vermicular, malleable, and nodular. The forming process of the casting iron, consists of melting the metal scrap and treating this material in a liquid state. There are several techniques to perform the formation of the nodular iron, among them, the most used by the foundries, is the sandwich, and also the method used for studying in this project. The experiments were based on the addition of different alloys in a sandwich reaction pot, with different percentages of alloy added on this material. Analyzes of the hardness, chemical and microstructural composition were carried out to understand the magnesium reaction at the nodular graphite formation. In addition to the study of different alloys used in the process, it was possible to observe the decrease in the cost of treating the nodular casting iron.

**Key words:** Nodular casting iron, nodularization, techniques.

## SUMÁRIO

|            |                                                                     |           |
|------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                             | <b>11</b> |
| <b>2</b>   | <b>OBJETIVOS.....</b>                                               | <b>12</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Objetivos Específicos .....</b>                                  | <b>12</b> |
| <b>3</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                  | <b>13</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Processo Metalúrgico .....</b>                                   | <b>13</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Ferro Fundido.....</b>                                           | <b>15</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Classificações do ferro fundido .....</b>                        | <b>17</b> |
| 3.3.1      | Ferro Fundido Branco .....                                          | 18        |
| 3.3.2      | Ferro Fundido Maleável .....                                        | 18        |
| 3.3.3      | Ferro Fundido Cinzento .....                                        | 19        |
| 3.3.4      | Ferro Fundido Nodular.....                                          | 19        |
| 3.3.5      | Ferro Fundido Vermicular .....                                      | 21        |
| <b>4</b>   | <b>MÉTODOS DE NODULARIZAÇÃO .....</b>                               | <b>22</b> |
| <b>5</b>   | <b>MÉTODOS DE TRATAMENTO COM MAGNÉSIO PURO .....</b>                | <b>24</b> |
| 5.1.1      | Imersão por sino .....                                              | 24        |
| 5.1.2      | Panela Sob Pressão .....                                            | 25        |
| 5.1.3      | Conversor de Tratamento .....                                       | 27        |
| 5.1.4      | Arame recheado .....                                                | 29        |
| <b>6</b>   | <b>MÉTODOS DE TRATAMENTO COM LIGAS CONTENDO MAGNÉSIO .....</b>      | <b>31</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Métodos contendo ligas principais leves.....</b>                 | <b>33</b> |
| 6.1.1      | Processo no molde .....                                             | 33        |
| 6.1.2      | Processo através do fluxo.....                                      | 34        |
| <b>6.2</b> | <b>Métodos contendo ligas principais pesadas .....</b>              | <b>35</b> |
| 6.2.1      | Processo sanduiche .....                                            | 36        |
| 6.2.2      | Processo de tampa fixa/móvel .....                                  | 38        |
| 6.2.3      | Processo de plug poroso .....                                       | 39        |
| <b>7</b>   | <b>FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE NODULARIZAÇÃO.....</b>     | <b>41</b> |
| <b>8</b>   | <b>METODOLOGIA .....</b>                                            | <b>45</b> |
| <b>8.1</b> | <b>Análise da composição química. ....</b>                          | <b>45</b> |
| <b>8.2</b> | <b>Análise metalográfica .....</b>                                  | <b>47</b> |
| <b>8.3</b> | <b>Efeitos do magnésio na microestrutura do ferro fundido .....</b> | <b>48</b> |
| <b>8.4</b> | <b>Escolha da liga ideal para tratamento .....</b>                  | <b>49</b> |
| <b>8.5</b> | <b>Cálculos para adição da liga e rendimento final.....</b>         | <b>51</b> |
| <b>9</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                | <b>54</b> |

|     |                                        |    |
|-----|----------------------------------------|----|
| 9.1 | Teste 01) .....                        | 54 |
| 9.2 | Teste 02) .....                        | 55 |
| 9.3 | Teste 03) .....                        | 56 |
| 9.4 | Teste 04) .....                        | 57 |
| 9.5 | Teste 05 – Sistema Industrial .....    | 61 |
| 9.6 | Simulação da redução de custos.....    | 63 |
| 10  | CONCLUSÃO .....                        | 64 |
| 11  | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:..... | 65 |
| 12  | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....       | 66 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Fluxograma do processo de fabricação do ferro fundido .....                                 | 17 |
| Figura 2: Representação metalográfica da estrutura do ferro fundido maleável. ....                    | 18 |
| Figura 3: Microestrutura do ferro fundido cinzento .....                                              | 19 |
| Figura 4: Microestrutura do ferro fundido nodular.....                                                | 20 |
| Figura 5: Microestrutura do ferro fundido vermicular. ....                                            | 21 |
| Figura 6: Representação esquemática de uma variedade de processos de<br>tratamento.....               | 23 |
| Figura 7: Processo de imersão por sino. ....                                                          | 25 |
| Figura 8: Processo de panela de pressão - Autoclave .....                                             | 26 |
| Figura 9: Processo de conversor de tratamento.....                                                    | 28 |
| Figura 10: Processo de arame recheado. ....                                                           | 29 |
| Figura 11: Rendimento da adição de magnésio metálico em diferentes processos de<br>nodularização..... | 31 |
| Figura 12: Processo de tratamento no molde.....                                                       | 34 |
| Figura 13: Processo através do fluxo .....                                                            | 35 |
| Figura 14: Processo sanduíche.....                                                                    | 38 |
| Figura 15: Processo de tampa fixa/móvel. ....                                                         | 39 |
| Figura 16: Processo de plug poroso.....                                                               | 40 |
| Figura 17: Retirada de amostras em diferentes tempos durante a nodularização. ...                     | 42 |
| Figura 18: Demonstração dos efeitos do magnésio com o enxofre. ....                                   | 43 |
| Figura 19: Diagrama representando a transformação da grafita .....                                    | 44 |
| Figura 20: Espectrômetro.....                                                                         | 47 |
| Figura 21: Microestrutura representando defeito de escória-drosses .....                              | 49 |
| Figura 22: Análises metalográficas dos experimentos realizados. ....                                  | 59 |
| Figura 23: Gráficos do percentual e rendimento do magnésio .....                                      | 62 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Especificações dos elementos para ferro base e ferro processado. .... | 46 |
| Tabela 2: Variedades de liga de magnésio .....                                  | 50 |
| Tabela 3: Percentual dos elementos presentes nas ligas X e Y. ....              | 58 |
| Tabela 4: Resultados encontrados nas análises metalográficas .....              | 58 |
| Tabela 5: Composição química dos testes realizados. ....                        | 60 |
| Tabela 6: Valores encontrados para ensaio de dureza. ....                       | 61 |
| Tabela 7: Simulação de ganho obtido com utilização da liga (Y). ....            | 64 |

## 1 INTRODUÇÃO

O material conhecido por ferro fundido tem uma aplicação muito competitiva em diversos setores. Esse material é composto por uma série de elementos, onde cada um deles tem seu papel fundamental nas propriedades mecânicas. É um material normalmente utilizado para resistir a grandes tensões e impactos, a estrutura dos ferros fundidos é formada por dois elementos de grande importância, carbono e silício.

Na década de 20 e 30 existia uma subdivisão para o ferro fundido, sendo composta por ferro fundido cinzento, ferro fundido branco (Ni-Hard) e ferro fundido maleável. Havia muita procura para produção desses materiais na época, porém o ferro Ni-Hard apresentava dificuldade para desenvolvimento pela indisponibilidade do principal composto, o cromo. Por esse e tantos outros motivos, deu-se início a uma grande pesquisa para a descoberta de outro elemento que pudesse ser substituído pelo cromo e apresenta-se características semelhantes a ele.

A pesquisa desse elemento substituinte foi financiada por empresas que projetavam um futuro promissor para os equipamentos feitos a partir do ferro fundido. Para verificar a qualidade de outro composto capaz de suprir a necessidade da utilização do cromo, foi realizada a adição de diversos elementos separadamente em ligas de ferro base durante o processo de fundição.

O aumento da produção de ferro fundido vem sendo gradativamente maior ao longo do tempo, no ano de 2018 a produção de fundido aumentou cerca de 2,6% em relação ao ano anterior conforme censo mundial de fundição. Conforme dados disponibilizados pelo censo, dentre os 20 países que fornecem informações a respeito da produção anual, 19 desses apresentaram maior volume em relação aos anos 2017/2018.

Para o estudo das características metalúrgicas dos ferros fundidos é necessário o entendimento da principal ferramenta dessa área, o diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono. Um mapa gráfico onde estão localizadas as principais transformações e estados de equilíbrio do ferro fundido baseando-se nas temperaturas de fusão e concentração de carbono no metal líquido. Os materiais fabricados a partir do ferro fundido se destacam por apresentar ductilidade juntamente com uma boa resistência mecânica e propriedades semelhantes a alguns aços.

O ferro fundido mais produzido no Brasil é o nodular. Considerando que nesse material as grafitas estão na forma esferoidal devido a reação da liga ferrosa de magnésio com o metal líquido, processo conhecido como nodularização, onde o elemento responsável pela formação da grafita esferoidal é o magnésio, aumentando o módulo de elasticidade e resistência mecânica da peça produzida.

O processo de nodularização é conhecido pela adição da liga de magnésio nas panelas de reações durante o tratamento do metal. Alguns métodos são eficazes para amenizar a volatilização do composto quando adicionado, entre eles são, panela de reação com diferentes geometrias, panelas com tampas fixas ou móveis, uso de outro material metálico para desacelerar a reação do composto, realização da nodularização dentro do molde, imersão da liga de magnésio sob pressão e por fim o estudo realizado nesse trabalho por panelas conversoras.

## **2 OBJETIVOS**

O trabalho em estudo tem como objetivo realizar a otimização do processo de nodularização em ferro fundido nodular com diferentes tipos de ligas de magnésio com a técnica *sanduíche*.

### **2.1 Objetivos Específicos**

Realizar testes que demonstrem a redução da perda de magnésio por evaporação. Sendo capaz de avaliar os rendimentos de ligas com diferentes concentrações de magnésio.

Verificar a eficiência de métodos práticos com análises sobre as propriedades mecânicas, estruturais e químicas do material.

Validar o procedimento em estudo para adotar como método padrão.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste item será abordado a história sobre o ferro fundido, assim como sua classificação mais comum e os diferentes métodos para modularização em ferro fundido.

#### **3.1 Processo Metalúrgico**

A fundição está presente em diversos setores, dos quais exigem alta resistência mecânica, térmica, impacto, desgaste e principalmente a garantia do produto de qualidade para cada cliente. O processo metalúrgico é conhecido a muitos anos e estudado por diversos pesquisadores mundo a fora. Basicamente consiste na fusão de quilos de sucata ou um tipo de matéria prima processada que atinja sua fase líquida a aproximadamente 1400-1500°C e posteriormente tratada conforme a receita de cada empresa. Após a fusão dessa sucata o material é vazado para os moldes, que serão preenchidos com as dimensões ideais para cada peça, levando em consideração todo processos de resfriamento e solidificação necessário. Existem diversas geometrias de peças para serem produzidas pelas empresas, geralmente as peças mais pesadas tendem a gerar mais lucros para o negócio, pois o preço final do material é baseado no quilo do metal (AGNOLETTI, 2016).

As empresas metalúrgicas conseguem adaptar-se muito bem as teorias de processamento em massa, onde cada setor é responsável pela produção de cada parte de uma peça.

Para criação de uma peça fundida é necessário a avaliação de fatores como peso da arvore dessa peça, geometria do objeto, condições físico-químicas da areia de moldagem, qual liga interna será utilizada conforme a necessidade de trabalho e principalmente o custo final da peça (SENAI, 1987).

Os processos de projeto e desenvolvimento são formulados no setor de engenharia de uma empresa de fundição. A partir daí os responsáveis devem examinar todas as condições de operação da peça, elaborar o desenho com as devidas cotas para ter um acabamento perfeito. Com as condições de operação completa, é necessário verificar qual liga interna será utilizada para ela, considerando os fatores climáticos para o destino de comercialização. Por fim é projetado o molde de vazamento, com a entrada do metal líquido, saída de gases gerados, contração e alguns aspectos que podem gerar defeitos de fundição (SOUZA, 2012).

Além da geometria das peças, a engenharia é responsável pelo desenvolvimento dos machos que irão formar as partes internas das peças, são produzidos conforme a necessidade de cada peça, em qual local deverá ter uma furação com medidas acrescidas devido a contração do molde e solidificação do metal (OLAWALE et al., 2016).

Após a liberação do projeto pela engenharia a ordem de serviço passa para o setor seguinte que é responsável pela confecção dos moldes para a máquina que irá montar e aguardar pelo vazamento. Cada etapa é de extrema importância para o desenvolvimento completo da peça, se a sequência não for estabelecida é possível que ocasione algum defeito anormal durante o processo de fundição, como peças refugadas por falta de macho, enchimento incompleto do molde e possíveis deslocamento das peças (SANTOS, 1987).

Os moldes são formados por placas já construídas com dimensões para o objeto a ser moldado. O sistema de moldagem por ser obtido de diversas maneiras, como a moldagem com areia verde que é o método conhecido pela formulação de areia a base de sílica com aglomerantes e moldagem cura frio por utilizar agentes químicos com a utilização de gases ou calor para o processo de cura da mistura. Atualmente o método que reduz a geração de poluentes nas indústrias metalúrgicas e reduz o custo é o processo de moldagem a areia verde, por ser um sistema que apenas utiliza aglomerantes e água na formulação da areia de moldagem (SENAI, 1987).

Juntamente com a confecção do molde pelas máquinas, o setor de fusão já prepara a carga do ferro a ser vazado, esses setores trabalham em conjunto para reduzir o tempo no processo, enquanto a moldagem é responsável por preparar as caixas, o setor de fusão já realiza a mistura das matérias primas para o desenvolvimento do ferro.

Após o vazamento das peças em linha de produção, os moldes realizam o resfriamento durante o dia. O processo de resfriamento e solidificação depende muito da espessura e geometria de cada peça, é um momento de extrema atenção pois um resfriamento muito rápido ou lento pode desencadear defeitos na microestrutura das peças. É nessa etapa que a dureza da peça é definida por meio da solidificação e contração, conforme a peça vai contraindo e se solidificando o material trabalha para ter a dureza específica conforme a liga escolhida no projeto (SOUZA, 2002).

Depois que todo processo químico e físico é realizado, as peças passam para uma área onde receberão um tratamento de rebarbação e acabamento final. Essa é uma fase muito manual, onde os operadores devem fazer a retirada dos canais de enchimento e rebarbas da peça, para facilitar o processo elas passam por uma máquina que realiza o jateamento de granalha para retirar a quantidade excessiva de areia que sobrou da moldagem. Após as peças percorrer por todos setores da fundição elas são liberadas para pintura e por fim para expedição, onde serão enviadas ao cliente final (SANTOS, 1987).

Existe alguns casos em que as peças não atinjam a microestrutura ideal, e antes de serem pintadas seguem para um tratamento térmico, onde as fases trabalham em um novo rearranjo devido à alta temperatura do processo. Geralmente são peças que necessitam de uma microestrutura mais preparada. A elaboração dessas fases depende de fatores diretos como o tipo de sucata fundida, a velocidade do resfriamento da peça, a quantidade de liga inserida no processo que consequentemente irá modificar a composição química do material (MOCELLIN, 2002).

### **3.2 Ferro Fundido**

O processamento do ferro fundido é considerado um dos caminhos mais simples e curtos entre as matérias-primas metálicas e as peças acabadas. As principais etapas do processo de fundição são a fusão e a solidificação entre matéria-prima sólida e o produto acabado para uso. Em contrapartida, há outras etapas entre fusão e solidificação em processos como forjamento, laminação e estampagem, sendo uma delas a etapa de deformação plástica por tratamento mecânico ou térmico (FRANCKLIN, 2009).

Por ser um material muito importante devido as suas amplas propriedades físicas e mecânicas, é considerado muito competitivo nos dias atuais. Os ferros fundidos surgiram por volta de 1500 a.C. colocando o setor metalúrgico como um dos principais pilares de crescimento do Brasil (AGNOLETTTO, 2016).

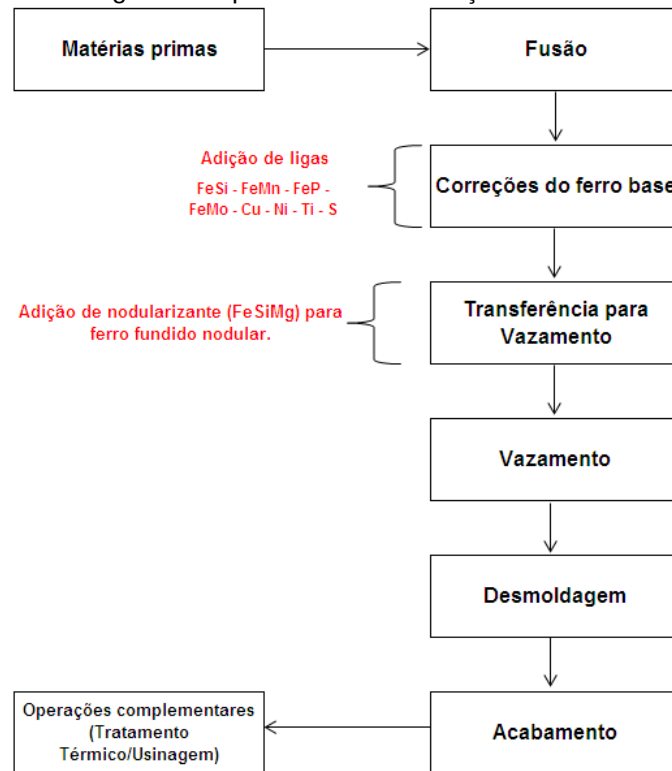
A China, por ser um dos principais países em desenvolvimento, evidencia que o ferro fundido surgiu por volta de 600 a.C. com uma vasta produção e seus produtos ricos em fósforo, carvão e enxofre. Já na Europa, existem relatos que o ferro fundido foi levado pelos orientais antes do século XV por ser apreciado como matéria-prima

necessária para fabricação do aço forjado e não como uma liga de fundição (MALUF, 2002).

O ferro fundido é definido como uma liga de Fe-C contendo 3% ou mais de carbono livre e, na maioria das vezes, resulta em partículas de grafita em suspensão na matriz. Uma das ferramentas de grande importância para o estudo desse material é o diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono, sendo ele um mapa que ilustra as fases de transições e transformações baseadas em temperatura e composição (NUNES, 1988).

Para diferenciar os tipos de ferro, são realizadas análises químicas e termomecânicas (SOUZA, 2012). Todo processo para obtenção desses materiais é executado em fornos de fusão (elétrico ou a coque). Como carga base para produção, pode-se utilizar ferro gusa, sucatas de aço selecionadas e retorno de materiais em ferro fundido. Após adição dessas cargas no forno, normalmente são necessárias algumas correções e ajustes para determinar qual classificação de material será obtida como produto final (CHAPTER, 2006). A principal diferença entre tipos de ferro é o processo de nodularização, o qual consiste na adição do elemento magnésio no metal líquido em panelas de reação. Outro fator importante é a nucleação, processo que visa garantir a melhor formação da grafita, seja ela em forma de lamelas ou nódulos (ELKEM, TECHNICAL INFORMATION 23, 2000). A Figura 1 demonstra um fluxograma contendo o processo base para a fusão do ferro fundido.

Figura 1: Fluxograma do processo de fabricação do ferro fundido



Fonte: Autor, 2020

A classificação dos ferros fundidos pode variar conforme seu tipo de grafita predominante. As partículas presentes na grafita podem influenciar diretamente em qualquer propriedade mecânica do material, além disso as medidas de dureza e ductibilidade dependem também da formação dessa grafita, partículas de materiais nodulares tendem a deixar o resultado da dureza superior aos de materiais cinzento. Os principais constituintes do ferro fundido são de origem natural com características químicas e morfológicas diferentes apresentando fases estáveis ou metaestáveis durante a solidificação (LABRECQUE; GAGNÉ, 1998)

### 3.3 Classificações do ferro fundido

Nos itens abaixo será abordado a classificação mais comum dos diferentes tipos de ferro fundido usados em algumas fundições.

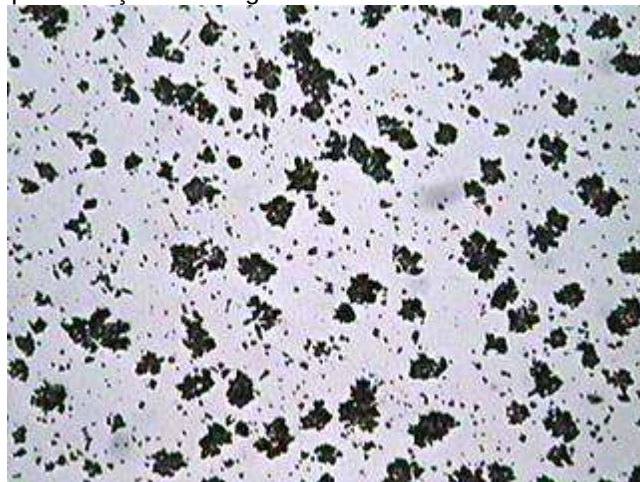
### **3.3.1 Ferro Fundido Branco**

As características estruturais do ferro fundido branco são reconhecidas quando sua microestrutura apresenta muitos carbonetos. É identificado pela presença do elemento carbono em diferentes formas, essa estrutura é definida por variações de elementos de liga e um aumento significativo na velocidade de resfriamento da peça durante a solidificação dentro do molde. Essa estrutura é configurada por um ferro muito duro, consequentemente quebradiço (CHIAVERINI, 2012).

### **3.3.2 Ferro Fundido Maleável**

É conhecido por ser um ferro combinado que realiza uma transformação de grafitas na forma de nódulo. Normalmente esse material já é fundido a partir do ferro branco, recebendo um processo de tratamento térmico denominado de maleabilização. Essa transformação na grafita de sua microestrutura proporciona novas características mecânicas como maior dureza, melhor resistência a fadiga e ao desgaste com condições melhores durante a usinabilidade (CHIAVERINI, 2012), a microestrutura do ferro maleável pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2: Representação metalográfica da estrutura do ferro fundido maleável.



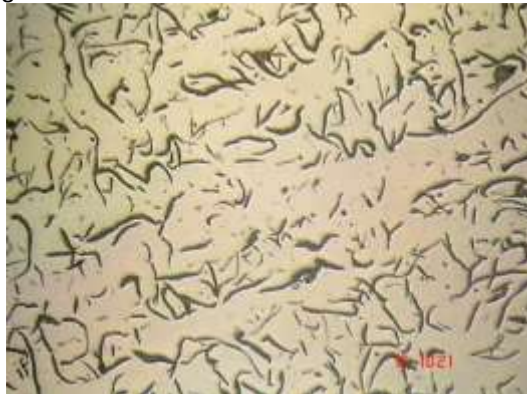
Fonte: VIECELLI, 2002

### **3.3.3 Ferro Fundido Cinzento**

Esse tipo de estrutura é a mais conhecida pelos fundidores e engenheiros metalúrgicos. Foi utilizada por muito tempo por ser um material fácil de produzir e com baixo custo. Para melhor observação desse material, quando quebrado, percebe-se o tom acinzentado em sua fratura, mostrando evidentemente que os carbonos presentes estão em forma de veias, onde a microestrutura sobre ataque é muito mais ferrítica do que perlítica (AGNOLETTI, 2016).

O ferro fundido cinzento é muito utilizado em peças que necessitam de trabalho térmico, ou seja, superaquecimento durante seu funcionamento. As grafitas em forma de veias ilustradas na Figura 3, facilitam a dissipação do calor por toda sua estrutura, impedindo um desgaste maior. Pode-se encontrar esse material em peças como discos de freio de caminhões de carretas onde necessitam alto trabalho térmico quando acionados (GUESSER, 2009).

Figura 3: Microestrutura do ferro fundido cinzento



Fonte: VIECELLI, 2002

### **3.3.4 Ferro Fundido Nodular**

Material representado por carbonos na forma de grafita esferoidal, proveniente do tratamento realizado ainda em seu estado líquido na panela de reação. As propriedades termomecânicas desse material são alteradas pelo processo de nodularização de maneira positiva, aumentando sua resistência a tração e ductilidade. Devido a sua boa representatividade em ensaios mecânicos, esse material tem como excelente aplicação nos setores de engenharia, substituindo os demais ferros já apresentados (MURATORE, 2006).

O processo de nodularização ganha destaque por poder ser realizado de diversas maneiras. Alguns métodos podem proporcionar melhores condições de trabalho, menor perda, mais segurança durante a operação e ganhos econômicos.

O nodularizante utilizado pode ser processado a partir do magnésio puro ou de ligas de ferro silício magnésio, contendo demais compostos que favorecem o procedimento.

A adição dessas ligas na panela de reação é feita de forma manual. A quantidade de liga adicionada pode variar conforme o processo de cada empresa. A liga colocada ao fundo da panela como em alguns processos fica aguardando o derramamento do metal líquido sobre ela, após a panela de reação ser enchida o processo de reação começa, nesse caso alguns fatores empíricos podem ser afetados. O composto magnésio é vaporizado e assim atravessa o ferro líquido de baixo para cima, são necessárias algumas avaliações para esse parâmetro de perda por volatilização, não só pelo composto magnésio, mas por outros elementos presente também, como no caso da diminuição do teor de enxofre durante a nodularização, processo que facilita a formação da grafita esferoidal (MULLINS, 2006).

Para a reação de formação das grafitas demonstradas na Figura 4, é necessário um tempo de aproximadamente 7 minutos, conhecido por tempo de *fading*. Portanto é evidente que todo ferro seja vazado nos moldes dentro desse período, caso isso não aconteça, poderá haver a formação de alguns defeitos na estrutura da peça (ELKEM, TECHNICAL INFORMATION 26, 2001).

Figura 4: Microestrutura do ferro fundido nodular.



Fonte: Autor, 2002.

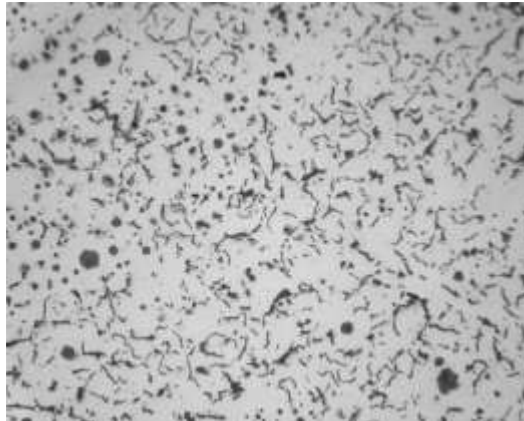
### **3.3.5 Ferro Fundido Vermicular**

Esse é um material com diferentes percepções pelos fundidores, mas sua característica mecânica é muito parecida com a do ferro fundido cinzento com melhor resistência mecânica e pouca ductilidade. As peças fabricadas com esse material são utilizadas em alguns blocos de motores, coletores e escapamentos de máquinas agrícolas (NUNES, 1988).

Com a junção das características do ferro cinzento e nodular, forma-se a microestrutura do ferro fundido vermicular. Esse metal pode ser formado por duas maneiras, adicionando elementos nodularizantes com uma concentração inferior que o normal ou adicionando a quantidade necessária para formação de nodular, mas em conjunto com adição de elementos anti-nodularizantes como ligas com maior concentração de titânio (ELKEM, TECHNICAL INFORMATION 07, 1997).

O controle deve ser preciso para chegar a estrutura ideal de ferro vermicular como demonstrado na Figura 5. A adição de liga com titânio é mais favorável para algumas fundições, pois a alternativa de adicionar menor quantidade de magnésio para chegar na estrutura vermicular exige equipamentos mais sofisticados que garantam a qualidade do produto (THOMPSON, 2014).

Figura 5: Microestrutura do ferro fundido vermicular.



Fonte: VIECELLI, 2002.

#### 4 MÉTODOS DE NODULARIZAÇÃO

Considerando que o processo de nodularização em ferros fundidos pode ser representado por elementos como magnésio, cério e cálcio. Esses compostos são responsáveis pela formação da grafita esferoidal no ferro fundido, existe outros elementos que podem realizar a transformação de maneira parecida, porém, exigem melhores condições particulares de processamento. Com a variedade de compostos que realizam a formação da grafita, entende-se que as melhores técnicas para o ramo industrial ainda são fornecidas pela adição de magnésio. (SANTOS, PIESKE, 1985).

O processo de tratamento do magnésio no ferro fundido nodular pode ser desenvolvido de diversas maneiras. Considerando que a escolha da matéria prima a ser utilizada deve ser de grande importância, pode-se utilizar ligas de ferro contendo magnésio ou simplesmente o magnésio puro (MULLINS, 2006).

A adição do magnésio pode ser realizada em panelas de vazamento, método mais utilizado em escala industrial, ou também na forma de adição do fio do magnésio em câmara específica. Pouca quantidade de magnésio (0,03% a 0,06%) inserida nesse material líquido já resultará em melhores condições de resistência a tração, resistência ao impacto, alongamento e limites de escoamento. Todos resultados de melhor condicionamento mecânico são evidenciados durante a transformação da grafita (CABANNE, 2008).

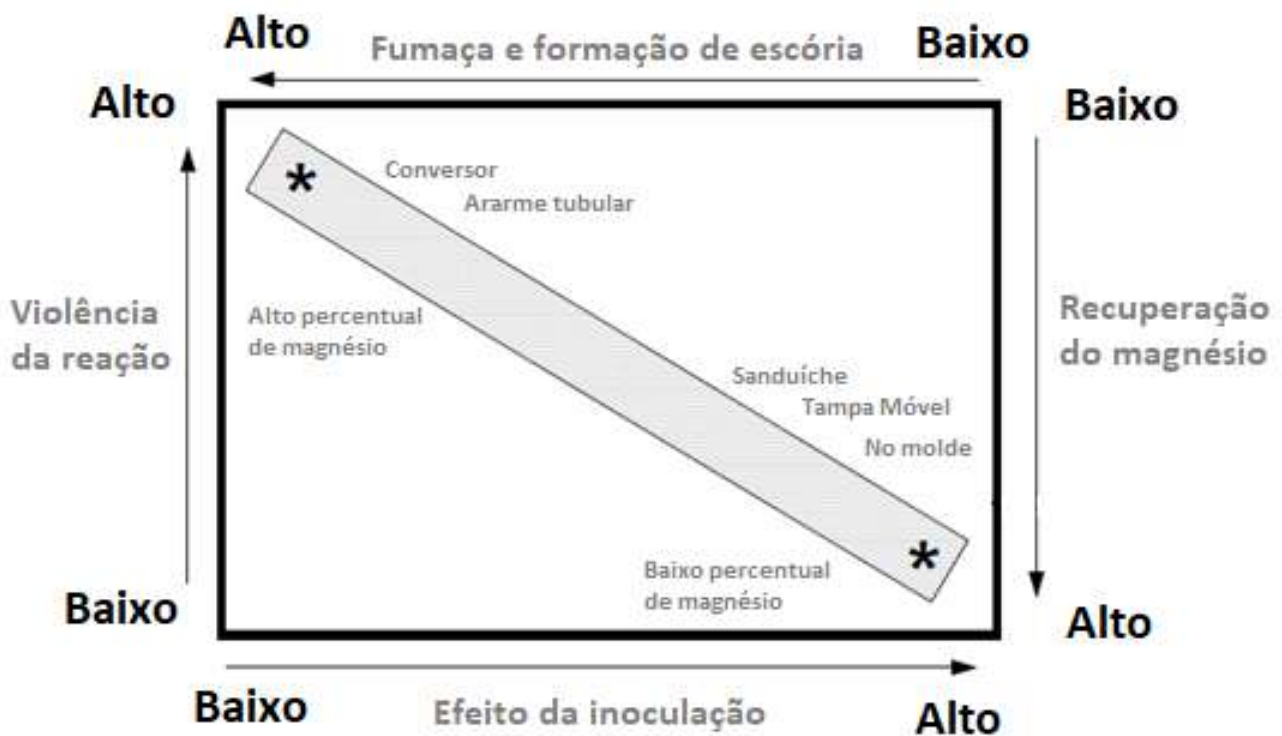
As propriedades mecânicas de resistência à tração, alongamento e escoamento são muito influenciadas pelo grau de nodularização e pela quantidade de esferoides por mm<sup>2</sup> na estrutura do ferro nodular. Um dos problemas a serem encontrados no momento da transformação do ferro fundido nodular são as grafitas vermiculares, ou seja, grafitas que não reagiram de maneira correta por falta do elemento magnésio, pois podem exceder seu tempo de “*fading*”, que é caracterizado como o tempo máximo para executar o vazamento de uma panela dentro dos moldes e que dura aproximadamente 7 minutos. Essas perdas podem ser relacionadas a volatilização, oxidação ou até mesmo não incorporação do magnésio no metal (ELKEM, TECHNICAL INFORMATION 23, 2000).

Quando se trata da adição do magnésio puro no metal líquido, é preciso observar diversos fatores que podem interferir no processo. Considerando a adição isolada do elemento ao metal, entende-se que a reação deve ser mais violenta pelo fato dele estar no estado puro. Essa situação pode causar maior risco a saúde dos operadores responsáveis pelo tratamento do metal, diminuindo a segurança do

processo e necessitando de maiores cuidados durante o tratamento, como uma maior distância da panela de reação (CHAPTER, 2006).

A Figura 6 demonstra por meio de uma representação esquemática como os processos de tratamento e suas diferentes matérias primas entre alta e baixa concentração de magnésio podem afetar parâmetros do processo, como violência da reação, evaporação do magnésio, geração de fumaça, formação de escória e principalmente a eficácia da inoculação.

Figura 6: Representação esquemática de uma variedade de processos de tratamento.



Fonte: Adaptado de Elkem, Technical Information 09, 1997.

Como demonstrado na Figura 6, existe uma correlação muito importante entre os parâmetros descritos em cada lado da imagem com os métodos de tratamento do metal líquido com maior ou menor concentração de magnésio (ligas de ferro contendo magnésio ou o elemento puro).

Pelo diagrama constata-se que as técnicas listadas acima da faixa são consideradas mais adequadas para tratamentos, como de conversão ou arame tubular inserido na panela de reação, considerados processos que utilizam materiais com alto teor de magnésio.

Já os métodos listados na parte inferior direita do diagrama normalmente são utilizados com ligas de ferro contendo magnésio com menor concentração. Sanduiche, tampa móvel, inoculação no molde são os métodos mais utilizados pelas pequenas fundições.

Normalmente a utilização de ligas com maior concentração de magnésio ou até mesmo magnésio puro demonstram alto grau de violência, baixa recuperação de magnésio, alta formação de fumaça e escória.

## **5 MÉTODOS DE TRATAMENTO COM MAGNÉSIO PURO**

Será abordado neste item algumas técnicas para o tratamento do ferro nodular com utilização do magnésio puro ou ligas de ferro contendo alta concentração de magnésio.

Todos processos listados são direcionados para utilização de ligas mais concentradas, podendo provocar reações mais fortes e intensas durante o processo de nodularização.

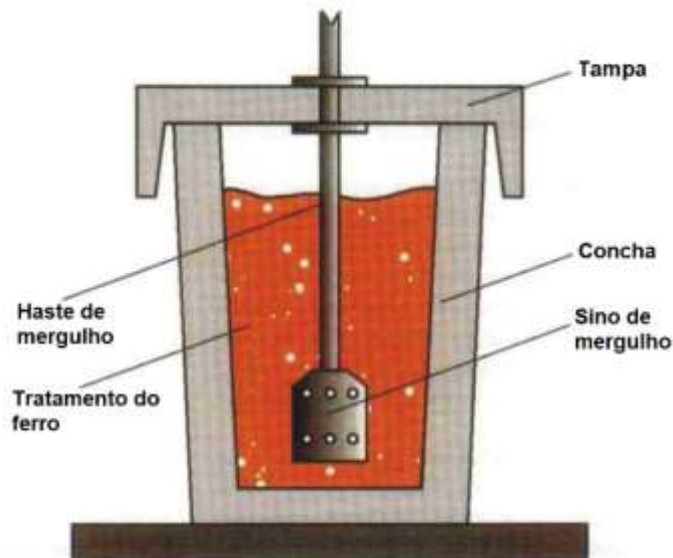
### **5.1.1 Imersão por sino**

Entre todas maneiras desenvolvidas para adição do magnésio no ferro fundido, o processo de mergulho do material na panela líquida ganha destaque por ser bem conhecida pelos fundidores.

O processo consiste no mergulho da liga nodularizante diretamente no ferro líquido a uma temperatura ideal. A liga adicionada é embalada na forma de uma caixa com paredes finas feitas de tubo de aço com algum tipo de revestimento, então esse tubo cheio de liga é direcionado para a panela de reação por meio de uma aste, onde a alimentação deve ser programada conforme o tubo vá se dissolvendo em toda material líquido e de preferência ao fundo da panela onde a liberação da liga de magnésio deverá começar (ELKEM, TECHNICAL INFORMATION 09, 1997).

É preciso ter muitos cuidados com essa técnica de adição da liga no material líquido, pois o magnésio no interior do tubo de aço tende a subir para a superfície quando começar a derreter junto com o metal, por sua grande diferença de densidade em relação ao ferro fundido que apresenta densidade de aproximadamente 7 g/cm<sup>3</sup>, ao contrário do magnésio que é de 1,7 g/cm<sup>3</sup> (SOIESKI; WACHOWSKI, 2009). Na Figura 7 percebe-se o método comentado sobre imersão por sino.

Figura 7: Processo de imersão por sino.



Fonte: Adaptado de Olawale, et al. 2016.

A grande vantagem desse método de adição por mergulho é que pode realizar o tratamento do metal derretido com teor de enxofre mais alto, pois o mecanismo de flutuação do magnésio auxilia na diminuição do teor de enxofre por arraste até a superfície e posteriormente a evaporação. Outro ponto favorável é a variedade de matérias primas nodularizantes que podem ser utilizadas nessa técnica (ELKEM, TECHNICAL INFORMATION 09, 1997).

Também existem algumas desvantagens presentes no processo por mergulho, como uma maior perda por temperatura, devido a adição do sino com uma temperatura inferior no metal derretido e o desgaste desse sino, não podendo ser reutilizado (SOIESKI; WACHOWSKI, 2009).

### 5.1.2 *Panela Sob Pressão*

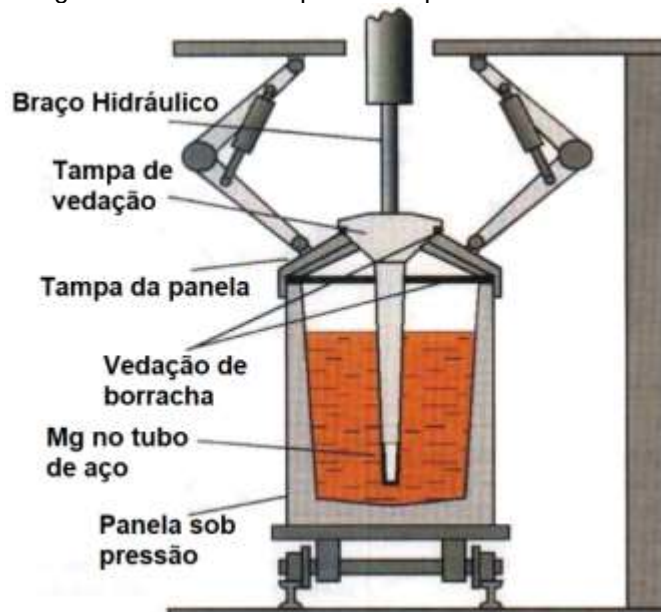
O método de adição do magnésio por panela sob pressão ou mais conhecida como autoclave é definida por utilizar o ar atmosférico e os próprios gases gerado pela combustão do magnésio no sistema.

Nesse caso o ferro é inserido pela parte superior, após o enchimento necessário conforme níveis da panela, a tampa superior fecha-se mecanicamente e o sistema já está se pressurizando pela geração dos gases proveniente do ferro fundido, assim por um orifício superior passa uma haste vedada que é responsável pela adição do magnésio no sistema (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 09, 1997).

Nesse procedimento o magnésio também é fixado em uma caixa formada de aço para retardar a reação quando entra em contato com o ferro derretido. Enquanto ocorre a reação do magnésio com o metal líquido, a pressão do sistema aumenta, mas quando chega ao fim da reação de alguns segundos essa pressão volta ao estado normal dentro da panela, a tampa superior será aberta liberando a pressão residual e assim o metal está pronto para o vazamento (SOIESKI; WACHOWSKI, 2009).

Na representação da Figura 8 pode-se observar o sistema de funcionamento de uma panela de pressão para ferro fundido nodular.

Figura 8: Processo de panela de pressão - Autoclave



Fonte: Adaptado de Olawale, et al. 2016.

A maior vantagem do processo de nodulização em panela sob pressão é um alto teor de recuperação do magnésio durante o processamento do ferro nodular, considerando menores perdas por evaporação e que o processo de inoculação com outros elementos pode ser feito junto (NUNES, 1988).

Como é considerado uma panela muito segura para a sistemática de modularização seu custo de aquisição é alto, considerando uma desvantagem para o sistema de tratamento sob pressão, assim como a importância de mantê-la sempre calibrada e regulada para o processo produtivo (CHAPTER, 2006).

### **5.1.3 Conversor de Tratamento**

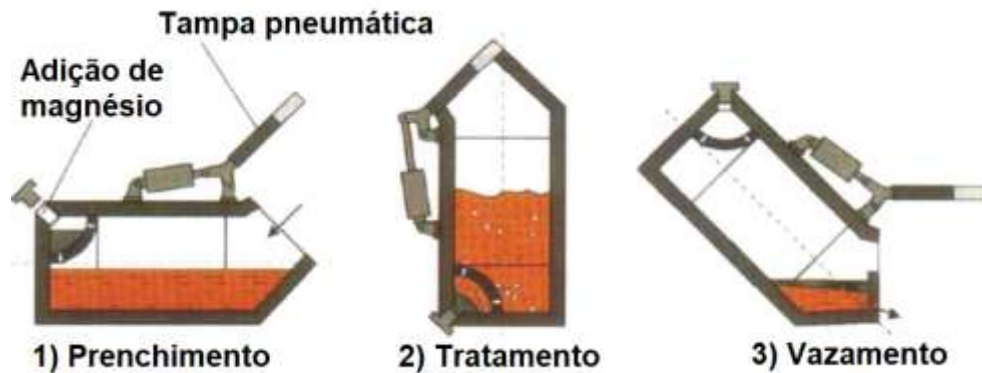
O objetivo desse sistema é muito parecido com a panela sob pressão. Nesse processo ocorre a conversão da panela totalmente fechada ocasionando da mistura da liga com o ferro líquido.

Com o conversor regulado na posição horizontal para entrada do ferro líquido, em sua parte superior existe uma cavidade em forma de gaveta onde o magnésio ou a liga de ferro contendo magnésio é colocada. Posteriormente o cilindro é enchido com o ferro derretido, para que a reação de modularização ocorra é necessário que o sistema passe da posição horizontal para vertical de maneira pneumática (SOIESKI; WACHOWSKI, 2009).

Nesse momento o tratamento do ferro nodular começa a ser realizado, onde o metal líquido mexe no interior do conversor chegando até a gaveta que contem a liga de magnésio, ocasionando a reação desejada pelo sistema. Assim percebe-se que a pressão do sistema aumenta com a reação do magnésio com o metal, após o fim da reação a pressão estabiliza e o material está pronto para o vazamento (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 09, 1997).

Essa técnica é considerada muito eficaz na reação de modularização. Com o processo controlado pneumaticamente as variações podem se tornar mínimas, normalmente com a utilização desse conversor algumas fundições reduzem seus custos de produção, por utilizar menor percentual de liga para ferros nodulares por ser um sistema totalmente fechado. O sistema permite o tratamento do ferro base com um percentual de enxofre um pouco mais alto que o normal, o giro que a panela recebe favorece a dessulfurização do material líquido, diminuindo então o teor de enxofre no ferro processado, fator muito importante para o processo de fundição (CHAPTER, 2006). Pode-se observar na Figura 9 a sistemática desse processo de conversor de tratamento.

Figura 9: Processo de conversor de tratamento



Fonte: Adaptado de Olawale, et al. 2016.

A principal vantagem proposta pelo processo de conversão está relacionada com a economia significativa no uso de ligas de magnésio, considerando os custos mensais e anuais da instituição. A questão econômica fornece maior estrutura para as empresas, gerando redução de custos durante o processo, é possível que posteriormente essa redução seja investida em tecnologias para melhorar a qualidade do produto e automatizar ainda mais o processo de fundição da empresa. Por se tornar um processo mais automatizado de tratamentos, é evidenciado que a conversão da panela não provoca tantos riscos ao operador responsável pelo processo, o ambiente de trabalho do setor fica menos poluído quando o processo de nodularização ocorre em sistemas fechados (NUNES, 1988).

Entre todos fatores positivos, ainda pode-se destacar que esse processo garante uma melhor condição de nodularização. O tratamento do ferro pode ser realizado em frente a linha de moldagem, ocasionando mais agilidade para os fundidores, ganho de tempo e principalmente diminuindo fatores que podem acarretar problemas de composição química ou microestrutura indevida do material (OLAWALE et al., 2016).

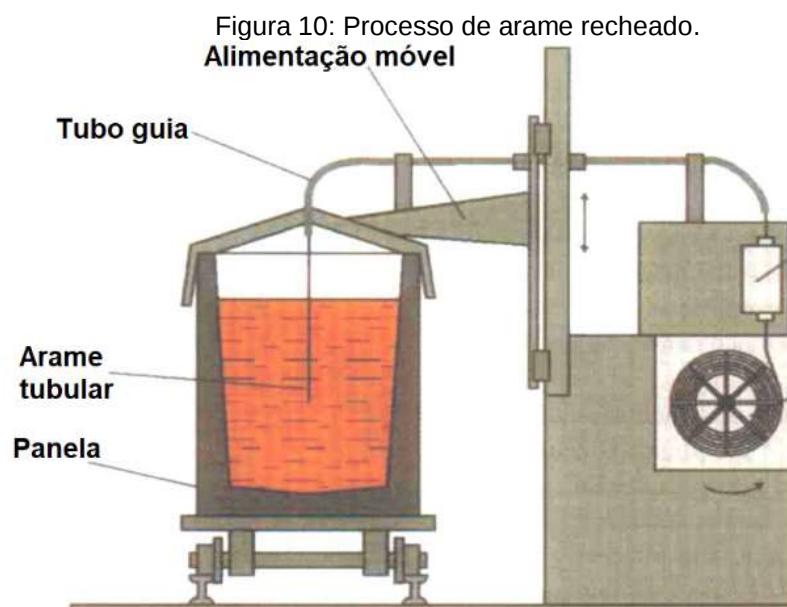
Assim como na técnica anterior, o investimento financeiro inicial para obtenção desse equipamento é considerado uma desvantagem, considerando que os conversores de tratamento ainda são mais em conta que panelas pressurizadas. O devido cuidado com a vida útil do refratário também deve ser levado em conta como desvantagem do processo.

#### 5.1.4 Arame recheado

Conhecido por ser um dos processos mais automatizados para tratamento do ferro base. É considerada uma das técnicas mais precisas para adição do magnésio puro ou ligas de ferro contendo magnésio no metal derretido, fornecendo um controle exato e garantindo qualidade ao ferro processado.

O processo é de maneira simples, ao contrário dos últimos comentados, esse consiste na adição da liga de magnésio em forma de fio. O magnésio está na parte interior desse fio, ou seja, é um arame recheado com a liga desejada. A adição é contínua até que o teor essencial de magnésio para ferro nodular é atingido (OLAWALE et al., 2016).

Esse método pode ser utilizado em linha contínua como também em processos simultâneos conforme necessidade de produção do ferro nodular. Em alguns caso pode-se encontrar esse arame recheado no processo de inoculação no molde das peças, por ser um método simples e com menores riscos, apenas adicionando a quantidade necessária para formação dos nódulos na microestrutura (SOIESKI; WACHOWSKI, 2009). A representação da Figura 10 demonstra como é realizado o funcionamento de panelas que utilizam o método de arame recheado.



Fonte: Adaptado de Olawale, et al. 2016.

A principal vantagem desse sistema é a utilização da quantidade ideal de liga no sistema, assim como uma maior segurança durante a reação pela panela estar fechada e isolada em relação ao sistema externo.

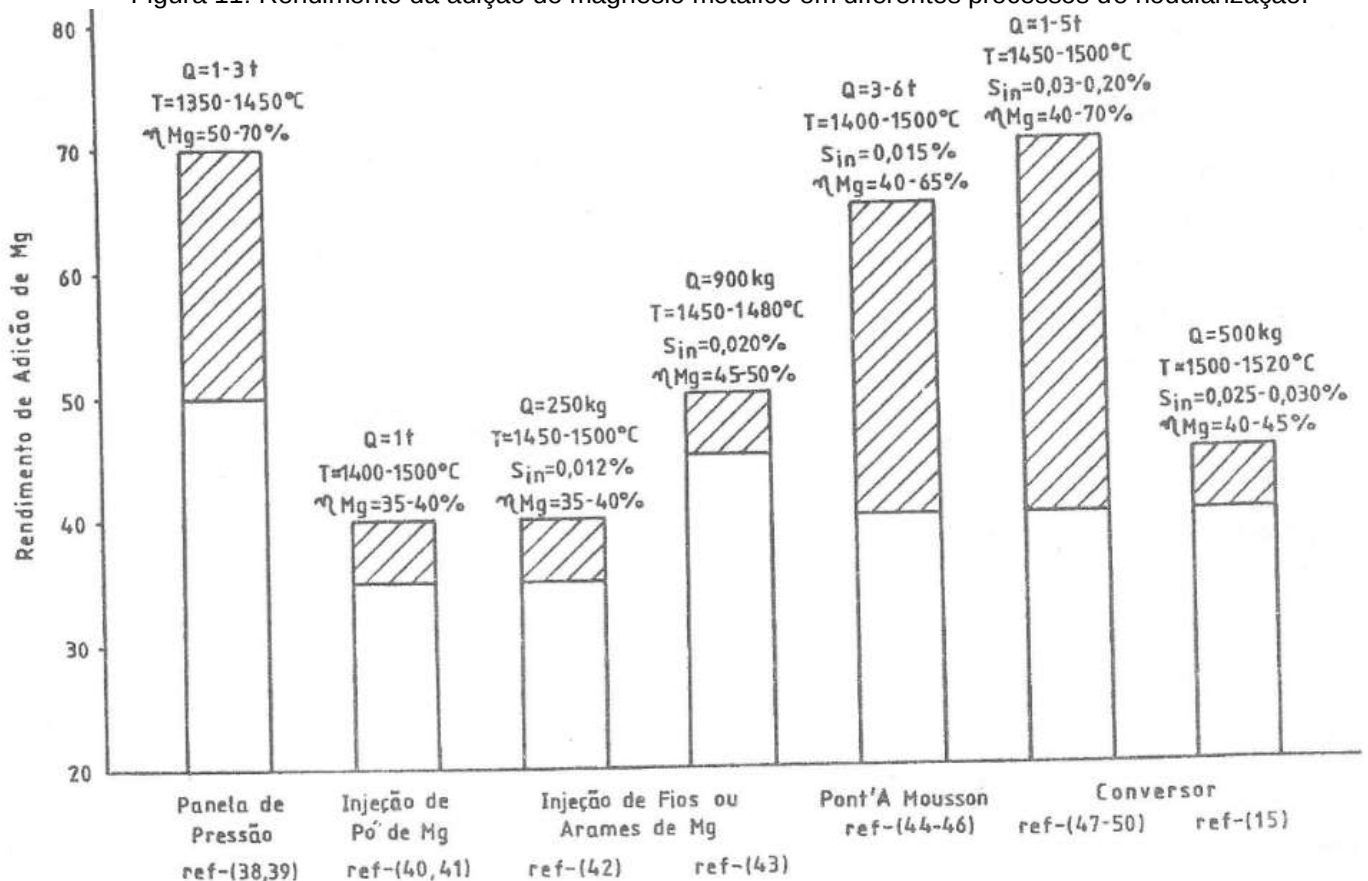
Entretanto a desvantagem mais comum é que o sistema só trabalha com ligas que possam ser comercializadas na forma de arame, ou seja, que o material usado para a nodularização deve ser coberto por outro material para retardar a reação do magnésio em contato direto com o ferro líquido. A maioria dos fabricantes de ligas trabalham com ligas em formatos sólidos e a matéria prima não é pequena para ser adicionado dentro de um arame recheado, portanto é necessário para o uso desse sistema ligas especiais que possam ser utilizadas na forma de arame recheado (OLAWALE et al., 2016).

Sabe-se que a adição do composto na forma metálica no ferro fundido é de baixo custo em relação a utilização das ligas nodularizantes. Esse método tolera a utilização de ferro base com teores de enxofre mais altos em até 0,30%, devido reação mais violenta, outro fator que pode ser considerado bom para utilização de magnésio puro é a adição de maiores quantidades de retornos de fundição na carga de preparação do forno (SANTOS; PIESKE, 1985).

Como já explicado anteriormente a alta reatividade da reação ocasiona um baixo teor de enxofre final, pode-se entender que o método de adição por magnésio metálico tem maior eficácia algumas classificações internas de peças. Dessa forma com baixos teores finais de enxofre juntamente com a remoção de forma correta da escória da panela de reação, há menor formação de defeitos e inclusões no material.

Porém o uso do magnésio metálico deve ser compensado com alguns compostos para neutralização da ação de outros elementos que atuam de maneira negativa em relação a morfologia da grafita do ferro nodular, como mencionado na Figura 11.

Figura 11: Rendimento da adição de magnésio metálico em diferentes processos de nodularização.



Fonte: SANTOS; PIESKE, 1985.

O diagrama acima representa o uso de equipamentos mais sofisticados possibilitando maior rendimento de magnésio durante o processo. Painela de pressão, conversor e pont-à-mousson tem altos rendimentos pela adição de magnésio metálico no sistema, pelo contrário em sistemas de fios de arames apresentam menores rendimentos do processo.

## 6 MÉTODOS DE TRATAMENTO COM LIGAS CONTENDO MAGNÉSIO

O mercado das ligas de magnésio é grande e muito procurado pelos fundidores nos dias atuais. Métodos de tratamentos estão ligados diretamente com as diferentes variedades de ligas já criadas até o momento. A classificação geral das ligas em um primeiro momento é determinada por ligas leves e pesadas, respectivamente com suas densidades em relação ao metal líquido onde será utilizada (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 09, 1997).

Como existe uma grande variedade de ligas e fornecedores que diferenciam suas composições químicas, também há diversas maneiras para o tratamento desse processo de nodularização.

Cada empresa metalúrgica trabalha com sua receita própria para fundir o ferro base, dependendo das características de cada ferro é necessárias ligas específicas para a transformação desse ferro base em processado como ferro branco, maleável, cinzento, nodular ou vermicular.

A grande pesquisa por ligas diferentes que forneçam melhor qualidade ao ferro fundido levou essa classificação inicial entre ligas leves e pesadas. O principal motivo por essa classificação simples é que normalmente as ligas leves mais utilizadas pelas fundições são a base de silício e as mais pesadas a base de cobre ou níquel (SENAI, 1987).

É necessário que as ligas contenham diferentes elementos para as diversas finalidades durante o processamento do ferro fundido, entre os elementos que ganham destaque no momento de selecionar a liga a ser utilizada estão: magnésio, alumínio, cálcio ou terras raras. Esses elementos são considerados importantes durante a escolha da liga pelo fato afetarem diretamente na microestrutura, dureza, propriedades mecânicas e defeitos superficiais do material.

O magnésio como já dito anteriormente é o principal elemento a ser identificado no momento de escolha da liga. Pode-se optar pelo uso de ligas com maior percentual de magnésio ou ligas com baixos percentuais de magnésio. Normalmente ligas leves típicas de ferro silício magnésio apresentam valores de concentração do magnésio de 3% a 10% com percentual de silício entre 43% e 48% considerando os percentuais de cálcio de 0,8% 2,0%. Já as que apresentam 5% a 15% de magnésio são classificadas como ligas pesadas e o restante de sua composição dividida em níquel ou cobre. Existem pesquisas que mostraram boa eficiência na substituição do níquel ou cobre por até 32% de ferro na composição das ligas pesadas, diminuindo seu valor comercial e favorecendo no processo de nodularização (OLAWALE et al., 2016).

Se utilizado acima de 0,03% no ferro processado, o alumínio pode ser o responsável por causar defeitos em formas de furações na superfície da peça.

O cálcio é outro elemento que deve ser levado em consideração durante a escolha da matéria prima, quando uma liga apresenta a concentração de cálcio muito elevada, ela pode causar maior geração de escória durante o processo, diminuindo a vida útil do forno e das panelas de reação, gerando mais resíduos e provocando mais riscos ao ambiente de trabalho (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 07, 1997)

## 6.1 Métodos contendo ligas principais leves

Essas técnicas são conhecidas por realizarem o processo de nodularização em conjunto com algum método que retarde a reação do magnésio em contato com o metal líquido. Para que a perda de magnésio por evaporação seja minimizada, utiliza-se sistemas em formas de conchas ou diferentes materiais de sucata de cobertura que mantenham a liga sempre abaixo da superfície de ferro líquido (SENAI, 1987).

A matéria prima nesses casos apresenta menor percentual de magnésio em seus sólidos, o que exige maior cuidado do fundidor responsável, afinal adicionar a liga no metal fundido a aproximadamente 1500°C e perde-la por evaporação antes do vazamento completo não é um bom sinal para o processo (OLAWALE et al., 2016).

Algumas técnicas de aperfeiçoamento desses métodos foram desenvolvidas ao longo dos anos, o sistema em formato de concha é um dos mais utilizados até o momento, mas considerando todos os seguintes processos como eficazes para a nodularização do material.

### 6.1.1 Processo no molde

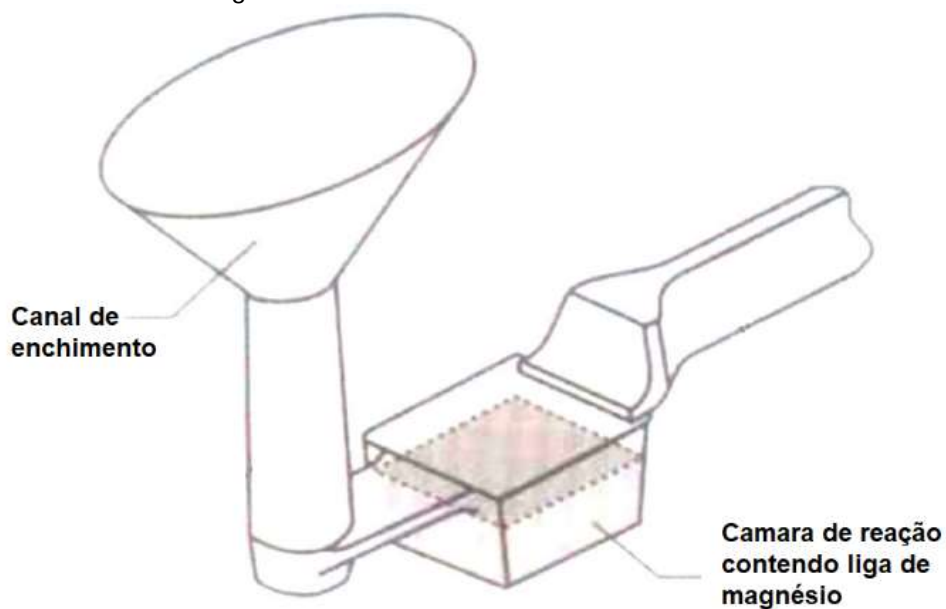
Com cuidados mais expressivos essa técnica é utilizada normalmente em processos específicos, onde algum tipo de peça já apresentou um problema de microestrutura ou em sistemas com grandes linhas em série de moldagem. O tempo de *fading* é considerado um parâmetro importante pelo vazador responsável, caso esse tempo se exceda o ideal é que ele pare imediatamente com o vazamento do metal, pois isso significa que o magnésio presente já evaporou aproximadamente 100% e isso poderá causar sérios danos a microestrutura da peça (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 23, 2000).

É recomendado que as ligas utilizadas nesse processo sejam de baixa concentração de magnésio, pois a reação dentro do molde pode aumentar as chances de defeitos por porosidades, bolhas e também na microestrutura do material. A geração de gases no interior do molde aumenta com esse método, logo é necessário que sejam atribuídas novas saídas de gases nesses moldes facilitando a saída dos mesmos, controlando a pressão interna e evitando sérios problemas (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 35, 2002).

Também existem métodos em que o fluxo de vazamento do metal no molde entre por 2 orifícios durante o mesmo momento, normalmente isso ocorre quando a

dimensão da peça fabricada é muito grande, necessitando de mais de uma entrada de ferro líquido para manter a temperatura do ferro na parte interna do molde. Nesse caso pode-se inocular as duas entradas do molde na parte inferior com as ligas desejadas, sempre com cálculos precisos e controles rigorosos para atingir a melhor qualidade do produto (OLAWALE et al., 2016). A Figura 12 apresenta o processo de inoculação dentro do molde, com o canal de descida do metal líquido e a câmara responsável pela reação.

Figura 12: Processo de tratamento no molde.



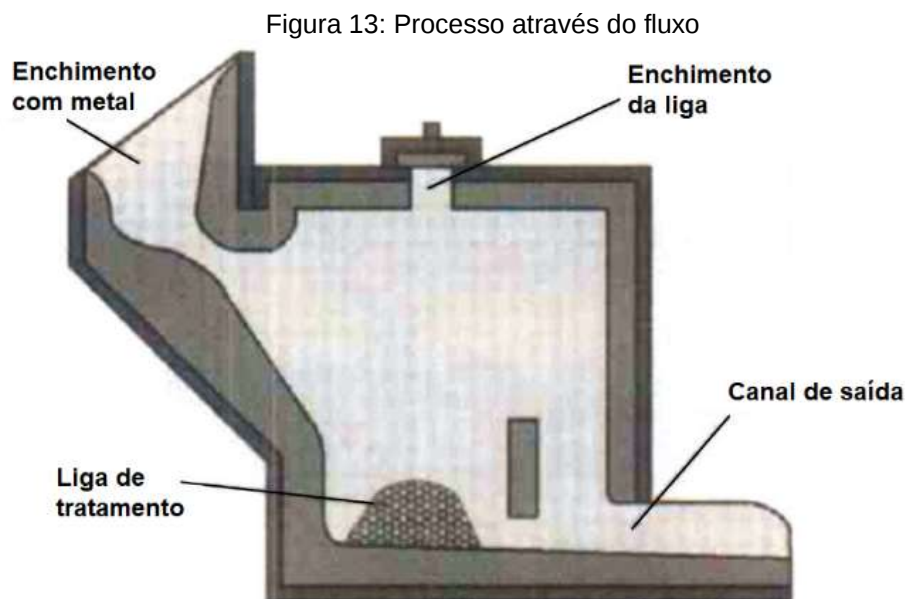
Fonte: Adaptado de Olawale, et al. 2016.

### 6.1.2 Processo através do fluxo

Método muito próximo a uma máquina de moldagem. Desenvolvido para que a reação ocorra de maneira contínua, em que o ferro líquido passando pela câmara comece a reação de maneira dinâmica.

A câmara de reação é um processo intermediário entre a preparação do ferro base no forno a indução e o vazamento do metal nos moldes das peças. Consiste em um dispositivo completamente apenas com os orifícios de entrada do ferro base e saída do ferro processado com alvo nos moldes, a liga necessária para reação de nodularização é carregada pela parte superior da câmara e direcionada para seu local de reação ao fundo (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 23, 2000).

É conhecido como um processo isolado e fechado, com poucas saídas e perdas por evaporação. A principal vantagem desse método é a recuperação de magnésio durante o processo e também ausência de fumaça eliminando a utilidade dos sistemas de ventilação no momento da reação. A desvantagem desse sistema é que para ter uma alta eficiência o processo precisa ser mais contínuo, ou seja, entra ferro processado na câmara, reage e já é liberado para o molde, processo curto e sem muito tempo de espera pelos operadores. Nesse caso algumas empresas não conseguem adaptar o processo pois exigem uma câmara muito grande e grande quantidade de material para reação (OLAWALE et al., 2016). Observa-se na Figura 13 o procedimento utilizado para reação através do fluxo.



Fonte: Adaptado de Olawale, et al. 2016.

## 6.2 Métodos contendo ligas principais pesadas

Nesse item será abordado as diferentes formas de reação para uso de ligas com alta concentração de magnésio, ligas que também contenham elementos com níquel e cobre em maior concentração nos seus produtos. Não necessariamente os métodos listados abaixo são utilizados apenas com ligas mais concentradas, não é considerado uma regra, mas é apontado como métodos ideais e apropriados para o melhor funcionamento da reação (CHIAVERINI, 2012).

O processo sanduíche é o processo mais conhecido pelos fundidores, acredita-se que é o processo base para qualquer aprendiz do ramo metalúrgico, pois nele estão constados a grande maioria dos parâmetros necessários para a avaliação do material, a adição de cada componente do ferro processado é realizada em etapas, fracionando os momentos de adição e medição de alguns fatores, como temperatura, quantidade de nodularizante e inoculante (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 11, 2002).

### **6.2.1 Processo sanduiche**

Muito confundido com o processo de concha, essa técnica é mais aprimorada e muito mais utilizada por pequenas e médias fundições pelo mundo todo. Como no sistema de concha aberta, no processo chamado sanduíche a liga de magnésio é depositada ao fundo da panela de reação, mas com um divisor com o restante do raio da panela, esse divisor é responsável por retardar a reação não só pelo contato direto com o metal líquido por cima, mas também pelas laterais do local onde a liga é depositada, favorecendo a reação de nodularização (OLAWALE et al., 2016).

O projeto de dimensionamento dessa panela de reação deve ser determinado conforme a capacidade necessária pela empresa, esse bolso ao fundo da panela também deve ser projetado para a quantidade de liga utilizada em cada sistema de fundição. Com a adição da liga nesse bolso com divisor, posteriormente é depositado um material para retardar a reação de contato do metal com a liga, maioria dos casos é conhecido como sucata de cobertura (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 11, 2002).

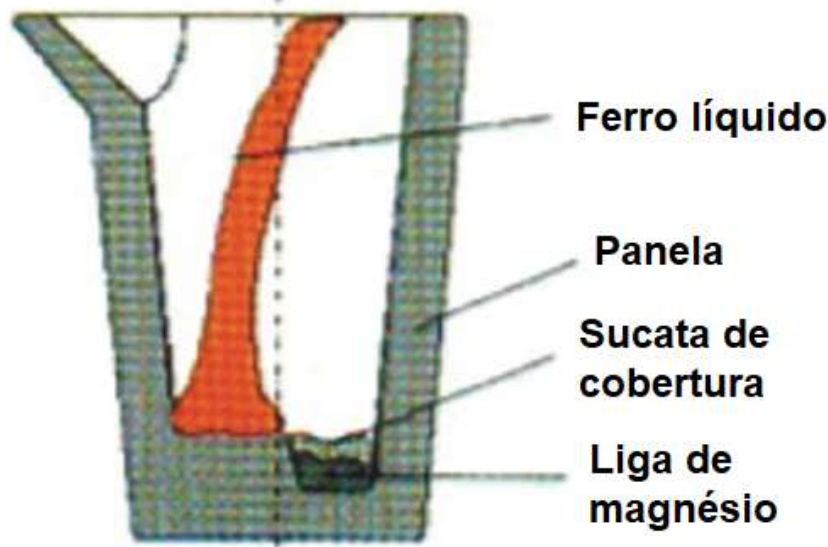
A empresa onde esse estudo foi realizado utiliza esse processo como sistema de nodularização, o estudo em caso está relacionado pela otimização desse sistema e possível substituição do mesmo por outro mais eficaz proporcionando menores perdas e menor uso de matéria prima.

A grande vantagem desse sistema sanduiche é que utilizando o espaço ao fundo da panela com mais um divisor em forma de bolso, acaba ganhando mais alguns segundos da reação, pois a liga fica concentrada em um espaço menor e pode-se utilizar menos sucata de cobertura para retardar a reação, considerando uma recuperação de magnésio na faixa dos 30~50%. Normalmente essas panelas de reação são pré-aquecidas para receber o material líquido, a uma temperatura próxima de fusão do magnésio, mas mantendo seu comportamento sólido (CABANNE, 2006).

Porém com uma faixa de recuperação instável do magnésio é necessário que o ferro contenha baixos percentuais de enxofre, também considerados alguns fatores como efeitos pirotécnicos (MULLINS, 2006). O sistema utilizado nesse projeto está exibido a seguir pela Figura 14

.

Figura 14: Processo sanduíche.



Fonte: Adaptado de Olawale, et al. 2016.

### 6.2.2 Processo de tampa fixa/móvel

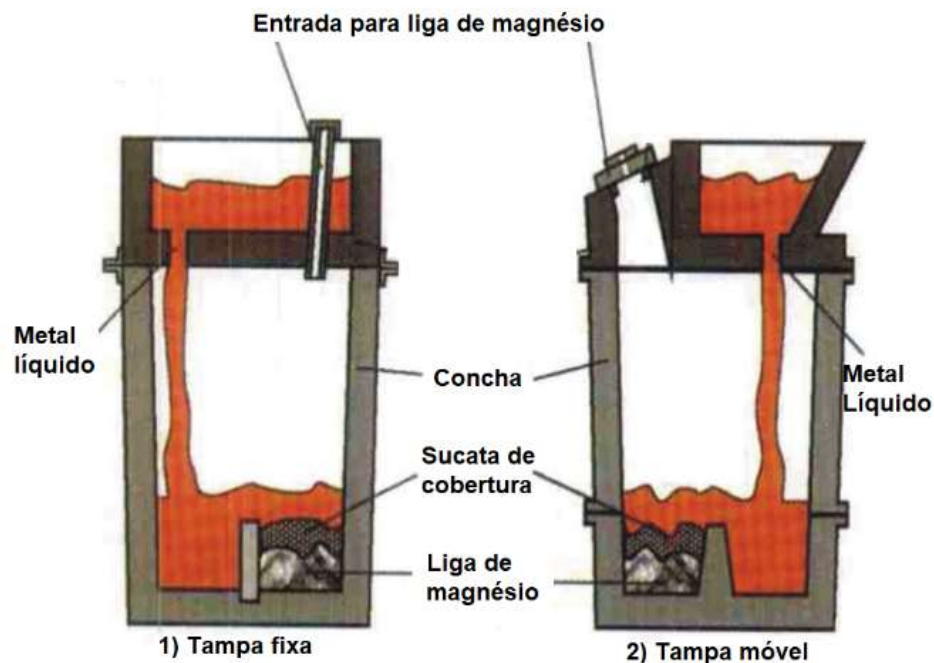
Com o passar dos anos os processos foram avançando com algumas melhorias práticas, como exemplo a técnica de tampa móvel ou fixa é considerado um avanço do processo na concha e sanduíche. Esses sistemas exigiram algumas melhorias devido à alta concentração de oxigênio no interior de suas panelas de reação, o oxigênio presente no interior da panela interferia na reação como efeito oxidativo do material, prejudicando a qualidade final do produto (ELKEM TECHNICAL INFORMATION 11, 2002).

Com ajustes simples foram elaboradas diversas suposições para diminuir os efeitos do oxigênio no ferro líquido, entre os métodos testados o que apresentou melhor efeito positivo foi a elaboração de tampas móveis ou fixas sobre a panela de reação. As tampas projetadas pelos fundidores eram de maneiras simples, apresentando um orifício superior para entrada da liga de magnésio, com caída direta sobre o fundo da panela e um bocal reduzido para o vazamento do metal processado (CABANNE, 2006).

Uma parede foi projetada na parte mais alta da panela para que a liga tivesse o caimento perfeito até o local desejado, separando o material líquido do sólido para que não tivesse uma dissolução antecipada. Considerando que nesse processo também é necessário o uso de um material de cobertura para retardar ainda mais a reação do ferro em contato direto com o magnésio.

Entretanto com a junção de 3 métodos projetou-se um quase perfeitamente ideal para o processamento do ferro nodular. Existem grandes empresas que utilizam esses métodos para uso de ligas pesadas, leves e também com magnésio puro em menor quantidade. Na figura 15 está representado o processo muito parecido com *sanduíche*.

Figura 15: Processo de tampa fixa/móvel.



Fonte: Adaptado de Olawale, et al. 2016.

### 6.2.3 Processo de plug poroso

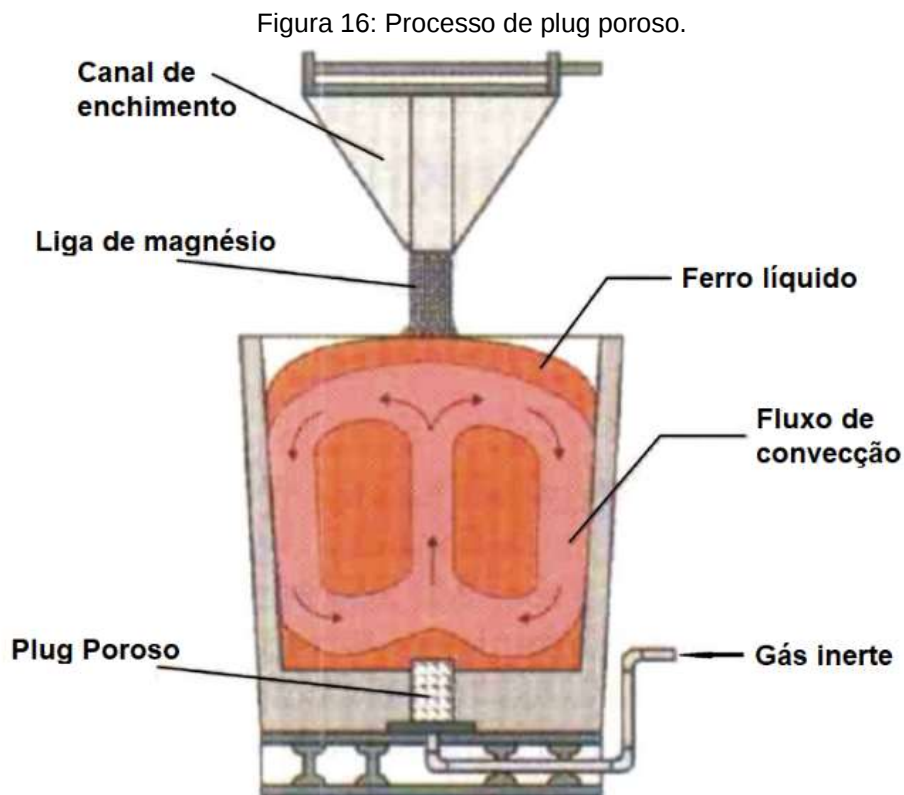
Conhecido pelos fundidores como processo de tampão poroso, essa técnica está relacionada com agitação intensa do ferro fundido e a liga nodularizante com algum tipo de gás inerte para mistura dos compostos, normalmente o gás utilizado nesse processo é o gás nitrogênio. Esse método também se encaixa nos processos de adição de ligas leves.

Como a agitação fornece uma mistura mais rápida e intensa sobre a solução de ferro fundido, esse processo também é considerado como um processo mais dinâmico, podendo realizar além da mistura das ligas, os próprios inoculantes utilizados em cada material interno. O reator projetado deve seguir os padrões operacionais de cada sistema de produção, basicamente o processo consiste na agitação do ferro por meio de gás inerte com adição da liga de magnésio na parte superior da panela, ao contrário dos métodos já citados, na parte inferior é alocado

uma concha com diversos furos onde o gás ira acessar a câmara de reação para mistura dos compostos formando um fluxo de convecção (OLAWALE et al., 2016).

Por ser um método com bastante agitação torna o fluxo muito turbulento que acaba favorecendo na dessulfurização do ferro fundido, ou seja, o nível de enxofre no ferro base pode ser considerado mais alto, devido a turbulência gerada durante o processo esse percentual tende a baixar com a reação da liga de magnésio no interior da câmara (CHAPTER, 2006).

Porém as oxidações geradas pelas bolhas de agitação são consideradas uma desvantagem do processo, ocasionando baixa recuperação do magnésio assim como as bolhas favorecem a uma grande perda de temperatura durante a reação, por esses motivos esse processo é pouco utilizado por empresas com produção em larga escala (SANTOS, PIESKE, 1985). Na Figura 16 é possível observar o processo de plug poroso.



Fonte: Adaptado de Olawale, et al. 2016.

## 7 FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE NODULARIZAÇÃO

Nessa seção serão abordados alguns fatores que estão ligados diretamente as perdas do processo de nodularização. Considerando o tratamento realizado no material líquido com ligas contendo magnésio e também magnésio em seu estado mais puro (metálico).

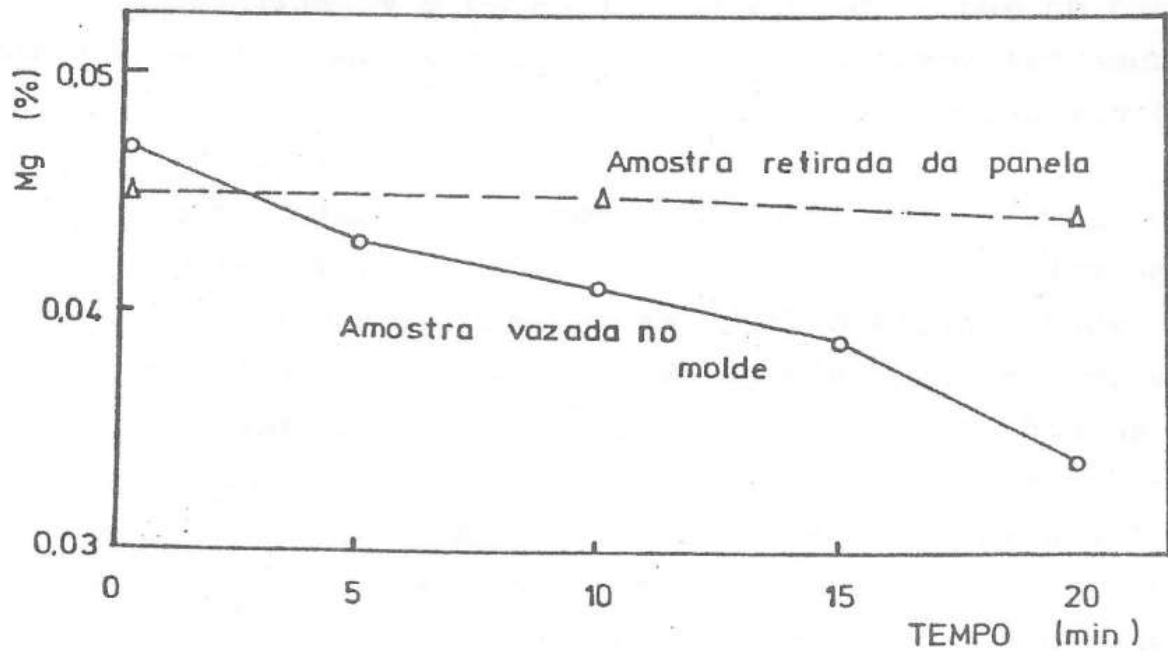
As principais condições que favorecem diminuição do percentual de magnésio no ferro são percebidas durante a volatilização, dessulfurização e desoxidação. Sabe-se que é muito difícil mostrar de maneira experimental a contribuição individual de cada mecanismo, devido aos fatores do processo metalurgista.

Conforme experiências realizadas por Barton (1959), o aumento da temperatura indica uma forte regressão no percentual de magnésio residual no ferro. Os testes realizados por ele partiram da adição da liga de magnésio em uma temperatura de aproximadamente 1250°C, verificou-se que a perda de magnésio se intensificava conforme a temperatura aumentava gradativamente. Considerando que os testes foram realizados em temperaturas relativamente baixas ao processo de vazamento de peça nodulares onde normalmente encontram-se na casa dos 1400°C.

As dúvidas a respeito das perdas de magnésio tiveram outras respostas, nas experiências de Mills (1969) foi constatado que além do magnésio apresentar uma evaporação mais rápida com aumento gradativo da temperatura, ainda assim ele observou nas análises de microestrutura a diminuição do número de nódulos totais em diferentes tempos e temperaturas. Mesmo com menor quantidade de nódulos o percentual de magnésio encontrado nas amostras foi acima dos 0,040%, indicando que o material não apresenta nenhum modelo de grafitas degeneradas pelo processo.

Utilizando a técnica de conversor com magnésio puro, Gotoh (1977) demonstrou a perda de magnésio através do tempo transcorrido após a reação de nodularização. Com os estudos realizados, o autor determinou que a perda de magnésio tem pouca variação com os diferentes tipos de revestimentos utilizados, como, sílica, alumina e magnésia na panela de reação. Porém o autor retrata a variação do teor residual do elemento magnésio, com a retirada de diversas amostras durante o processo de vazamento. A Figura 17 retrata diferentes tempos de retirada das amostras e a perda do magnésio durante o processo.

Figura 17: Retirada de amostras em diferentes tempos durante a nodularização.



Fonte: Santos; Pieske, 1985.

O principal motivo pela grande perda de magnésio por vaporização é devido a alta pressão de vapor relacionadas as temperaturas de fabricação do ferro fundido. Considerando que durante o tratamento também ocorre a reação do magnésio com o elemento enxofre, ocasionando a formação de sulfeto de magnésio, esse composto também está mencionado na análise quantitativa do magnésio e do enxofre quando verificados separadamente. Além da reação com o enxofre, o magnésio também reage com as moléculas de oxigênio presente na interface do material líquido com a atmosfera e com óxidos presentes no banho (SANTOS; PIESKE, 1985). Essas reações podem interferir no processo de formação da grafita nodular, os efeitos da interação entre magnésio e enxofre são representados na Figura 18.

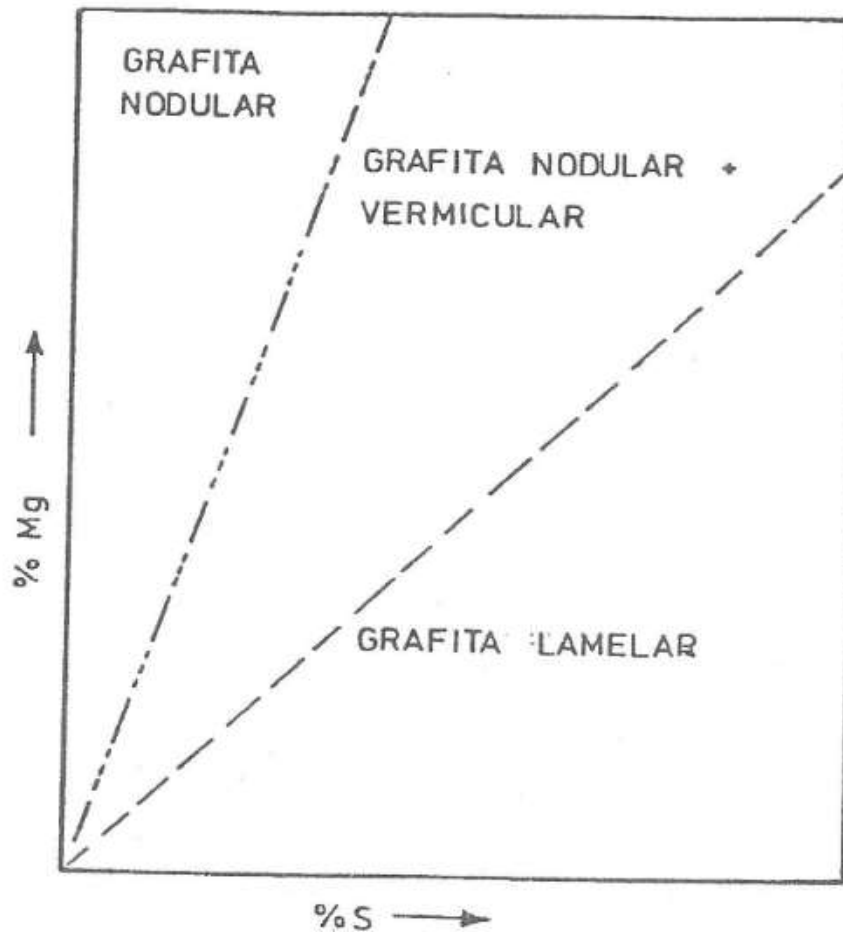
Figura 18: Demonstração dos efeitos do magnésio com o enxofre.



Fonte: Santos; Pieske, 1985.

A primeira amostra retirada para análise representa o momento imediato após o tratamento do ferro nodular, a composição do teor de magnésio e enxofre é elevada. Após alguns segundos percebe-se que o percentual de magnésio começa a decair, ou seja, nesse período ocorre a perda do composto pelo metal líquido. Nesse caso já existe a formação do sulfeto de magnésio, devido a reversão desse composto, ocorre um aumento do teor de enxofre a partir do ponto 2. Relacionando o desenvolvimento de todos esses fenômenos com a formação dos nódulos, pode-se observar que com a diminuição do percentual de magnésio o número de nódulos presente também decai, consequentemente a grafita começa se degenerar e posteriormente ocorre o aparecimento das grafitas lamelares (SANTOS; PIESKE, 1985). Para melhor entendimento da formação dos diferentes tipos de grafita durante o processo de nodularização tem-se a Figura 19.

Figura 19: Diagrama representando a transformação da grafita



Fonte: Santos; Pieske, 1985.

O diagrama representa esquematicamente as variações ocasionadas na morfologia da grafita obtida após o tratamento no decorrer do tempo. Com o baixo percentual de magnésio presente, a grafita começa se transformar da forma nodular para vermicular e por fim grafita lamelar, demonstrando alguns problemas encontrados nas empresas que realizam o processamento do ferro nodular.

## 8 METODOLOGIA

Nessa seção será abordado os materiais utilizados para a realização dos experimentos assim como as técnicas testadas conforme os métodos já listados.

### 8.1 Análise da composição química.

Esse procedimento é baseado em uma análise prática realizada no laboratório industrial com equipamentos de alta tecnologia, no caso da empresa onde foram realizados os testes, as amostras foram analisadas em um espectrômetro de emissão óptica. O equipamento faz a leitura de 25 elementos químicos presentes no ferro, as amostras devem ser retiradas no momento do vazamento do metal desejado para análise, todas amostras são elaboradas em formas de círculos para promover uma eficiência no momento da leitura pelo equipamento.

Carbono e silício são os principais elementos presentes no ferro, esses compostos são responsáveis por grande parte da formação da microestrutura do ferro fundido. O carbono é considerado o principal elemento para a formação da grafita, portanto quanto maior for seu percentual em peso, maior será o número de grafitas na microestrutura, é importante considerar que esse elemento não realiza essa tarefa sozinho, e sim com a reação de todos outros responsáveis.

O manganês encontrado no ferro fundido é responsável pela redução do percentual de enxofre presente no material. O resultado do percentual de manganês presente no ferro está ligado diretamente a divisão de classe que esse elemento pode receber quando analisado nas sucatas utilizadas, algumas sucatas podem ser divididas em 2 níveis, as que apresentem alto e baixo percentual de manganês. Esse elemento é encarregado de fornecer propriedades com maior resistência mecânica e dureza ao ferro fundido processado.

A composição química presente no ferro fundido é de grande importância para a qualidade do produto. Comentado sobre alguns elementos avaliados no processo é importante salientar que para manter o processo alinhado e sem falhas, todos elementos devem ser controlados de maneira segura durante o processamento do material. Na Tabela 1 é possível verificar as faixas ideais de trabalho tanto para o ferro base quanto para o ferro processado, assim como os limites aceitos pela empresa para cada elemento químico em sua devida classificação interna.

Tabela 1: Especificações dos elementos para ferro base e ferro processado.

| FERRO FUNDIDO NODULAR – BASE (FORNO) |      |         |      |       |        |
|--------------------------------------|------|---------|------|-------|--------|
|                                      | %C   | %Si (2) | %Mn  | %P    | %S (1) |
| Min                                  | 3,65 | 1,20    | 0,25 | 0,010 | 0,008  |
| Visar                                | 3,70 | 1,40    | 0,30 | 0,010 | 0,010  |
|                                      | 3,80 | 1,50    | 0,50 | 0,030 | 0,015  |
| Máx                                  | 3,85 | 1,70    | 0,65 | 0,050 | 0,020  |

| FERRO FUNDIDO NODULAR – FERRO PROCESSADO (PEÇA) |       |      |      |      |       |       |       |      |         |
|-------------------------------------------------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|------|---------|
| Especificado                                    |       | %C   | %Si  | %Mn  | %P    | %S    | %Mg   | %Cu  | %Sn (4) |
| GGG 40                                          | Min   | 3,40 | 2,00 | 0,25 | 0,010 | 0,008 | 0,020 | 0,01 | 0,001   |
|                                                 | Visar | 3,45 | 2,20 | 0,30 | 0,010 | 0,010 | 0,025 |      |         |
|                                                 |       | 3,65 | 2,80 | 0,50 | 0,030 | 0,015 | 0,055 |      | 0,015   |
|                                                 | Máx   | 3,70 | 3,00 | 0,65 | 0,050 | 0,020 | 0,060 | 0,15 | 0,020   |
| GGG 50                                          | Min   | 3,40 | 2,00 | 0,25 | 0,010 | 0,008 | 0,020 | 0,15 | 0,015   |
|                                                 | Visar | 3,45 | 2,20 | 0,30 | 0,010 | 0,010 | 0,025 | 0,20 | 0,018   |
|                                                 |       | 3,65 | 2,80 | 0,50 | 0,030 | 0,015 | 0,055 | 0,25 | 0,023   |
|                                                 | Máx   | 3,70 | 3,00 | 0,65 | 0,050 | 0,020 | 0,060 | 0,30 | 0,030   |
| GGG 55                                          | Min   | 3,40 | 2,00 | 0,25 | 0,010 | 0,008 | 0,020 | 0,25 | 0,030   |
|                                                 | Visar | 3,45 | 2,20 | 0,30 | 0,010 | 0,010 | 0,025 | 0,30 | 0,033   |
|                                                 |       | 3,65 | 2,80 | 0,50 | 0,030 | 0,015 | 0,055 | 0,35 | 0,038   |
|                                                 | Máx   | 3,70 | 3,00 | 0,65 | 0,050 | 0,020 | 0,060 | 0,40 | 0,045   |
| GGG 60                                          | Min   | 3,40 | 2,00 | 0,25 | 0,010 | 0,008 | 0,020 | 0,45 | 0,045   |
|                                                 | Visar | 3,45 | 2,20 | 0,30 | 0,010 | 0,010 | 0,025 | 0,50 | 0,050   |
|                                                 |       | 3,65 | 2,80 | 0,50 | 0,030 | 0,015 | 0,055 | 0,55 | 0,055   |
|                                                 | Máx   | 3,70 | 3,00 | 0,65 | 0,050 | 0,020 | 0,060 | 0,60 | 0,060   |
| GGG 70                                          | Min   | 3,40 | 2,00 | 0,25 | 0,010 | 0,008 | 0,020 | 0,70 | 0,070   |
|                                                 | Visar | 3,45 | 2,20 | 0,30 | 0,010 | 0,010 | 0,025 | 0,75 | 0,075   |
|                                                 |       | 3,65 | 2,80 | 0,50 | 0,030 | 0,015 | 0,055 | 0,80 | 0,080   |
|                                                 | Máx   | 3,70 | 3,00 | 0,65 | 0,050 | 0,020 | 0,060 | 0,85 | 0,085   |
| GGG 80<br>(5)                                   | Min   | 3,40 | 2,00 | 0,25 | 0,010 | 0,008 | 0,020 | 0,45 | 0,070   |
|                                                 | Visar | 3,45 | 2,20 | 0,30 | 0,010 | 0,010 | 0,025 | 0,50 | 0,075   |
|                                                 |       | 3,65 | 2,80 | 0,50 | 0,030 | 0,015 | 0,055 | 0,60 | 0,080   |
|                                                 | Máx   | 3,70 | 3,00 | 0,65 | 0,050 | 0,020 | 0,060 | 0,65 | 0,085   |

Fonte: Autor, 2020.

Normalmente as empresas fazem o uso de equipamentos de espectrometria ótica como na Figura 20, para leitura do percentual presente de cada composto no material.

Figura 20: Espectrômetro



Fonte: AGNOLETTI, 2016.

Essa amostra possui aproximadamente 30mm de diâmetro e 5mm de espessura conforme as normas citadas acima. Com a amostra resfriada é necessário que ela seja lixada deixando a superfície lisa para análise no equipamento.

## 8.2 Análise metalográfica

Esse é considerado um ensaio onde é possível observar a verdadeira relação entre a microestrutura do material e suas propriedades químicas e físicas, assim como a diferença entre as ligas internas de cada empresa. Junto com o vazamento das peças no molde, é retirado amostras por cada panela vazada, em torno de 6 a 8 amostras para ensaio metalográfico.

Para leitura da microestrutura do material a amostra é submetida ao microscópio, nele é projetado a estrutura com aumento de 100x, observa-se o grau de nodularização do tipo de material fundido, forma, quantidade e a matriz (ferrítica, perlítica). Com auxílio do software Digimess é realizada a leitura por imagem da microestrutura do material.

### 8.3 Efeitos do magnésio na microestrutura do ferro fundido

Nessa seção serão abordados alguns fenômenos responsáveis por alterações a nível microestrutural após o processo de nodularização, normalmente ocasionadas por degradação das propriedades mecânicas do material.

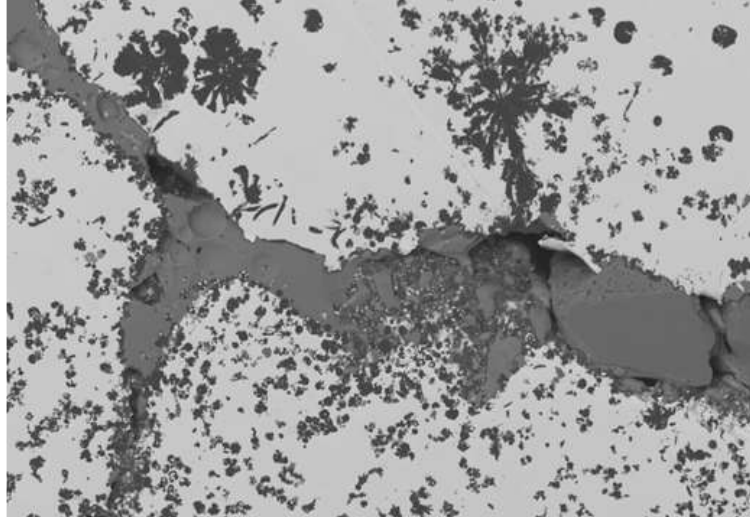
A degeneração das grafitas em forma de nódulos normalmente são provocadas pela diminuição da densidade dos nódulos ou perda de magnésio por vaporização. Durante o processo de nodularização, ocorre a formação das grafitas, conforme estudo realizado por Ribeiro (1990) o diâmetro dos nódulos aumenta ao longo do vazamento do metal até que comecem a manter-se constantes durante a solidificação. A densidade de nódulos por mm<sup>2</sup> e o teor de perlita presente na microestrutura também seguem aumentando até o comportamento ideal da liga. Porém com o decorrer do tempo de nodularização as grafitas apresentam uma tendência de afastamento entre si, ocasionando a diminuição do tamanho da grafita. Quando a temperatura do banho começa a diminuir a capacidade de dissolução das partículas de liga também diminuem ocasionando a perda de eficiência do grau de inoculação das grafitas. No experimento realizado acompanhou-se zonas deficientes no momento da homogeneização seguidas de inclusões no metal quando vazado abaixo dos 1350°C.

Entre todos fatores responsáveis pela perda de magnésio e problemas relacionados a ele na microestrutura, o que apresenta maior relevância é o percentual de enxofre presente no banho. Como já mencionado a reação que dá como produto o sulfato de magnésio é continua ao longo do processo e favorece a perda do percentual de magnésio. Existe a tentação para fabricar ferro fundido nodular com ausência de enxofre no banho, porém não há provas de que seja eficaz, com a falta de enxofre no banho, existe a possibilidade da formação de carbonetos no material, ocasionando problemas na microestrutura da peça.

Para complementar os problemas que podem ocorrer na microestrutura do material conforme adição de ligas de magnésio, ainda pode-se observar as inclusões de escórias provenientes da reação das ligas com o metal líquido. Normalmente as inclusões são encontradas na superfície da peça. Esse defeito frequentemente é gerado a partir do enchimento turbulento da panela onde contém o magnésio que aconteceu a reação de nodularização. Métodos de limpeza da panela após o processo de nodularização devem ser empregados para remoção total da escória antes do vazamento, para que esses sólidos não cheguem até o molde da peça e se

solidifique junto a ela. Na figura 21 pode-se observar o defeito de escória em uma análise da microestrutura do material via microscópio com lente de aumento 100x (ELKEM, TECHNICAL INFORMATION 32, 2010).

Figura 21: Microestrutura representando defeito de escória-drosses



Fonte: Elkem, Technical Information 32, 2002.

#### 8.4 Escolha da liga ideal para tratamento

Conforme o desenvolvimento desse trabalho, percebe-se a grande variedade de elementos que influenciam no tratamento de nodularização, assim como existem muitas variáveis que afetam o processo metalúrgico.

Para escolha da liga ideal é necessário que o fundidor examine as possíveis condições de operação dos funcionários e da empresa. As ligas podem variar entre as mais reativas e mais leves, normalmente o causador disso é o percentual de magnésio presente na formulação. Atualmente existe diversos fornecedores dessa matéria prima.

Na tabela 2 está destacado algumas variedades para uso no processo de nodularização. Cada material apresentado apresenta um percentual diferente de cada elemento, assim o metalurgista define qual utilizara no processo conforme o sistema que ele possui e os métodos que o permitem para fabricação.

Tabela 2: Variedades de liga de magnésio

|    | %Si     | %Mg          | %Ca         | %TR            | %Al         |
|----|---------|--------------|-------------|----------------|-------------|
| 1  | 44 - 48 | 5,00 - 6,00  | 1,80 - 2,30 | 5,50 - 6,65    | 1,0 max     |
| 2  | 44 - 48 | 4,60 - 5,15  | 0,75 - 1,25 | 1,05 - 1,35    | 0,75 - 0,95 |
| 3  | 44 - 48 | 5,20 - 5,80  | 1,40 - 1,80 | 0,70 - 1,00    | 0,40 - 1,00 |
| 4  | 44 - 48 | 4,80 - 5,80  | 0,80 - 1,30 | 0,60 - 1,20    | 1,00 max    |
| 5  | 44 - 48 | 5,55 - 6,15  | 0,80 - 1,20 | 0,85 - 1,15    | 1,00 max    |
| 6  | 44 - 48 | 5,57 - 6,20  | 2,90 - 3,30 | 0,85 - 1,15    | 1,00 max    |
| 7  | 44 - 48 | 5,60 - 6,20  | 1,75 - 2,25 | 0,10 max       | 0,50 - 1,00 |
| 8  | 44 - 48 | 5,50 - 6,30  | 0,80 - 1,20 | 1,70 - 2,10    | 1,25 max    |
| 9  | 44 - 48 | 5,70 - 6,30  | 0,50 - 1,00 | 0,40 - 0,60    | 1,00 max    |
| 10 | 44 - 48 | 5,70 - 6,30  | 0,30 - 0,50 | 0,10 - max     | 0,70 max    |
| 11 | 44 - 48 | 5,58 - 6,20  | 1,50 - 2,00 | 0,85 - 1,15    | 0,40 - 1,00 |
| 12 | 44 - 48 | 6,00 - 6,50  | 0,80 - 1,20 | 0,90 - 1,30    | 0,70 - 1,00 |
| 13 | 44 - 48 | 6,20 - 6,80  | 1,55 - 1,95 | 0,10 max       | 0,50 - 1,00 |
| 14 | 44 - 48 | 6,80 - 7,20  | 0,80 - 1,00 | 0,10 max       | 0,80 max    |
| 15 | 44 - 48 | 7,00 - 7,50  | 2,30 - 2,70 | 2,35 - 2,65    | 0,80 max    |
| 16 | 44 - 48 | 7,70 - 8,30  | 2,50 - 3,00 | 2,75 - 3,25    | 1,00 max    |
| 17 | 44 - 48 | 8,70 - 9,30  | 2,75 - 3,25 | 0,85 - 1,15    | 1,00 max    |
| 18 | 44 - 48 | 9,00 - 10,00 | 0,80 - 1,20 | 0,80 - 1,20    | 0,40 - 1,00 |
| 19 | 44 - 48 | 5,00 - 6,00  | 0,40 - 0,60 | 0,25 - 0,40 La | 0,80 - 1,20 |
| 20 | 44 - 48 | 5,50 - 6,15  | 0,80 - 1,20 | 0,35 - 0,65 La | 1,00 max    |
| 21 | 44 - 48 | 5,60 - 6,20  | 2,70 - 3,50 | 0,40 - 0,60 La | 0,80 max    |
| 22 | 44 - 48 | 5,75 - 6,25  | 0,90 - 1,30 | 0,40 - 0,60 La | 0,50 - 1,25 |
| 23 | 44 - 48 | 8,70 - 9,30  | 2,80 - 3,30 | 0,40 - 0,60 La | 0,40 - 0,10 |
| 24 | 44 - 48 | 2,85 - 3,40  | 0,20 - 0,50 | 1,95 - 2,25    | 1,00 max    |

Fonte: Próprio Autor, 2020.

A pesquisa por ligas contendo magnésio ainda é muito explorada pelos cientistas e pesquisadores da área, existem empresas especializadas em produzir produtos com alta qualidade e para conquistar o mercado de matéria prima das fundições. No exemplo acima percebe-se a distribuição de 24 diferentes produtos para utilização, cada qual com sua importância definida nos percentuais dos elementos. A divisão da tabela consiste na variação do percentual de silício, magnésio, cálcio, terras raras e alumínio.

Os produtos 14, 17, e 18 foram utilizados durante o desenvolvimento desse projeto em diversas etapas da produção. Os itens 14 e 15 são definidos como ligas com baixo percentual de magnésio, nomeadas no mercado como liga 4, diferentemente dos itens 17 e 18 que apresentam percentual de magnésio mais elevado, encontradas no mercado como liga 1.

### 8.5 Cálculos para adição da liga e rendimento final

Para avaliar o rendimento final do magnésio no ferro líquido é necessário utilizar algumas técnicas de cálculo referente aos percentuais encontrados, assim como a quantidade de matéria prima a ser colocada para reagir com o ferro fundido.

O cálculo de rendimento do magnésio é um dos parâmetros mais importantes para avaliação da eficiência do processo de nodularização com a liga utilizada. Esse valor é calculado a partir da relação expressa em porcentagem e entre o teor residual de magnésio efetivamente usado no tratamento (%Mg.efet) e o teor adicionado ao banho no ferro fundido (%Mg.adic), seguindo a Equação (1).

$$\eta = \frac{\%Mg.efet}{\%Mg.adic} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Para reduzir o fator do erro é necessário que seja considerado o teor de magnésio efetivamente adicionado como a diferença entre o teor adicionado e o teor perdido na vaporização do sistema.

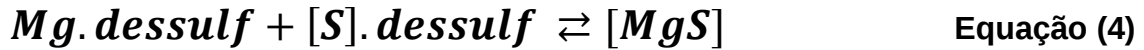
Realizando um simples balanço de massa, o teor de magnésio efetivamente usado no processo deve ser expresso pela soma dos teores de magnésio residual, de magnésio consumido pela dessulfurização e também na desoxidação do tratamento do ferro fundido, considerando que os teores de oxigênio dissolvidos no ferro são baixos de maneira a serem desprezíveis, a Equação (2) representa o balanço de massa ideal.

$$\%Mg.efet = \%Mg.resid + \%Mg.dessulf \quad \text{Equação (1)}$$

Com isso realiza-se a substituição da equação (2) na equação (1) e obtém-se o resultado conforme Equação (3).

$$\eta = \frac{\%Mg.resid + \%Mg.dessulf}{\%Mg.adic} \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Recordando que a reação de dessulfurização pelo magnésio no ferro fundido pode ser representada pela Equação 4.



Admitindo  $[S].dessulf$  como teor de enxofre dissolvido no banho e consumido na dessulfurização pelo magnésio ( $Mg.dessulf$ ) para formação do  $MgS$  que tende a se incorporar nos resíduos de escória ao final do tratamento.

Além do balanço de massa necessário, também precisa realizar a estequiometria da reação para os compostos, resultando na Equação (5).

$$\frac{\%Mg.dessulf}{PA(Mg)} = \frac{\%S.dessulf}{PA(S)} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde  $PA(Mg) = 24,31 \text{ g/atg}$  e  $PA(S) = 32,06 \text{ g/atg}$  são caracterizados pelos pesos atômicos de magnésio e enxofre respectivamente. Substituindo os valores na equação (5), obtemos a igualdade:

$$\%Mg.dessulf = 0,76\%S.dessulf$$

Sabe-se que o valor de enxofre consumido na reação de dessulfurização é igual a diferença entre as porcentagens de enxofre no ferro fundido inicial ( $\%S.base$ ) e no ferro fundido final ( $\%S.processado$ ). Assumindo esses valores na Equação (5) obtém-se:

$$\%Mg.dessulf = 0,76 \times (\%S.base - \%S.processado) \quad \text{Equação (6)}$$

Por fim, substitui-se o  $\%Mg.dessulf$  da Equação (6) na Equação (3), resultando a Equação (7).

$$\eta Mg = \frac{\%Mg.resid + 0,76(\%S.base - \%S.processado)}{\%Mg.adic} \quad \text{Equação (7)}$$

A Equação (7) é a mais utilizada para cálculos de rendimento do magnésio nos processos metalúrgicos, tanto para ligas contendo magnésio quanto para técnicas com magnésio puro. Normalmente as empresas metalúrgicas trabalham com teores de enxofre no ferro base mais baixo possível, com isso a diferença entre %S<sub>base</sub> e %S<sub>processado</sub> tende a zero, otimizando a Equação (7) para a Equação (8), obtem-se:

$$\eta_{\text{Mg}} = \frac{\% \text{Mg.resid}}{\% \text{Mg.adic}} \times 100 \quad \text{Equação (8)}$$

Os cálculos de rendimento de magnésio realizado nesse projeto basearam-se somente na Equação (8) final, devido ao baixo percentual de enxofre presente no ferro base, menor que 0,010%.

A receita mais encontrada na literatura para tratamento com a técnica *sanduche* é que se utilize cerca de 1,4% de liga 4 no processo, projetando esse valor para uma panela de reação com capacidade de 500 kg, a quantidade utilizada de matéria prima para nodularização era de 7 kg por panela.

Com a ideia de otimizar esse processo em relação aos custos e as técnicas estudadas, realizou-se experimentos adicionando 1,3% e 1,0% de liga no ferro fundido, projetando esses valores em peso para 6,5 kg e 5 kg por panela respectivamente.

Os testes foram realizados em painéis de reação com capacidade para 500kg de ferro líquido, após a reação ocorrer com a técnica *sanduche* nessa panela, dividiu-se os 500 kg em duas painéis de 250 kg para vazamento em série conforme fluxo da empresa.

## 9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho foi baseado na realização de reações de nodularização com diferentes modelos de ligas, entre as ligas classificadas como 1 e 4 quanto ao percentual de magnésio presente, em dois tipos internos de material, GGG40 e GGG50. A técnica em que o processo de tratamento do ferro nodular foi desenvolvido chama-se *sanduíche*, como explicado nos itens anteriores.

As ligas utilizadas para os experimentos foram classificadas entre as ligas (X), (Y) e (Z) de diferentes fornecedores. Conhecida pelos metalurgistas como liga 4 e liga 1 a matéria prima (X) e (Y) respectivamente, foram empregadas no primeiro teste experimental conforme tabela 2.

Liga 4 = (X)

Liga 1 = (Y)

### 9.1 Teste 01)

O primeiro experimento baseou-se na comparação entre as qualidades que a liga 4 e liga 1 poderiam proporcionar em um material classificado como GGG50 internamente conforme composições da Tabela 3.

A quantidade de material tratado foi de 500 Kg em uma panela de reação identificada como C, utilizando a técnica de tratamento *sanduíche*. A temperatura inicial do ferro líquido era de aproximadamente 1484°C, foi inoculado 1,3% da liga (X) considerando 6,5 kg em peso.

Logo após o tratamento da panela de reação C, foi realizada o mesmo processo com a utilização da liga (Y) na panela de reação identificada como D, porém os valores adicionados de liga foram inferiores ao anterior, devido ao maior percentual de magnésio presente na liga (Y). Nesse caso inoculou-se 1,1% de liga (Y) com a compensação de 0,6 kg de ferro silício, devido ao menor percentual de silício também apresentado por essa liga.

Os experimentos foram realizados de maneira continua para manter as características idênticas em todos as amostras e eliminar qualquer tipo de variação que poderia vir acontecer.

Foram retiradas 2 amostras de cada panela para realização das análises metalográficas no laboratório de controle de qualidade conforme Figura 22.

Com os resultados obtidos das análises metalograficas do teste 01, entende-se que a liga (Y) forneceu uma maior nodularização de área, porem uma quantidade

inferior de nódulos totais contados e nódulos por mm<sup>2</sup> na amostra. Compreende-se que a liga (X) apresentou maior quantidade nódulos, porém com menor área de nodularização, lembrando que foi utilizado menor quantidade de liga (Y) em comparação com a liga (X). Portanto define-se que a qualidade do material se manteve em todas amostras, mesmo com menor utilização de matéria prima. Esses resultados podem ser encontrados na Tabela 4.

Além as análises metalograficas, foram realizadas análises de composição química pelo equipamento espectrômetro para verificação do percentual dos elementos presente tanto no ferro base quanto no ferro processado, os resultados podem ser observados na Tabela 5, assim como os ensaios de dureza podem ser observados na Tabela 6. As amostras foram retiradas no ultimo molde vazada possibilitando prever a eficácia do tempo de *fading*. Os valores encontrados apresentam-se dentro das especificações mínimas, com atenção especial ao percentual do elemento magnésio nas amostras do ferro processado, o valor encontrado foi dentro do permitido mesmo com a menor utilização de liga.

Com isso o primeiro teste realizado mostrou eficaz a substituição da liga (X) pela liga (Y) com alteração na quantidade adicionada e dados experimentais dentro dos padrões.

## 9.2 Teste 02)

O segundo experimento baseou-se na comparação entre as qualidades que a liga 4 e liga 1 poderiam proporcionar em um material classificado como GGG40 internamente.

A quantidade de material tratada foi a mesma que no primeiro teste, em placas identificadas como C e D. A temperatura inicial do ferro líquido era de aproximadamente 1486°C, foi inoculado 1,3% da liga (X) considerando 6,5 kg em peso.

Nesse experimento foi realizado adição de 1,0% de liga (Y) com a compensação de 1,0 kg de ferro silício, para comparação entre as ligas (X) e (Y).

No teste 2 também foram retiradas 2 amostras após o processo de solidificação para análise metalográfica conforme Figura 22.

Com os resultados obtidos das amostras do teste 02, comparando a primeira amostra com liga (X) e primeira amostra com liga (Y) percebe-se que com a liga (X) a microestrutura apresentou maior percentual de nodularização de área e também maior

percentual de nodularização por contagem. Porém as quantidades de nódulos com a liga (Y) foram superiores do que as amostras contendo liga (X). Entende-se que utilizando menos quantidade de liga do que no teste 01, a microestrutura no teste 02 apresentou detalhes inferiores, mas ainda com condições para trabalho no labo industrial. Com a utilização de 1,0% da liga (Y) a microestrutura formou mais nódulos em toda amostra, não apresentou traços do principal defeito que poderia ser encontrado, como o vermicular, por falta de magnésio presente no metal, resultados dos ensaios podem ser visualizados na Tabela 4.

As análises de composição química podem ser observadas na Tabela 5. Assim como o resultado do ensaio de dureza pode ser observado na Tabela 6.

Após análise dos resultados o segundo teste realizado mostrou eficaz a substituição da liga (X) pela liga (Y) com alteração na quantidade adicionada e dados experimentais dentro dos padrões.

### 9.3 Teste 03)

O terceiro experimento baseou-se na comparação entre as qualidades que a liga 4 e liga 1 poderiam proporcionar em um material classificado como GGG40 internamente.

A quantidade de material tratado foi a mesma que nos testes anteriores. A temperatura inicial do ferro líquido era de aproximadamente 1492°C, foi inoculado 1,3% da liga (X) considerando 6,5 kg em peso.

Nesse experimento inoculou-se um percentual menor que no primeiro e segundo teste, 0,96% de liga (Y) com a compensação de 1,2 kg de ferro silício.

Observa-se na Tabela 4 os resultados obtidos, percebe-se que o percentual de área nodularizada ainda se manteve maior com o uso da liga (X), mesmo diminuindo ainda mais a quantidade de liga adicionada os valores se mostraram muito próximos com a liga (Y). Considerando que o número de nódulos contados e a quantidade de nódulos por mm<sup>2</sup> foram menores que nos testes 01 e 02, começaram a surgir alguns traços do defeito de vermicular, pelos experimentos terem sido realizados com a técnica *sanduíche* esses valores ainda são considerados satisfeitos em experimentos industriais.

A microestrutura está representada na Figura 22 para as amostras retiradas do teste 3, assim como a composição química está representada na Tabela 5.

Para liberação do ferro base nesse experimento foi necessário realizar a correção do forno contendo material líquido, percebe-se que na primeira análise do forno o percentual de silício estava abaixo de 1,20, valor que poderia interferir durante o procedimento, para isso foi feita a correção do ferro base com adição de silício no forno para que o percentual fosse superior, com a correção realizada o valor do silício para vazamento no ferro base foi de 1,37%.

Após a solidificação do material foi realizado ensaio de dureza, resultados podem ser encontrados na Tabela 6.

Com isso o terceiro teste realizado ainda assim mostrou eficaz a substituição da liga (X) pela liga (Y) com alteração na quantidade adicionada fornecendo os dados experimentais dentro das especificações.

#### **9.4 Teste 04)**

O quarto experimento baseou-se na comparação entre as qualidades que a liga 4 e liga 1 poderiam proporcionar em um material classificado como GGG40 e GGG50 internamente.

Foi tratado a mesma quantidade de material que nos testes anteriores. A temperatura inicial do ferro líquido era de aproximadamente 1480°C, foi inoculado 1,3% da liga (X) considerando 6,5 kg em peso.

Até o momento os testes eram realizados um de cada vez, comparando apenas a diferença entre duas panelas, uma em sequência da outra. Porém o teste 04 teve mais foco no processo industrial, verificando como a liga (Y) se comportaria no tempo que a indústria necessita e com as diferentes classificações de materiais internos, ou seja, seguindo as corridas uma a uma sem paradas. Portanto após a inoculação da panela D, foi realizado o mesmo método para as panelas E e F. Com adição de 1,0% de liga (Y) considerando em peso 5,0kg e adição de 1,0 kg de ferro silício para compensação do elemento no ferro processado.

As amostras retiradas para análise metalográfica podem ser observadas na Figura 22, assim como os ensaios de dureza podem ser constatados na Tabela 6.

Com os resultados obtidos na Tabela 4 pelas amostras do teste 04, percebe-se que os valores de área nodularizada entre a liga (X) e (Y) mostraram-se muito parecidos, isso é avaliado positivamente para um processo sequencial onde ocorreu o vazamento de 3 panelas seguidas com uma liga diferente e em menor quantidade. Os valores encontrados das 6 amostras para contagem de nódulos totais e nódulos

por mm<sup>2</sup> da liga (Y) foram inferiores aos valores encontrados com a utilização da liga (X), situação que já se repetiu nos testes anteriores, onde a quantidade de nódulos é menor, porém não é encontrado nenhum rastro do defeito que poderia intervir nas propriedades mecânicas do mesmo.

Na Tabela 5 está representado os percentuais dos elementos analisados do teste 04.

O quarto teste realizado mostrou eficaz a substituição da liga (X) pela liga (Y) com alteração na quantidade adicionada fornecendo os dados experimentais dentro das especificações em um processo similar ao dia-dia da empresa.

Tabela 3: Percentual dos elementos presentes nas ligas X e Y.

| Elementos presentes nas ligas X e Y |      |       |      |       |      |
|-------------------------------------|------|-------|------|-------|------|
|                                     | Mg   | Si    | Ca   | Al    | TR   |
| Liga X                              | 6,73 | 45,78 | 1,33 | 0,550 | 0,90 |
| Liga Y                              | 9,81 | 44,88 | 1,14 | 0,715 | 1,03 |

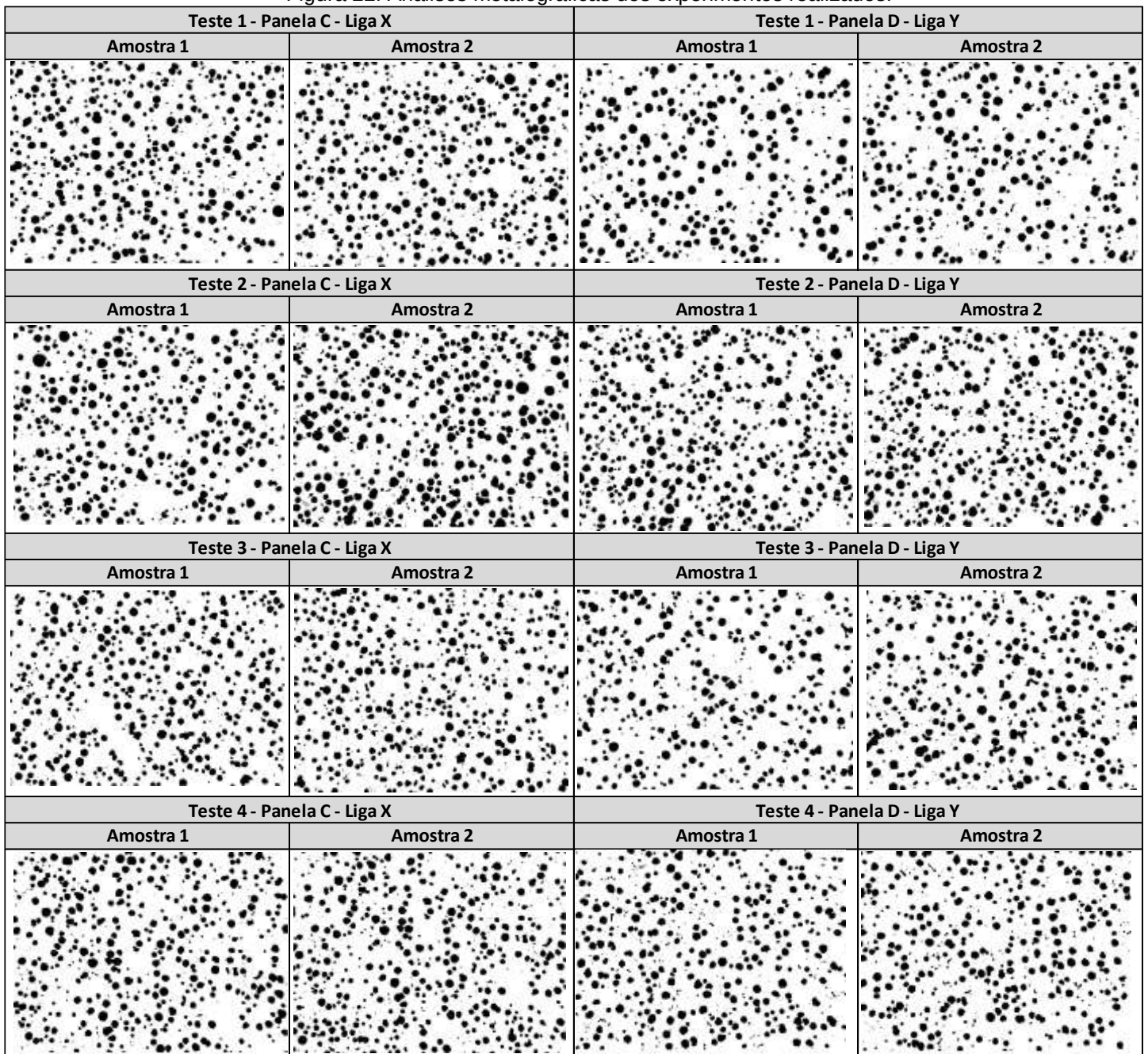
Fonte: Autor, 2020.

Tabela 4: Resultados encontrados nas análises metalográficas

| Teste/Amostra    | Liga | Nodularização de Área (%) | Nodularização de Contagem (%) | Total de nódulos contados | Nódulos por mm <sup>2</sup> |
|------------------|------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1/1 <sup>a</sup> | X    | 97                        | 98                            | 312                       | 263                         |
| 1/2 <sup>a</sup> |      | 96                        | 97                            | 326                       | 275                         |
| 1/1 <sup>a</sup> | Y    | 98                        | 98                            | 237                       | 200                         |
| 1/2 <sup>a</sup> |      | 98                        | 97                            | 232                       | 196                         |
| 2/1 <sup>a</sup> | X    | 98                        | 98                            | 302                       | 255                         |
| 2/2 <sup>a</sup> |      | 95                        | 94                            | 305                       | 257                         |
| 2/1 <sup>a</sup> | Y    | 92                        | 95                            | 330                       | 278                         |
| 2/2 <sup>a</sup> |      | 91                        | 94                            | 314                       | 265                         |
| 3/1 <sup>a</sup> | X    | 94                        | 94                            | 308                       | 260                         |
| 3/2 <sup>a</sup> |      | 93                        | 96                            | 319                       | 269                         |
| 3/1 <sup>a</sup> | Y    | 93                        | 95                            | 244                       | 206                         |
| 3/2 <sup>a</sup> |      | 92                        | 96                            | 254                       | 214                         |
| 4/1 <sup>a</sup> | X    | 94                        | 96                            | 307                       | 259                         |
| 4/2 <sup>a</sup> |      | 93                        | 96                            | 309                       | 261                         |
| 4/1 <sup>a</sup> | Y    | 95                        | 96                            | 269                       | 227                         |
| 4/2 <sup>a</sup> |      | 96                        | 95                            | 266                       | 224                         |
| 4/3 <sup>a</sup> |      | 95                        | 97                            | 242                       | 204                         |
| 4/5 <sup>a</sup> |      | 95                        | 97                            | 254                       | 214                         |
| 4/6 <sup>a</sup> |      | 93                        | 96                            | 268                       | 226                         |
| 4/7 <sup>a</sup> |      | 86                        | 92                            | 280                       | 236                         |

Fonte: Autor, 2020.

Figura 22: Análises metalográficas dos experimentos realizados.



Fonte: Autor, 2020.

Tabela 5: Composição química dos testes realizados.

| Teste 1 |        |        |        | Teste 2 |        |        | Teste 3 |        |          |        | Teste 4 |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|----------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| GGG50   | PC-X   | PD-Y   | GGG40  | PC-X    | PD-Y   | GGG40  | PC-X    | PD-Y   | GGG40/50 | PC-X   | PE-Y    | PF-Y   | PG-Y   |        |        |
| C       | 3,82   | 3,68   | 3,66   | 3,82    | 3,61   | 3,67   | 3,8     | 3,83   | 3,57     | 3,54   | 3,84    | 3,6    | 3,55   | 3,57   | 3,6    |
| Si      | 1,44   | 2,3    | 2,27   | 1,24    | 2,34   | 2,37   | 1,17    | 1,37   | 2,5      | 2,33   | 1,2     | 2,43   | 2,4    | 2,37   | 2,43   |
| Mn      | 0,435  | 0,428  | 0,433  | 0,462   | 0,446  | 0,449  | 0,434   | 0,428  | 0,421    | 0,408  | 0,441   | 0,432  | 0,436  | 0,437  | 0,432  |
| P       | 0,016  | 0,016  | 0,017  | 0,018   | 0,019  | 0,019  | 0,017   | 0,017  | 0,017    | 0,015  | 0,016   | 0,016  | 0,016  | 0,015  | 0,016  |
| S       | 0,018  | 0,008  | 0,0097 | 0,016   | 0,012  | 0,011  | 0,019   | 0,018  | 0,011    | 0,014  | 0,013   | 0,008  | 0,007  | 0,0093 | 0,0082 |
| Cr      | 0,036  | 0,035  | 0,036  | 0,058   | 0,055  | 0,056  | 0,064   | 0,062  | 0,059    | 0,06   | 0,034   | 0,034  | 0,034  | 0,035  | 0,034  |
| Ni      | 0,013  | 0,012  | 0,013  | 0,02    | 0,02   | 0,021  | 0,016   | 0,016  | 0,015    | 0,019  | 0,013   | 0,014  | 0,013  | 0,014  | 0,014  |
| Mo      | 0,002  | 0,002  | 0,002  | 0,002   | 0,002  | 0,002  | 0,002   | 0,002  | 0,002    | 0,002  | 0,002   | 0,002  | 0,002  | 0,002  | 0,002  |
| Al      | 0,001  | 0,009  | 0,011  | 0,0023  | 0,01   | 0,013  | 0,001   | 0,0022 | 0,012    | 0,0089 | 0,0051  | 0,013  | 0,013  | 0,014  | 0,013  |
| Cu      | 0,019  | 0,019  | 0,02   | 0,041   | 0,039  | 0,041  | 0,026   | 0,027  | 0,025    | 0,024  | 0,021   | 0,022  | 0,021  | 0,02   | 0,022  |
| Co      | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015  | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015  | 0,0015 | 0,0015   | 0,0015 | 0,0015  | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 |
| Ti      | 0,0053 | 0,0063 | 0,0073 | 0,0069  | 0,0077 | 0,0087 | 0,0072  | 0,0078 | 0,0087   | 0,0081 | 0,01    | 0,012  | 0,012  | 0,011  | 0,012  |
| Nb      | 0,0025 | 0,0025 | 0,0025 | 0,0025  | 0,0025 | 0,0025 | 0,0025  | 0,0025 | 0,0025   | 0,0025 | 0,0025  | 0,0025 | 0,0025 | 0,0025 | 0,0025 |
| V       | 0,0038 | 0,0038 | 0,0043 | 0,005   | 0,0044 | 0,005  | 0,0039  | 0,004  | 0,0042   | 0,0036 | 0,0039  | 0,0041 | 0,004  | 0,0042 | 0,0036 |
| W       | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01    | 0,01   | 0,01   | 0,01    | 0,01   | 0,01     | 0,01   | 0,01    | 0,01   | 0,01   | 0,01   | 0,01   |
| Pb      | 0,0012 | 0,0015 | 0,0011 | 0,001   | 0,001  | 0,001  | 0,001   | 0,001  | 0,001    | 0,001  | 0,001   | 0,0011 | 0,001  | 0,001  | 0,001  |
| Mg      | 0,001  | 0,042  | 0,053  | 0,001   | 0,036  | 0,043  | 0,001   | 0,001  | 0,037    | 0,029  | 0,001   | 0,049  | 0,052  | 0,49   | 0,038  |
| B       | 0,0005 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0005  | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005  | 0,0005 | 0,0005   | 0,0005 | 0,0005  | 0,0006 | 0,0005 | 0,0005 | 0,0005 |
| Sn      | 0,01   | 0,021  | 0,021  | 0,011   | 0,013  | 0,013  | 0,0093  | 0,011  | 0,011    | 0,0095 | 0,0083  | 0,0092 | 0,0094 | 0,02   | 0,0092 |
| Zn      | 0,032  | 0,032  | 0,032  | 0,032   | 0,032  | 0,032  | 0,032   | 0,032  | 0,032    | 0,032  | 0,032   | 0,032  | 0,032  | 0,032  | 0,032  |
| As      | 0,0088 | 0,0086 | 0,0088 | 0,0098  | 0,0094 | 0,0092 | 0,0087  | 0,0091 | 0,0086   | 0,0083 | 0,009   | 0,0088 | 0,0091 | 0,0083 | 0,0088 |
| Bi      | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015  | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015  | 0,0015 | 0,0015   | 0,0015 | 0,0015  | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 |
| Ce      | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,003   | 0,003  | 0,003  | 0,003   | 0,003  | 0,003    | 0,003  | 0,003   | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,003  |
| Zr      | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 | 0,0018  | 0,015  | 0,018  | 0,0015  | 0,0015 | 0,0015   | 0,0015 | 0,0015  | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 | 0,0015 |
| La      | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001   | 0,001  | 0,001  | 0,001   | 0,001  | 0,001    | 0,001  | 0,001   | 0,0017 | 0,001  | 0,001  | 0,001  |
| Te      | 0,002  | 0,002  | 0,002  | 0,002   | 0,002  | 0,002  | 0,002   | 0,002  | 0,002    | 0,002  | 0,002   | 0,002  | 0,002  | 0,002  | 0,002  |
| Sb      | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,003   | 0,003  | 0,003  | 0,003   | 0,003  | 0,003    | 0,003  | 0,003   | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,003  |
| Fe      | 94,1   | 93,3   | 93,4   | 94,2    | 93,3   | 93,2   | 94,3    | 94,1   | 93,2     | 93,5   | 94,3    | 93,3   | 93,4   | 93,4   | 93,3   |
| Ceq     | 4,31   | 4,46   | 4,42   | 4,24    | 4,4    | 4,47   | 4,2     | 4,29   | 4,41     | 4,32   | 4,24    | 4,42   | 4,35   | 4,37   | 4,42   |
| Sneq    | 0,012  | 0,023  | 0,023  | 0,015   | 0,017  | 0,017  | 0,012   | 0,013  | 0,013    | 0,012  | 0,01    | 0,011  | 0,011  | 0,022  | 0,011  |
| Treq    | 0      | 0,0005 | 0,0007 | 0,0003  | 0,0022 | 0,0034 | 0       | 0      | 0,0027   | 0      | 0       | 0,0027 | 0,0018 | 0,0003 | 0,0027 |

\*Siglas: GGG50/GGG40 – Ligas interna; PC-X - Panela C com liga X; PD-Y - Panela D com liga Y; PE/F/G-Y – Panela E, F, G com liga Y.

Tabela 6: Valores encontrados para ensaio de dureza.

| <b>Resultados de dureza encontrados nos testes realizados</b> |                     |                                            |                                            |
|---------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                               | <b>Especificado</b> | <b>Peças com a liga (X)<br/>Encontrado</b> | <b>Peças com a liga (Y)<br/>Encontrado</b> |
| <b>Teste 1</b>                                                | 173 HB A 255 HB     | 184 HB                                     | 182 HB                                     |
| <b>Teste 2</b>                                                | 135 HB A 185 HB     | 166 HB                                     | 166 HB                                     |
| <b>Teste 3</b>                                                | 135 HB A 185 HB     | 169 HB                                     | 163 HB                                     |
|                                                               |                     |                                            | 162 HB                                     |
| <b>Teste 4</b>                                                | 156 HB A 217 HB     | 169 HB                                     | 184 HB                                     |
|                                                               |                     |                                            | 165 HB                                     |

Fonte: Próprio Autor, 2020.

### 9.5 Teste 05 – Sistema Industrial

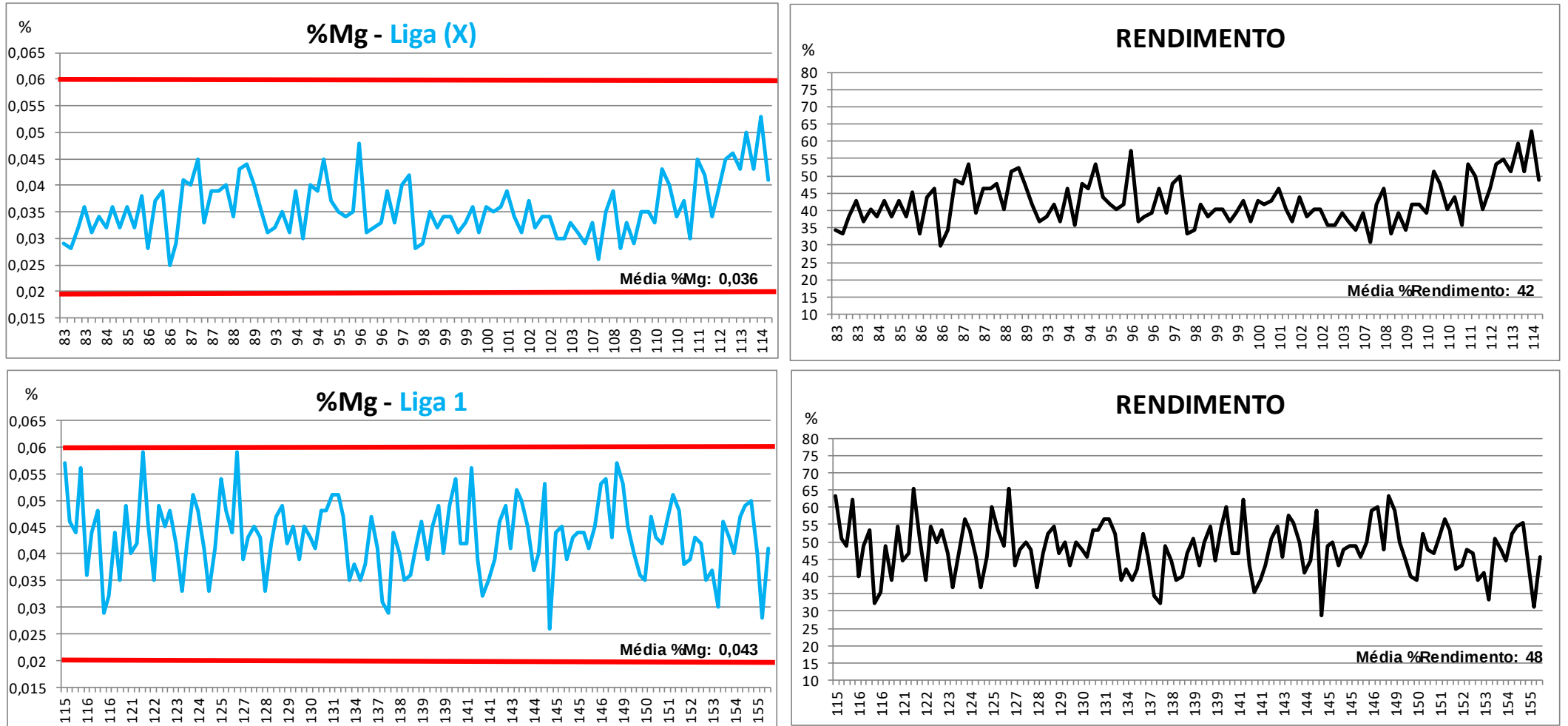
Esse experimento foi realizado para comparação do rendimento entre a liga (X) e a liga (Y). Com objetivo de determinar a eficiência do rendimento de cada liga, realizou-se o teste durante um dia inteiro de produção com o uso da mesma quantidade de cada matéria prima.

Utilizou-se 1.250 kg da liga (X) e da liga (Y), primeiramente foi trabalhado com toda liga (X) totalizando 26 corrias em sequência com um total de 101 análises de composição química realizadas. Após a utilização total da liga (X) foi realizado o mesmo procedimento com toda liga (Y) totalizando 32 corridas e 127 análises de composição química.

O fator que determinou a maior quantidade de corridas com a utilização da liga (Y) foi devido ao menor peso de adição durante o processo de nodularização, seguindo a receita de 1,3% (6,5 kg em peso) para uso da liga (X) e 1,0% (5,0 kg em peso) para liga (Y).

Observa-se na Figura 23 que todos resultados encontrados estiveram dentro da faixa especificada entre 0,020 e 0,060% de magnésio. O rendimento apresentado pela utilização da liga (X) foi inferior que o rendimento com liga (Y), além disso os resultados de encontrados com utilização da liga (Y) apresentam maior percentuais de magnésio no material, tudo isso foi causado devido a maior concentração de magnésio presente na matéria prima utilizada.

Figura 23: Gráficos do percentual e rendimento do magnésio



Fonte: Autor, 2020.

Como exemplo dos cálculos de rendimento, observa-se na equação (8) a resolução de uma amostra.

%Mg residual da amostra = 0,046

%Mg adicionado na reação = 0,09

Aplicando na equação (8), temos:

$$\eta Mg = \frac{0,046}{0,09} \times 100$$

$$\eta Mg = 51$$

## 9.6 Simulação da redução de custos

Entre todos fatores favoráveis que a liga (Y) forneceu nos experimentos realizados, o mais importante é a redução de custo ocasionado pela menor utilizada do produto.

Conforme já mencionado em outros tópicos, a liga (Y) possui percentual de mangésio mais elevado que a liga (X), esse fator é determinante para o cálculo de adição do nodularizante na reação. Seguindo a propriedades apresentadas metalográficas apresentadas durante os experimentos, definiu-se como 1,0% (5,0kg em peso) para o valor ideal de adição da liga (Y) no processo de nodularização, abaixo desse valor começam a aparecer sinais de defeitos indesejáveis.

Reduzir custos em processos industriais é significado de garantia para que a empresa tenha oportunidade de inovação em diversos processos e produtos, além de gerar maior competitividade entre seus concorrentes.

Para simulação de um cálculo com ganhos anuais, utilizou-se a quantidade total em toneladas de ferro produzidos no ano de 2019, com 9.184 toneladas produzidas. Multiplicando a quantidade total de ferro fundido no período do ano de 2019 pela diferença obtida entre os métodos testados nesse projeto, obteve-se uma economia de R\$ 149.525,52 no ano, conforme Tabela 7.



## **11 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:**

Efetuar experimentos com diferentes painéis de tratamento.

Realizar estudos mais aprofundados na influência de outros elementos durante o processo de nodularização.

Comparar outras diferentes classificações de ligas com diversos métodos de tratamento.

Elaborar análises aprofundadas sobre efeitos do silício no processo de nodularização em painéis abertas ou isoladas.

## 12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGNOLETTI, R. D. **Desenvolvimento de uma metodologia para determinação da nodularização em ferro fundido nodular na liga ggg 40 por velocidade sônica.** Trabalho de Conclusão de Curso/Engenharia Mecânica, URI, 2016.
- CHAPTER, J. I. **CAST IRON HANDBOOK.** The Institute of Indian Foundrymen, Mr. Gautam Banerjee, 2006.
- CABANNE, P. M.; **Magnesium Cored Wire Treatment Advantages And Disadvantages Vis-à-Vis Other Processes.** Sorelmetal Technical Services, Suggestions For Ductile Iron Production, v. 102, Março, 2006.
- CABANNE, P. M.; **The Efficiency Of Your Magnesium Treatment Varies: Check The Following Points.** Sorelmetal Technical Services, Suggestions For Ductile Iron Production, v. 114, Julho, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 7. ed. São Paulo, ABM, 2012.
- BARTON, R. **Loss Of Magnesium In Nodular Iron.** Relatório, Junho, 1959.
- ELKEM. **Technical Information 05:** Inoculation Mechanisms, 2008.
- ELKEM. **Technical Information 07:** Magnesium Content in Ductile Iron, 1997.
- ELKEM. **Technical Information 09:** Magnesium Treatment Processes, 1997.
- ELKEM. **Technical Information 10:** Tundish Cover Ladle Nodularization, 2002.
- ELKEM. **Technical Information 11:** The “Sandwich Pocket Process”, 2002.
- ELKEM. **Technical Information 23:** Factors Influencing the Recovery and Addition of Magnesium in Ductile Iron Ladle Treatment Processes, 2000.
- ELKEM. **Technical Information 26:** Fading of Nodularity in Ductile Iron, 2001.
- ELKEM. **Technical Information 27:** Alternative Tundish Ladle Design, 2001.
- ELKEM. **Technical Information 35:** In-the-Mould Nodularisation, 2002.
- ELKEM. **Technical Information 32:** Magnesium Slag Defects in Ductile Iron, 2010.
- FALLIS, A. . Metalurgia dos ferros fundidos nodulares. **Journal of Chemical Information and Modeling**, 2013.

FRANCKLIN, A. R. **Um Breve Estudo Sobre Ferro Fundido Nodular. Trabalho de Conclusão de Curso**, Curso de Tecnologia em Produção Siderúrgica, da UEZO, 2009.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

LABRECQUE, C.; GAGNÉ, M. **Ductile iron: fifty years of continuous development. Canadian Metallurgical Quarterly**, v.37, n.5, p.343-378, 1998.

MULLINS, D. J.; **50 Years Of Ductile Iron, QIT (Now Rit) And Technical Services**. Sorelmetal Technical Services, Suggestions For Ductile Iron Production, v. 92, Março, 2006.

MILLIS, D. K. **The invention of Ductile Iron In Milli's Own Words**. Ductile Iron Society Keith, Texas/1983.

MILLS, B. **Effects Of Holding Time On Some Properties Of Nodulargraphite Iron**. Foundry Trade Journal, p. 109-14, Julho, 1969.

MOCELLIN, F. **AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR EM ENSAIOS DE FURAÇÃO**. Dissertação de mestrado, Engenharia Mecânica, UFSC, 2002.

Census of World Casting Production: Total Casting Tons Hits 112 Million : Worldwide casting production growth slowed but still reported a 2.6% increase in 2018. A Modern Casting Staff Report. **Revista Moderns Casting**. Schaumburg, v. 109, n. 12, p. 22-25. Dezembro, 2019.

MALUF, O. **Influência Do Roleteamento No Comportamento Em Fadiga de Um Ferro Fundido Nodular Perlítico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2002.

MURATORE, C. E.; **Improving The Quality Of Your Ductile Iron**. Sorelmetal Technical Services, Suggestions For Ductile Iron Production, v. 102, Março, 2006.

NUNES, M. R. **ASM HANDBOOK**. Volume 15 Casting. Edition Metals Handbook. The Materials Information Company, 1988.

OLAWALE, J. O.; IBITOYE, S. A.; OLUWASEGUN, K. M. **Processing Techniques and Productions of Ductile Iron: A Review**. International Journal of Scientific & Engineering Research, v. 7, p. 397-423, Setembro, 2016.

RIBEIRO, S. A. C.; **Desvanecimento Do Tratamento De Nodularização: Uma Interpretação Microestrutural**. Contribuições Técnicas, Outubro, 1990.

SOUZA, F. N. T. **Produção e caracterização física e mecânica de ferros fundidos nodulares e ferros fundidos nodulares austemperados com adição de nióbio**. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, 2012.

SENAI, **Iniciação à fundição**. Belo Horizonte; 2.ed. 1987.67 p.

SOUZA, T. N. F.; **Análise Computacional da Formação de Trincas em Aço Fundido**. Dissertação - Curso de Manufatura Integrada Ao Computador, Cefet, Belo Horizonte, 2002.

SANTOS, A. B. S.; PIESKE, A. **Rendimento De Adição De Magnésio Para Fabricação De Ferros Fundidos Nodulares**. 3º Congresso Brasileiro de Fundição, São Paulo, Outubro, 1985.

SANTOS, A.B. S.; BRANCO, C.; HAYDAT, C. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. 5. ed. São Paulo: IPT, 1987. 241 p.

SOIESKI, M. S; WACHOWSKI, A. **Cast iron spheroidization by plunging method and cored wire method**. Archives Of Foundry Engineering, Polônia, v. 9, n. 1, p. 199-202, mar, 2009.

THOMPSON, T. Inoculation Effects. **Encyclopedia of Health Communication**, 2014.

TELES, M. J. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Fertilizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2007.