

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

GREICE SCARDUELLI RONSANI

**ESTUDO DO EFEITO DO MÉTODO DA INOCULAÇÃO E TIPOS DE
INOCULANTES EM FERROS FUNDIDOS NODULARES**

CRICIÚMA, JULHO DE 2006.

GREICE SCARDUELLI RONSANI

**ESTUDO DO EFEITO DO MÉTODO DA INOCULAÇÃO E TIPOS DE
INOCULANTES EM FERROS FUNDIDOS NODULARES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para a obtenção do grau de Engenheiro de Materiais no curso de Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Ângela Beatriz Coelho
Arnt

CRICIUMA, JULHO DE 2006.

GREICE SCARDUELLI RONSANI

ESTUDO DO EFEITO DO MÉTODO DA INOCULAÇÃO E TIPOS DE INOCULANTES EM FERROS FUNDIDOS NODULARES

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca Examinadora para obtenção do grau de Engenheiro de Materiais, no Curso de Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com linha de pesquisa em Metalurgia.

Criciúma, 04 de Julho de 2006.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Ângela Beatriz Coelho Arnt –UNESC - Orientadora

Prof^o Msc. Márcio Roberto Rocha - UNESC

Prof^o Dr. Elídio Angioletto– UNESC

AGRADECIMENTOS

- A meus pais, pela educação que me deram, por todo esforço que fizeram para que eu pudesse ter estudo de qualidade, pelo carinho, dedicação, cuidado e principalmente por acreditarem em mim. Também à minha irmã pelo estímulo e preocupação e por toda força que sempre me passou.
- A todos os meus familiares que sempre acreditaram no meu potencial.
- A meus professores que sempre me ensinaram com paciência e respeito em especial à Professora Ângela Arnt e ao Professor Márcio Rocha pela ótima orientação e por terem conseguido este estágio.
- Aos meus colegas de faculdade, em especial a Deivid Fernandes Joaquim e a Karen Paes Heimann que além de colegas se tornaram grandes amigos.
- Aos meus amigos que sempre entenderam a minha ausência e sempre me deram forças para seguir adiante, entre estes gostaria de fazer agradecimento especial à Ivana pela amizade sincera e por todo carinho que teve preparando os almoços para mim no período de época especial, Lucas, Belzinha, Deusa, Clarisse, Camila, Ane, Paula, Daniela, Gisele, Pity, Claudinho, Gui, Loro, Estela, etc...
- Aos colegas de trabalho, em especial à Jerson Passig, Sr.Mário Roberto da Silva, Daniel Braz, Breno Rodrigues de Mello, Gilmar Maçaneiro, Marcos Borges, Sérgio Luis da Silva, Eloísa de Souza e Cleiton Pereira por tudo que me ensinaram, sempre me tratando com respeito.
- Ao meu orientador de campo Adilson Dias por todo empenho e todo tempo dedicado.
- Ao Supervisor do Laboratório de Controle Metalúrgico Rivelino Abreu por todas as orientações, dicas e por tudo que me ensinou.Também agradeço aos funcionários deste laboratório, Ricardo, Lindomar, Fernanda, Enio, Lílian, Gean, Cristiano, Tiago.
- Ao Gerente de Fundação Roberto Luis Bartosewiz, pelas dicas a respeito do trabalho e por tudo que me ensinou.
- A todos os funcionários da Metalúrgica Riosulense que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.
- À Metalúrgica Riosulense S/A pela oportunidade de realizar este estágio.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi a avaliação dos efeitos do método da inoculação e do tipo de inoculante utilizados em um ferro fundido nodular classe DIN 1693 GGG 50. Para o experimento do trabalho foi utilizado dois tipos de inoculantes, o IMSR 75% e o Calcium Bearing. A principal diferença entre estes dois inoculantes é a presença do elemento estrôncio no IMSR 75% que faz com que a inoculação se torne mais eficiente promovendo um efeito de nucleação forte e retardando a perda de efeito do inoculante. As técnicas de inoculação utilizadas foram a inoculação no jato da panela de nodularização para a panela de vazamento e também a técnica de pós inoculação. O percentual de inoculante utilizado foi de 0,6% do peso total do metal líquido contido na panela de vazamento. Foram utilizados corpos de prova escalonados com o intuito de tentar avaliar as propriedades em diferentes espessuras. Após a análise dos resultados experimentais, pode-se dizer que foram atendidas todas as especificações para o ferro fundido - DIN 1693 GGG 50, com a utilização do inoculante IMSR 75%, e com aplicação da técnica de pós inoculação.

Palavras Chave: Ferro Fundido Nodular, Inoculação, Grafita.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....	15
3.1 Histórico.....	15
3.2 Produtos.....	16
3.3 Capacidade produtiva.....	16
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
4.1 Ferros Fundidos.....	17
4.1.1 Ferros Fundidos Brancos.....	17
4.1.2 Ferros Fundidos Cinzentos.....	17
4.1.3 Ferros Fundidos Mesclados.....	18
4.1.4 Ferros Fundidos Nodulares.....	18
4.1.5 Ferros Fundidos Maleáveis.....	18
4.1.6 Ferros Fundidos Vermiculares.....	19
4.1.7 Ferros Fundidos Especiais.....	19

4.1.7.1 Ferros Fundidos Cinzentos.....	19
4.1.7.2 Ferros Fundidos Brancos.....	19
4.1.7.3 Ferros Fundidos Nodulares.....	19
4.2 Principais fatores que influenciam na microestrutura e propriedades dos Ferros Fundidos.....	20
4.2.1 Composição Química,.....	20
4.2.2 Velocidade de resfriamento.....	21
4.3 Componentes estruturais dos ferros fundidos.....	22
4.3.1 Grafita.....	22
4.3.2 Ferrita.....	23
4.3.3 Cementita.....	23
4.3.4 Perlita.....	24
4.3.5 Austenita.....	24
4.3.6 Ledeburita.....	25
4.3.7 Steadita.....	25
4.4 Tipos de forma da grafita.....	26
4.4.1 Grafita esferoidal.....	26
4.4.2 Grafita irregular.....	26
4.4.3 Grafita vermicular.....	26
4.4.4 Grafito do tipo spiky ou crab.....	27
4.4.5 Grafita explodida.....	28
4.4.6 Grafita lamelar.....	28
4.5 Ferros Fundidos Nodulares.....	29
4.5.1 Seqüência de solidificação dos ferros fundidos nodulares.....	30
4.5.1.1 Ferros fundidos nodulares hipoeutéticos.....	32

4.5.1.2 Ferros fundidos nodulares eutéticos.....	32
4.5.1.3 Ferros fundidos nodulares hipereutéticos.....	32
4.5.2 Influencia dos elementos de liga.....	33
4.6 Processos de fabricação dos ferros fundidos nodulares.....	34
4.6.1 Superaquecimento.....	35
4.6.2 Tratamento de nodulização.....	35
4.6.3 Tratamento de inoculação.....	37
4.6.3.1 Tipos de inoculantes utilizados.....	38
4.6.3.2 Quantidade de inoculante.....	39
4.6.3.3 Temperatura de inoculação.....	39
4.6.3.4 Composição do metal.....	39
4.6.3.5 Granulometria do inoculante.....	40
4.6.3.6 Técnicas de inoculação.....	40
4.6.3.7 Taxa de inoculação.....	42
4.6.3.7 Tempo de fadiga do inoculante.....	43
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	44
5.1 Equipamentos e materiais utilizados.....	44
5.2 Metodologia.....	45
5.2.1 Desenvolvimento das atividades.....	45
5.2.2 Confeção do ferramental.....	46
5.2.3 Moldagem do corpo de prova.....	46
5.2.4 Cálculo de carga.....	47
5.2.5 Fusão da liga.....	48
5.2.6 Tratamento de nodulização.....	50

5.2.7 Tratamento de inoculação.....	51
5.2.8 Desmoldagem dos corpos de prova.....	53
5.2.9 Acabamento dos corpos de prova.....	53
5.2.10 Ensaio de dureza na superfície.....	53
5.2.11 Preparação de amostras para análise.....	53
5.2.12 Contagem de nódulos.....	54
5.2.13 Ensaio de dureza no núcleo.....	54
5.2.14 Ensaio Metalográficos.....	54
5.2.15 Ensaio de tração.....	55
6 RESULTADOS.....	56
6.1 Resultados obtidos no processo prático utilizando o método de inoculação no jato.....	56
6.1.1 Resultados obtidos nos ensaios de dureza na superfície e no núcleo.....	56
6.1.2 Resultados obtidos no ensaio de tração.....	56
6.1.3 Resultados obtidos nos ensaios metalográficos.....	57
6.2 Resultados obtidos no processo prático utilizando o método de pós inoculação.....	59
6.2.1 Resultados obtidos nos ensaios de dureza na superfície e no núcleo.....	59
6.2.2 Resultados obtidos no ensaio de tração.....	60
6.2.3 Resultados obtidos nos ensaios metalográficos.....	60
7 DISCUSSÕES.....	64
7.1 Discussão dos resultados obtidos no processo de inoculação no jato.....	64

7.2 Discussão dos resultados obtidos no processo de inoculação no jato com pós inoculação no molde.....	65
8 CONCLUSÃO.....	67
REFERENCIAS.....	68
ANEXOS.....	
Anexo 1 – Certificado de análise química do Ferro Gusa Nodular de baixo Silício...	69
Anexo 2 – Certificado de análise química do Grafite Unicarbono 80.....	70
Anexo 3 – Certificado de análise química da liga nodulizante.....	71
Anexo 4 – Certificado de análise química do inoculante Calcium Bearing.....	72
Anexo 5 - Certificado de análise química do inoculante IMSR 75%.....	73
Anexo 6 – Boletim técnico do inoculante IMSR 75%.....	74
Anexo 7 - Boletim técnico do inoculante Calcium Bearing.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grafita esferoidal sem ataque.....	22
Figura 2 – Micrografia de matriz perlítico- ferrítica.....	23
Figura 3 – Agulhas de cementita.....	23
Figura 4 -Matriz perlítico- ferrítica.....	24
Figura 5 – Micrografia mostrando austenita.....	24
Figura 6 – Micrografia evidenciando a ledeburita.....	25
Figura 7 – Micrografia evidenciando a steadita.....	25
Figura 8 – Grafita Irregular.....	26
Figura 9 – Grafita vermicular.....	27
Figura 10 – Grafita spiky ou crab.....	27
Figura 11 – Grafita explodida.....	28
Figura 12 – Grafita lamelar.....	28
Figura 13 – Fotografia de nódulo de grafita obtida em microscópio eletrônico de varredura.....	29
Figura 14 - Sobreposição dos diagramas Fe – C , estável e metaestável.....	31
Figura 15 – vazamento de liga para a panela de nodularização.....	36
Figura 16 – Reação de nodulização acontecendo dentro da panela.....	36
Figura 17 – Desenho do corpo de prova escalonado.....	45
Figura 18 – parte superior e inferior do molde.....	47
Figura 19 – Corpo de prova de análise química.....	48
Figura 20 – Diferença de coquilhamento após e antes da correção do banho.....	49
Figura 21 – Inserção de liga nodularizante no fundo da panela de nodularização....	50
Figura 22 – Técnica de Inoculação no Jato.....	52

Figura 23 – Técnica de Pós Inoculação.....	52
Figura 24 – Corpo de prova utilizado no ensaio de tração.....	55
Figura 25 - grau de nodularização parte fina , média e grossa , respectivamente na técnica de inoculação no jato, utilizando inoculante IMSR 75%.....	58
Figura 26 - grau de nodularização parte fina , média e grossa respectivamente, na técnica de Inoculação no jato, utilizando inoculante Calcium Bearing.....	58
Figura 27 - Matriz parte fina, média e grossa, respectivamente, na técnica de inoculação no jato, utilizando inoculante IMSR 75%.....	58
Figura 28 - Matriz parte fina, média e grossa, respectivamente, na técnica de Inoculação no jato, utilizando inoculante Calcium Bearing.....	59
Figura 29 - grau de nodularização parte fina , média e grossa, respectivamente, na técnica de pós Inoculação, utilizando inoculante IMSR 75%.....	61
Figura 30 - grau de nodularização parte fina, média e grossa respectivamente, na técnica de pós inoculação,utilizando inoculante Calcium Bearing.....	62
Figura 31 – Matriz parte fina, média e grossa, respectivamente, na técnica de pós inoculação, utilizando inoculante IMSR 75%.....	62
Figura 32 - Matriz parte fina, média e grossa, respectivamente, na técnica de pós inoculação, utilizando inoculante Calcium Bearing.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos ferros fundidos nodulares, segundo a DIN.....	30
Tabela 2 – Materiais utilizados na elaboração da carga.....	48
Tabela 3 – Faixa de composição química especificada para elementos base da carga metálica.....	49
Tabela 4 – Faixa de composição química do inoculante Calcium Bearing.....	51
Tabela 5 - Faixa de composição química do inoculante IMSR 75 %.....	51
Tabela 6 – Valores obtidos nos ensaios de dureza no núcleo na técnica de Inoculação no jato.....	56
Tabela7 - Valores obtidos no ensaio de dureza na superfície na técnica de Inoculação no jato.....	56
Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de tração na técnica de Inoculação no jato.....	57
Tabela 9: Valores obtidos no ensaio de grau de nodularização na técnica de Inoculação no jato.....	57
Tabela 10 – Valores obtidos no ensaio de dureza no núcleo na técnica de pós inoculação.....	59
Tabela 11 - Valores obtidos no ensaio de dureza na superfície na técnica de pós inoculação.....	60
Tabela 12 – Valores obtidos no ensaio de tração na técnica de pós inoculação.....	60
Tabela 13 Valores obtidos no ensaio de grau de nodularização na técnica de pós inoculação.....	61
Tabela 14 - Resultados obtidos no experimento.....	64

1 INTRODUÇÃO

Ferros Fundidos são ligas de ferro, carbono e silício caracterizados pela presença de reação eutética durante a solidificação. Este material é comumente utilizado na fundição de peças para a indústria automobilística entre outros segmentos. Os ferros fundidos podem ser classificados em ferros fundidos mesclados, ferros fundidos cinzentos, ferros fundidos nodulares, ferros fundidos maleáveis, ferros fundidos vermiculares e ferros fundidos especiais. Cada tipo de ferro fundido contém suas particularidades.

Neste trabalho o tipo de ferro fundido utilizado foi o ferro fundido nodular da classe DIN 1693 GGG 50, um material que apresenta grafita na forma de esferas no estado bruto de fusão e é de simples fabricação. Para a obtenção desta forma de grafita são adicionados alguns elementos ao ferro fundido nodular e esta forma de adição é chamada de inoculação, utilizando compostos chamados de inoculantes. Este tratamento de inoculação pode ser feitos de diferentes formas e a forma como é feito bem como o tipo de inoculante utilizado pode afetar as propriedades do material.

Na execução deste trabalho, foi confeccionado um corpo de prova, com três espessuras diferentes, com o objetivo de avaliar as propriedades e o efeito do local de inoculação. Para efeito comparativo foram utilizados dois tipos de inoculantes.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o efeito do método da inoculação e tipos de inoculantes em ferros fundidos nodulares da classe DIN 1693 GGG 50.

2.2 Específicos

- Comparar o efeito das técnicas de inoculação empregadas no processo;
- Comparar o efeito do tipo de inoculante utilizado;
- Comparar as propriedades obtidas em diferentes espessuras do fundido;
- Realizar ensaios metalográficos com o intuito de verificar a influência das variáveis na estrutura do fundido;
- Realizar ensaios mecânicos para verificar a influência da variação do tipo de inoculante e técnica de inoculação sobre as diferentes espessuras do fundido.

3 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A Metalúrgica Riosulense SA situa – se na Rua Emílio Adami, 700, bairro Barra do Trombudo, na cidade de Rio do Sul, região do Alto vale do Itajaí.

É o maior fabricante latino americano de guias, sedes e tuchos mecânicos de válvulas, fundidos em ligas especiais. A empresa tem como clientes as principais distribuidoras de autopeças e montadoras como Iveco, Scania, Mercedes, MWM Motores Diesel Ltda, Cummins do Brasil Ltda e também exporta para Europa, Estados Unidos, Oriente Médio, América Latina e Oceania. Sua missão é “Gerar produtos de qualidade, buscando a satisfação dos usuários, lucratividade e preservação da empresa, possibilitando seu contínuo crescimento e um sentimento de realização pessoal e profissional de seus colaboradores”.

3.1 Histórico

A empresa iniciou suas atividades em 1946 como uma oficina mecânica que prestava serviços para as indústrias de fécula e madeira. No ano de 1949, transformou – se em sociedade anônima e através de investimentos externos a companhia obteve condições de iniciar a atividade de fabricação de máquinas para a indústria de fécula de mandioca.

Em 1956 a empresa adquiriu uma pequena fábrica de autopeças que tinha como principal atividade a produção de guias e sedes de válvula. A produção de autopeças cresceu e em 1980 esta torna – se a principal atividade da empresa.

A modernização tecnológica iniciou – se no ano de 1985 com a introdução de novos sistemas de fabricação melhorando a qualidade dos produtos e aumentando a produção e em 1988 iniciaram – se as obras de construção do novo parque fabril e desativação da fábrica de máquinas.

Em 1992 iniciaram – se as atividades no novo parque fabril e neste ano a empresa conquistou o premio da Confederação Nacional da Indústria – CNI de incentivo à produtividade e Qualidade. No ano de 1999 conquistou o certificado ISO 9002 e no ano de 2000 consolidou – se como fornecedora para montadoras sendo que em 2001 conquistou o certificado QS 9000/ISO 9002:1994 e em 2004 o certificado ISO/TS 16949: 2002 que possibilita o fornecimento de produtos para exportação.

3.2 Produtos

Os principais produtos produzidos pela Metalúrgica Riosulense SA são as guias de válvula, sedes de válvula e tuchos mecânicos. As guias são produzidas em ferros fundidos especiais ligados com cobre, cromo, molibdênio e fósforo. São produtos que unem características de alta resistência ao desgaste e precisão dimensional devido a excelência dos materiais utilizados e a usinagem em máquinas especiais.

As sedes de válvula produzidas pela Metalúrgica Riosulense SA são produtos submetidos a desgaste e altas temperaturas e são produzidas em aços com alto teor de cromo e níquel, ferros fundidos ligados com cromo e molibdênio e ligas a base de níquel e cobalto.

Outro produto de especialidade da metalúrgica são os tuchos mecânicos produzidos em ferros fundidos com o prato coquilhado para resistir a desgastes constantes. Além disso, alguns tuchos também são temperados, atingindo durezas de até 60 Rockwell C.

A metalúrgica também atua em outras linhas como camisas de cilindro, anéis de virabrequim e peças especiais para motores como coletores, tubos de saída d'água, polias, cubos de roda, carter, entre outros produtos para montagem de motores.

3.3 Capacidade produtiva

A capacidade de produção da metalúrgica é de 1200 toneladas por mês de peças fundidas e tem uma capacidade de usinagem de aproximadamente 2.800.000 peças por mês. Atualmente a fundição está trabalhando acima da capacidade, fundindo em torno de 1227 toneladas por mês.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Ferros fundidos

São ligas de ferro – carbono onde o teor de carbono está acima de 2,0%. Porém podem ser consideradas ligas ternárias devido à influência do silício que está constantemente presente em teores consideráveis. Estas ligas têm como elementos principais o ferro, carbono e o silício e como elementos secundários o manganês, fósforo e enxofre. São encontrados em sua composição também elementos residuais presentes na sucata de aço e no ferro gusa o titânio, alumínio, cromo, vanádio, tungstênio, níquel e molibdênio. Por Chiaverini, pode ser definido da seguinte maneira.

“Ferro fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2% em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita” (Vicente Chiaverini, 1982, p.425)

Os ferros fundidos são ligas caracterizadas pela presença de reação eutética durante a solidificação. Há vários tipos de ligas de ferro fundido, as principais são:

4.1.1 Ferros fundidos brancos

Apresentam na sua estrutura grande quantidade de Fe_3C ou carbonetos, praticamente todo o carbono da liga encontra – se na forma combinada. Possuem um teor de silício um pouco menor que o usual nestas ligas, porém os elementos principais ainda assim são carbono e silício. A formação desses carbonetos deve – se também às condições de fabricação. (Adalberto, B. de S. S; Carlos, H.C.B,1977, p.2)

4.1.2 Ferros Fundidos Cinzentos

São ligas que contém em sua estrutura, grande parte do carbono na forma de grafita lamelar e uma outra parte na forma de cementita.

É uma das ligas mais utilizadas entre os ferros fundidos devido a sua boa resistência ao desgaste, boa resistência mecânica, facilidade de fusão e moldagem e boa capacidade de amortecimento. Elementos principais: carbono e silício. (Vicente Chiaverini, 1982, p.446)

4.1.3 Ferro Fundido Mesclado

São ferros fundidos que contém um misto de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento, pois sua solidificação acontece em parte no sistema estável onde se obtém austenita e grafita e em parte no sistema metaestável onde é obtido austenita e carbonetos. (Vicente Chiaverini, 1982, p.425)

4.1.4 Ferros Fundidos Nodulares

Também pode ser chamado de ferro fundido dúctil devido às características de boa ductilidade, pois a grafita se apresenta na forma esferoidal devido às condições de fabricação e adição de elementos químicos no material ainda no estado líquido que modificam a sua forma de crescimento não se obtendo então grafita lamelar. (Vicente Chiaverini, 1982, p.425)

4.1.5 Ferros fundidos maleáveis

São obtidos a partir do ferro fundido branco. Para obtenção deste material é feito um tratamento térmico chamado de maleabilização, onde praticamente toda a cementita se transforma em grafita na forma de nódulos e não em forma de lamelas. (Vicente Chiaverini, 1982, p.426)

Existem basicamente dois processos para a obtenção deste tipo de ferro fundido. Um dos processos é a grafitização em que toda a cementita, inclusive a da perlita, se decompõe em ferrita e partículas de grafita e estas partículas se agrupam na forma de nódulos. O outro processo é a descarbonetação onde o carbono da cementita e da perlita é eliminado por oxidação junto às superfícies das peças. (Carmo, D.J., 1995, p.26)

4.1.6 Ferros fundidos vermiculares

São ferros fundidos onde no estado bruto de fusão se observa a grafita vermicular que é uma estrutura intermediária entre a grafita em veios e a grafita em nódulos. (Adalberto, B. de S. S; Carlos, H.C. B, 1977, p.3).

4.1.7 Ferros fundidos especiais

São ferros fundidos com propriedades específicas, onde a obtenção destas propriedades se dá através da adição de teores consideráveis de alguns elementos de liga. Alguns exemplos são:

4.1.7.1 Ferros fundidos cinzentos – ferro fundido ao silício onde se tem cerca de 15 % de silício, ferro fundido ao níquel que contém aproximadamente 15% de níquel tornando estes materiais resistentes à corrosão. Os ferros fundidos ao alumínio com cerca de 25 % de alumínio são resistentes á oxidação em temperaturas elevadas e os ferros fundidos ao alumínio que contém cerca de 4% deste elemento possuem elevada resistência mecânica.

4.1.7.2 Ferro fundido branco – a estes ferros fundidos são adicionados cerca de 13% de cromo o que os torna resistentes à abrasão.

4.1.7.3 Ferros fundidos nodulares – podem ser adicionados cerca de 25 % de alumínio para torná-los resistentes à oxidação em temperaturas elevadas e também pode – se ter ferros fundidos nodulares ao níquel que contém teores de níquel de 15 % aproximadamente o que os torna resistentes à corrosão.(Adalberto, B. de S. S; Carlos, H.C. B ,1977, p.2-3).

É importante ressaltar que a microestrutura e as propriedades dos ferros fundidos podem ser modificadas com o controle de composição química e velocidade de resfriamento, fatores muito importantes que estarão relacionados a seguir:

4.2 Principais fatores que influenciam na microestrutura e propriedades dos ferros fundidos.

Pode-se relacionar como principais fatores que influenciam na microestrutura e propriedades dos Ferros fundidos a:

- Composição química;
- Velocidade de resfriamento.

4.2.1 Composição química

A composição química nos ferros fundidos é um dos fatores mais relevantes. Seu controle permite a obtenção das propriedades e estruturas especificadas. Neste material o carbono e o silício são os elementos que mais influem na microestrutura, mas o controle eficaz de todos os elementos presentes, assim como a detecção de elementos indesejáveis deve ser realizado.

A seguir serão descritos os principais elementos constituintes do ferro fundido.

O Carbono e silício são os elementos que mais influenciam na microestrutura. O silício é um elemento grafitizante, favorece a decomposição do carboneto de ferro e aumenta a resistência ao impacto do material. O carbono é o principal elemento formador da grafita, quanto maior a porcentagem em peso de carbono, maior o número de germes de grafita precipitados. (SOCIESC,2002,p.104)

O Manganês é um estabilizador da cementita. Usualmente é utilizado como dessulfurante, porém também atua como estabilizador da perlita. É requerido quando necessita – se elevar a dureza do fundido e uma maior resistência mecânica com o predomínio de uma microestrutura com matriz perlítica. O Enxofre deve apresentar uma faixa de utilização baixa no fundido, pois causa precipitação de sulfetos e defeitos chamados de drosses. (Adalberto, B. de S. S;Carlos,H.C. B,1977, p.21).

Para o cobre a faixa de utilização varia entre 0,5 a 2,0% e até 0,10 % é considerado um elemento residual. É um forte perlitizante. Aumenta a resistência à tração e escoamento, aumenta a dureza e a resistência à corrosão. Diminui a resistência ao impacto. O estanho acima de 0,12% fragiliza o material. Pode ser

adicionado em uma faixa de composição de 0,05 a 0,12% máximo. É um forte perlitizante, dez vezes superior ao cobre. Aumenta a resistência à tração, o escoamento e a dureza. Diminui a resistência ao impacto e a tenacidade.

O Cromo tem forte efeito perlitizante, porém é pouco utilizado, pois provoca a formação de carbonetos eutéticos na solidificação.

Durante a solidificação das ligas ferrosas o primeiro fenômeno que acontece é a formação dos núcleos que é a menor partícula estável da nova fase. Após a nucleação, ocorre o crescimento dos núcleos gerando as dendritas que dão origem aos grãos que formam a estrutura típica dos metais. (SOCIESC, 2002,p.8)

4.2.2 Velocidade de resfriamento

A velocidade de resfriamento está relacionada com a espessura das peças fundidas, quando as peças têm espessura maior, a velocidade de resfriamento é mais lenta e quando as secções são finas ocorre velocidade de resfriamento maior.

Quando se tem uma elevada velocidade de resfriamento como as que acontecem em paredes finas ou quando são utilizados resfriadores, não há muito tempo para a decomposição da cementita podendo ocorrer pouca ou nenhuma grafitação, dependendo do teor de carbono e silício que o material apresenta, havendo assim grandes possibilidades de formação de ferro fundido branco.

No caso oposto, quando a velocidade de resfriamento é lenta, ocorre então grafitação e depende do teor de silício formando uma estrutura constituída de perlita e grafita. Se for aumentado o teor de silício e o resfriamento for ainda mais lento a cementita da perlita pode decompor-se parcialmente gerando uma estrutura com veios de grafita, perlita e ferrita. As características que esta estrutura confere ao material são baixa dureza, boa usinabilidade e uma razoável resistência mecânica.

A velocidade de resfriamento também influi na forma, tamanho e distribuição dos veios de grafita, velocidades altas resultam em veios finos, velocidades médias resultam em distribuição e tamanhos normais e velocidades muito lentas resultam em uma distribuição grosseira. (Vicente Chiaverini,1982, p.433).

Nos ferros fundidos deve – se ter conhecimento dos seus micro constituintes para que se possa fazer uma correlação com sua microestrutura e

propriedades desejadas. A seguir será comentado a respeito dos componentes estruturais dos ferros fundidos

4.3 Componentes estruturais dos ferros fundidos

Estes componentes são obtidos pelas formas de fabricação dos ferros fundidos e do teor de elementos presentes no material. Através do tipo destes microconstituintes presentes no material, irá se obter ou não as propriedades desejadas e as particularidades de cada peça como boa usinabilidade, resistência mecânica, resistência ao desgaste.

4.3.1 Grafita

Determina as características mecânicas dos ferros fundidos sendo que em ferros fundidos cinzentos, 70% é determinado pela grafita e 30% pela matriz e em nodulares 30% é determinado pela grafita e 70% pela matriz. É um pó constituído de 100% de carbono e sem resistência sendo responsável pela menor resistência mecânica dos ferros fundidos (SOCIESC,2002, p 19).

A Figura 1 mostra a micrografia de um ferro fundido nodular em que os pontos pretos são grafitas na forma esferoidal. Porém existem outras formas de grafita como a grafita vermicular, grafita spiky ou crab, grafita explodida e grafita lamelar. (Carmo, D.J,1987, p.29)

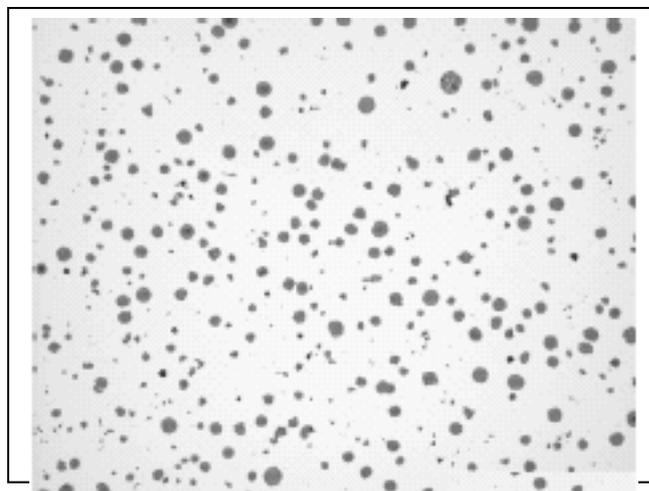


Figura 1: Grafita esferoidal sem ataque. Fonte: Guia Micrográfico dos Ferros Fundidos, p.18, 1995.

4.3.2 Ferrita

Apresenta uma estrutura de grão poligonais irregulares, possui baixas dureza e resistência a tração, elevado alongamento e ótima resistência ao choque. (Vicente Chiaverini, 1982, p.435). Na figura 2 pode - se pode ver a ferrita que circunda o nódulo de grafita esferoidal.

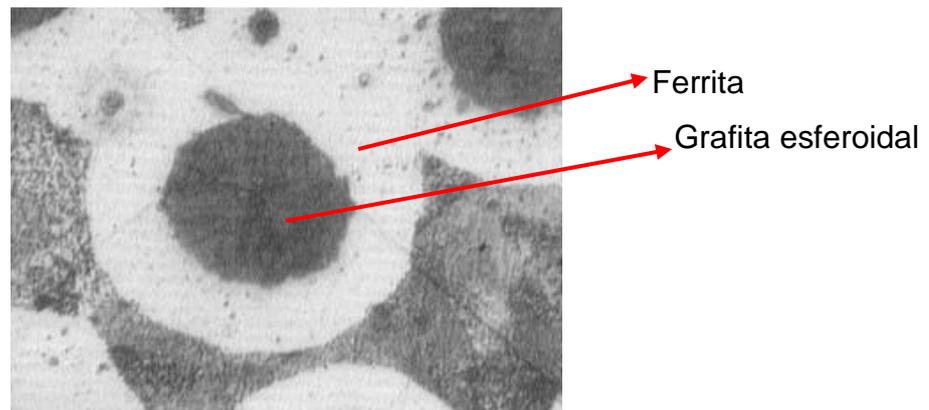


Figura 2: Micrografia de matriz perlítico – ferrítica. Ataque: Nital 3%, 500 X. Fonte: Guia Micrográfico dos Ferros Fundidos, p.44.

4.3.3 Cementita

É o Carboneto de ferro Fe_3C . É um componente muito duro, quebradiço e confere alta dureza e resistência ao material, também responsável pela menor ductilidade. (Vicente Chiaverini, 1982, p.33)

A cementita aparece na micrografia em forma de agulhões, como se pode observar na figura 3.



Figura 3: Agulhas de Cementita. Ataque Nital 3,5% 100X. Fonte: O autor

4.3.4 Perlita

Contém 88% de ferrita e 12% de cementita aproximadamente e se apresenta na forma de lâminas finas. Possui propriedades intermediárias entre as da ferrita e da cementita e estas propriedades dependem do tamanho das lâminas de cementita. (Vicente Chiaverini, 1982, p.33). Na micrografia da figura 4 pode – se observar a perlita na forma de lâminas finas.

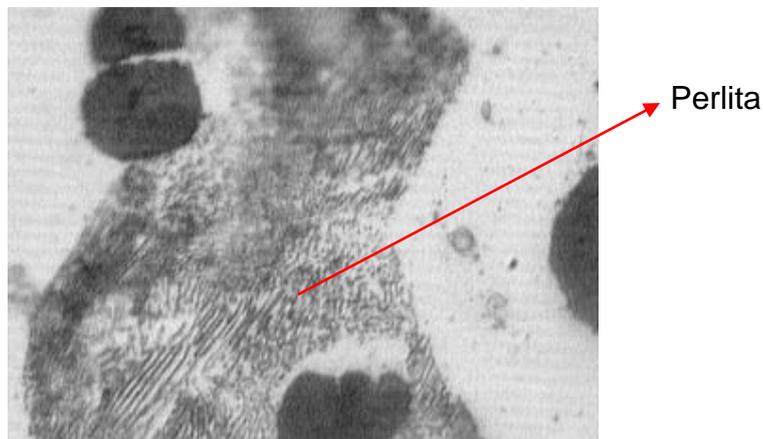


Figura 4: Matriz perlítico - ferrítica .Ataque Nital 3,5% 500X. Fonte: Guia Micrográfico dos Ferros Fundidos, p.35.

4.3.5 Austenita

Apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares, tem boa resistência mecânica e boa tenacidade. (Vicente Chiaverini,1982, p.33).

Na figura 5 pode – se observar os pontos brancos, que são a austenita.

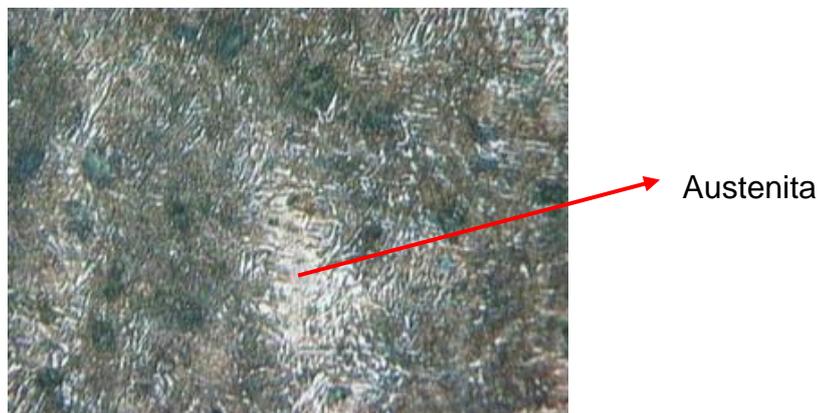


Figura 5: Micrografia mostrando austenita. Ataque nital 3 %. 200X. Fonte: O autor

4.3.6 Ledeburita – é um constituinte de elevada dureza. Formado de pequenos glóbulos de perlita, sobre um fundo de cementita. (Vicente Chiaverini, 1982, p.435)



Figura 6: Micrografia evidenciando a Ledeburita. Ataque nital 3%. 500X. Fonte: O autor

4.3.7 Steadita – Produto com baixo ponto de fusão que contém partículas de fosfeto de ferro e carboneto de ferro. É dura e frágil e seu elemento formador é o fósforo em teores superiores a 0,15%. (Vicente Chiaverini, 1982, p.435). Na figura 7 observa – se a micrografia evidenciando a Steadita.



Figura 7: Micrografia evidenciando a Steadita. Ataque nital 3%. 500X. Fonte: O autor

Como foi comentado no item 3.3.1, a grafita pode se apresentar de várias formas. A seguir serão tecidos comentários a respeito das formas de grafita encontradas nos ferros fundidos.

4.4 Tipos de forma de grafita

4.4.1 Grafita esferoidal

É um micro constituinte característico do ferro fundido nodular. Pode ser do tipo I e II. A grafita do tipo I apresenta um contorno aproximadamente circular; e a grafita do tipo II é esferoidal e apresenta contorno irregular.

O que determina a proporção destes microconstituintes é a eficiência na elaboração da composição química do fundido (Carmo, D.J, 1995, p.25). Pode – se observar na figura 1 a micrografia mostrando a grafita esferoidal.

4.4.2 Grafita irregular

É um micro constituinte característico do ferro fundido maleáveis. Os contornos podem ser mais ou menos irregulares. A forma dos contornos depende principalmente da relação entre o teor de manganês e enxofre sendo que quando há excesso de manganês os contornos se tornam irregulares e quando há excesso de enxofre os contornos se tornam mais arredondados.

A grafita irregular pode também ser causada pelo tempo de vazamento demorado, inoculação insuficiente ou fadiga do inoculante (Carmo, D.J,1995, p.27).



Figura 8: Grafita irregular. Sem ataque. 100X. Fonte: ELKEN ASA, Foundry Products Division. De acordo com a Norma EN ISO 945.

4.4.3 Grafita vermicular

É uma forma intermediária entre a grafita lamelar e a esferoidal. É observada na forma de lamelas curtas e espessas. A estrutura desta grafita, também chamada de grafita compacta, pode se apresentar na forma de partículas isoladas ou na forma de lamelas interconectadas. Este tipo de grafita é observado em ferros fundidos nodulares onde o teor do elemento nodulizante é insuficiente para se obter a grafita totalmente na forma esferoidal. Também pode ser causada pela demora no vazamento. (Carmo, D.J, 1995, p.27).



Figura 9: Grafita vermicular. Sem ataque. 200X. Fonte: ELKEN ASA, Foundry Products Division. De acordo com a Norma EN ISO 945.

4.4.4 Grafita do tipo *spiky* ou *crab*

Este tipo de grafita pode ser considerado uma forma degenerada de grafita esferoidal. Esta degeneração é causada por excesso de elemento nodulizante ou pela presença de alguns elementos nocivos. A proporção e a forma com que se encontram dependem do tipo e quantidade de elementos deletérios à esferoidização como o chumbo, bismuto, antimônio e titânio. Este tipo de grafita prejudica as propriedades mecânicas do fundido. (Carmo, D.J, 1995, p.28)

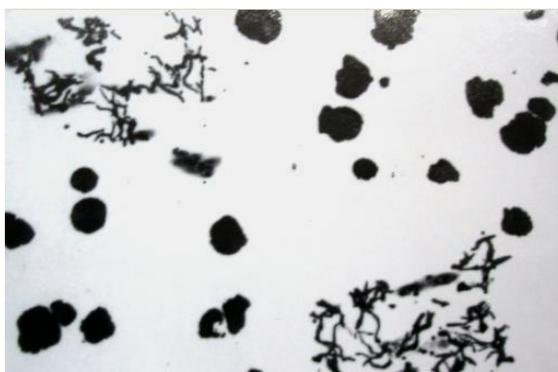


Figura 10 : Grafita *Spiky* ou *crab*. Sem ataque. 100X. Fonte: ELKEN ASA, Foundry Products Division. De acordo com a Norma EN ISO 945.

4.4.5 Grafita explodida

Tem a aparência de esferóides explodidos como se pode observar na figura 11. Podem ser encontradas na superfície de peças de ferros fundidos com grafita esferoidal de composição hipereutética. Causada pela adição excessiva de terras raras. (Carmo, D.J, 1995, p.29).

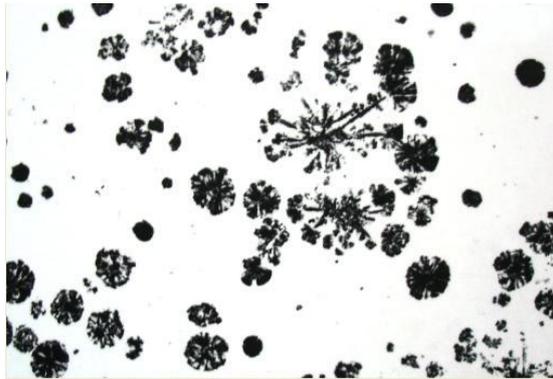


Figura 11: Grafita explodida. Sem ataque. 100X. Fonte: ELKEN ASA, Foundry Products Division. De acordo com a Norma EN ISO 945.

4.4.6 Grafita lamelar

É a grafita encontrada em ferros fundidos cinzentos. Apresenta-se na forma de lamelas ou veios e tem vários tamanhos e distribuições. A forma da grafita lamelar é influenciada pela velocidade de resfriamento, composição química e tratamento do metal líquido. (Carmo, D.J, 1995, p.29).

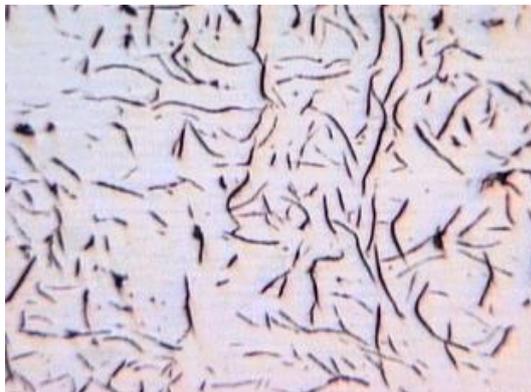


Figura 12 : Grafita lamelar. Sem ataque. 100X. Fonte: Guia Micrográfico dos Ferros Fundidos, p.29.

Como o ferro fundido nodular é o tema central deste trabalho, a seguir foi feita uma discussão mais detalhada a respeito de suas características e comportamentos.

4.5 Ferros Fundidos Nodulares

São ferros fundidos que contém grafita na forma esferoidal no estado bruto de fusão dispersa em uma matriz de ferrita, perlita ou em ambos, decorrente da adição de elementos químicos no metal líquido que modificam a forma da grafita, com a obtenção de grafita na forma esferoidal. (Adalberto,B de S.S; Carlos, H.C.B,1977,p.3).

Na Figura 13 está representada a grafita de forma esferoidal, presente em ferros fundidos nodulares.



Figura 13: Fotografia de nódulo de grafita obtida em microscópio eletrônico de varredura. 1600X. Fonte (Adalberto,B de S.S; Carlos, H.C.B ,1977, p.175)

Esta forma de grafita confere ao material ductilidade, boa tenacidade, resistência mecânica e limite de escoamento, sendo este superior ao dos ferros fundidos cinzento, maleável e dos aços – carbono sem presença de elementos de liga. Sua ductilidade e tenacidade são conferidas pela forma esferoidal da grafita, pois não há interrupção na continuidade da matriz.

A forma esferoidal da grafita é obtida pela adição controlada de elementos no metal fundido como o magnésio e cério. O controle de adição destes elementos é feito para que se possa produzir a forma desejada de grafita (Vicente Chiaverini,1982, p. 483).

A diminuição do tamanho de grão e o aumento da quantidade destes se dá pela introdução de elementos nodularizantes. Estes elementos nodularizantes contêm magnésio e podem ser magnésio sem liga, nodulizantes a base de níquel e nodulizantes a base de Mg-Fe-Si. São introduzidos na maioria das vezes na forma de ligas como os exemplos que seguem: 15 Mg – 82 Ni, 15 Mg – 30 Si – 50 Ni, 8 Mg – 46 Si – 42 Fe, 5 Mg – 45 Si – 50 Fe, 12 Mg – 40 Si – 18 Cu – 30 Fe. (Vicente Chiaverini, 1982, p.483).

Segundo a DIN, as especificações para os ferros fundidos estão listadas na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos ferros fundidos nodulares, segundo a DIN

Classe	Limite de resistência à tração (Kgf/mm ²)	Limite de escoamento (Kgf/mm ²)	Alongamento	Dureza Brinell	Módulo de Elasticidade (Kgf/mm ²)	Resist. Ao choque Kgf/mm ²	Resist a flexão kgf/mm ²
GGG 45	45	35	5	160/240	17000 ↑ 16.500 A 18.500	2	80/95
GGG 38	38	25	17	140/180		10	75/90
GGG42	42	28	12	150/200		8	80/90
GGG50	50	35	7	170/240		6	85/100
GGG60	60	42	2	210/300		4	90/110
GGG 70	70	50	2	230/320		2	100/120

Fonte: Vicente Chiaverini, 1982, p.489.

4.5.1 Seqüência de solidificação dos ferros fundidos nodulares

A solidificação dos ferros fundidos pode se dar conforme o equilíbrio estável ou o metaestável. No eutético estável se tem austenita e grafita e no metaestável austenita e carbonetos.

As temperaturas de equilíbrio do eutético estável e metaestável tem uma diferença de aproximadamente 7°C. A temperatura eutética estável é de 1153°C e a metaestável é de 1147°C.

Quando se tem silício até 3 % aproximadamente as secções binárias Fe – C do diagrama ternário Fe– C – Si são similares às do diagrama binário Fe– C sendo que a solidificação se dá de maneira semelhante a das ligas puras Fe– C. Porém ocorre uma diminuição da porcentagem de carbono do eutético e uma alteração nas linhas do diagrama que representam o equilíbrio entre as fases. A diferença entre as temperaturas pode ser alterada pela variação na porcentagem de silício e também pela presença de elementos de liga. Elementos grafitizantes

ampliam a faixa entre as temperaturas dos eutéticos. Entre estes elementos estão o silício, alumínio, níquel e cobre. No entanto, elementos como o cromo, vanádio, molibdênio, manganês e tungstênio, que facilitam a formação de carbonetos, tornam esta faixa mais estreita. Na figura 14 pode – se observar a sobreposição dos diagramas estável e metaestável.

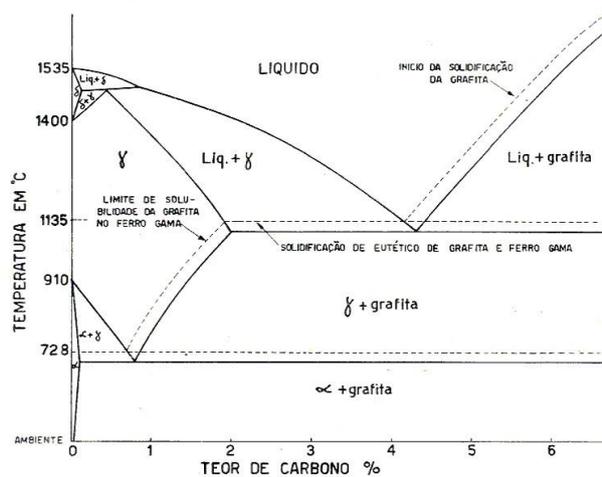


Fig. 521 — Diagrama de equilíbrio ferro-carbono simplificado mostrando em pontilhado o diagrama estável ferro-grafita.

Figura 14 – Sobreposição dos diagramas estável e metaestável. Fonte: Callister, William D, 1999, p.253

Embora a separação entre as temperaturas dos diagramas estável e metaestável seja de 7°C em ligas puras de Fe-C, quando se tem 2% de silício esta temperatura pode exceder a 35°C. Portanto esta faixa pode ser reduzida se for adicionado cerca de 1,1% de cromo. (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B , p.7, 1979)

O cromo e o silício parecem influenciar principalmente as temperaturas de equilíbrio dos eutéticos estável e metaestável. Porém nem sempre os elementos a se adicionar vão ter este efeito. Eles podem atuar na distribuição de solutos durante a solidificação, alterando a nucleação e o crescimento das fases sólidas. Para levar em conta o efeito da presença de outros elementos na composição dos ferros fundidos comerciais, um diagrama binário onde o eixo das abscissas representa a variação de uma grandeza que considera a quantidade de C, P e Si e também o poder grafitizante de cada um deles. Esta grandeza é chamada de carbono equivalente e é representada pela fórmula: $CE \text{ (carbono equivalente)} = \%C + \%Si/3 + \%P/3$. (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B, 1979, p.9)

Para o ponto eutético o carbono equivalente seria de 4,3%. A finalidade desta grandeza é determinar a proximidade de uma liga em relação ao ponto

eutético. As ligas hipoeutéticas possuem carbono equivalente abaixo de 4,3% e as ligas hipereutéticas possuem carbono equivalente acima de 4,3%. (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B, 1979, p.9)

4.5.1.1 Ferros fundidos nodulares hipoeutéticos

Os ferros fundidos nodulares hipoeutéticos são ligas que contêm o teor de carbono entre 2,0 e 4,3%. Na solidificação destas ligas ocorre primeiro a formação das dendritas de austenita pobres em carbono. Com a diminuição da temperatura o líquido residual torna – se mais rico em carbono e silício. Após um super resfriamento abaixo da temperatura do eutético estável, formam – se os nódulos de grafita no líquido residual saturado em carbono e silício. Os nódulos de grafita, que são formados a partir do líquido são envolvidos em seguida pela austenita na forma de invólucros e essas células, chamadas de células ou grãos eutéticos crescem até que a reação se complete, quando todo o calor latente de solidificação é liberado. (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B ,1979, p.10)

4.5.1.2 Ferros fundidos nodulares eutéticos

São ligas onde o teor de carbono é de 4,3%. A solidificação desta liga inicia – se após um super – resfriamento abaixo da temperatura do eutético, onde formam – se nódulos de grafita em contato direto com o líquido. Logo após a grafita é envolvida pela austenita que é formada na reação eutética. A reação se completa após liberação do calor latente de solidificação. Nestas ligas, a formação de dendritas de austenita não é desejável, porém como ocorre um super – resfriamento antes da formação dos nódulos de grafita e como os gradientes de temperatura nas peças fundidas são elevados pode haver formação de uma fina rede de dendritas de austenita. (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B , 1977, p.32)

4.5.1.3 Ferros fundidos nodulares hipereutéticos

Nestas ligas, a grafita é a fase primária. Abaixo da temperatura de liquidus hipereutética a grafita nodular precipita – se a partir do banho. Quando sua temperatura cai, a composição fica cada vez mais próxima da eutética. A reação

eutética acontece após determinado super-resfriamento, com formação de mais nódulos de grafita que são em seguida envolvidos pela austenita. Pode ocorrer a formação de dendritas de austenita e pode ser provocada por alterações da composição da peça fundida em algumas regiões onde os solutos podem não estar distribuídos uniformemente, antes de ser processada a reação eutética. (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B, 1977, p.33).

Nos ferros fundidos nodulares também são empregados uma série de elementos de liga. Com o objetivo de se obter dureza e propriedades mecânicas de resistência mais elevada, atingem-se, muitas vezes, propriedades adequadas sem a necessidade de posteriores tratamentos.

A seguir será comentado a influência dos principais elementos de liga em ferros fundidos nodulares

4.5.2 Influência dos elementos de liga

São empregados como elementos de liga em ferros fundidos nodulares o níquel, cobre, estanho, molibdênio. Em teores menores, pode – se utilizar o cromo, o vanádio e o manganês são utilizados, individualmente.

O níquel é considerado um grafitizante médio na solidificação e aumenta o intervalo entre as temperaturas dos eutéticos estável e metaestável. Pode ser considerado também um perlitzante nas transformações do estado sólido elevando os limites de resistência, escoamento, elevando a dureza e diminuindo o alongamento, quando o ferro fundido nodular não sofre posterior tratamento. Porém não se pode considerar seu efeito perlitzante muito pronunciado.

O cobre também é um elemento grafitizante, na solidificação promove a formação da perlita nas transformações do estado sólido. Eleva significativamente limites de resistência e escoamento, da mesma forma eleva a dureza e diminui o alongamento. A elevação das propriedades mecânicas através da utilização do cobre como elemento de liga deve-se ao acréscimo da porcentagem de perlita na matriz e ao endurecimento da ferrita.

O estanho é um elemento perlitzante e permite propriedades mecânicas de resistência e dureza elevadas sendo o material tratado termicamente ou no estado bruto de fusão. Até um teor de 0,2% de estanho ocorre que se atinge um máximo no limite de resistência e para teores superiores a este, ocorre uma

diminuição desta propriedade que pode estar relacionada ao efeito fragilizante deste elemento, porém, a dureza e o limite de escoamento aumentam continuamente.

O molibdênio tem a vantagem de aumentar a resistência mecânica e a dureza consideravelmente, porém, diminui de maneira acentuada a ductilidade. Há porém o inconveniente da formação de carbonetos em seções mais finas das peças. Sua utilização não é aconselhável quando se deseja elevada resistência ao impacto.

O vanádio e o cromo são apreciáveis formadores de carbonetos durante a solidificação, por este motivo, quando se deseja elevar as propriedades mecânicas de resistência dos ferros fundidos nodulares, são preferencialmente utilizados elementos como o níquel, cobre o estanho e o molibdênio. O vanádio e o cromo são utilizados com a finalidade de aumentar a resistência à abrasão em aplicações onde a ductilidade e a resistência ao impacto não precisem ser altas.

4.6 Processos de fabricação dos ferros fundidos nodulares

Para a produção de ferros fundidos nodulares, pequenas adições de Mg (na faixa de 0,1%) são adicionadas aos ferros fundidos, que apresentam de 3% a 4% de C e 1,8 a 2,8% de Si em sua composição base. O magnésio adicionado tem por finalidade desoxidar e dessulfurar o ferro fundido produzido. Este elemento atua através de uma reação violenta que ocasiona fervura então ele é vaporizado e este vapor atravessa o ferro líquido, diminuindo seu teor de enxofre e provocando a formação da grafita esferoidal. O magnésio é como um inibidor de curta duração pois ele retarda a formação inicial da grafita. Então o ferro fundido cinzento se solidifica, inicialmente com formação de cementita e quando é cessada a ação do magnésio a cementita decompõe – se produzindo – se a grafita que se desenvolve por igual em todas as direções dando – lhe a forma esférica.(Vicente Chiaverini, 1982, p.485).

Para produzir os nódulos de grafita de ferro fundido nodular o enxofre e as impurezas de oxigênio do ferro devem ser removidos. Na ausência destas impurezas, se dá o crescimento da grafita esferoidal (Sinha, Anil Kumar,2003, p.335)

As operações mais importantes na elaboração dos ferros fundidos nodulares são o superaquecimento, o tratamento de nodulização e a inoculação.

4.6.1 Superaquecimento

O superaquecimento consiste em se efetuar um aquecimento do metal líquido até uma determinada temperatura e manter a esta temperatura por um determinado intervalo de tempo com o objetivo de destruir os núcleos instáveis do metal líquido diminuindo a susceptibilidade as influencias do emprego de diferentes matérias primas (IPT, p.65, 1977)

A temperatura utilizada no superaquecimento encontra – se geralmente entre 1460 a 1510°C para o ferro fundido cinzento obtidos em fornos elétricos em um intervalo de 5 a 15 minutos. O superaquecimento na fabricação dos ferros fundidos nodulares, possui as mesmas características dos ferros fundidos cinzentos, porém, este tratamento não é comum para o ferro fundido nodular já que comumente são atingidas temperaturas muito altas em seu processo de fabricação. (Adalberto,B de S.S; Carlos, H.C.B,1977, p.66).

O tratamento de nodulização também é parte fundamental na obtenção dos ferros fundidos nodulares e será descrito a seguir.

4.6.2 Tratamento de nodulização

O Objetivo do tratamento de nodularização é modificar a forma da grafita de lamelar para esferoidal. Para este tratamento, utilizam – se elementos como o magnésio e o cério.

Além do magnésio e do cério também existem outros elementos que podem formar nódulos de grafita nas ligas Fe– C– Si. O Ca, Li, Bi, Na, K, Se, Ba, Sr ,Zn ,Sc,Sm ,La ,Al, Si,Y , Te. Porém nem todos geram nódulos de grafita em condições industriais. Comercialmente os elementos utilizados para promover a nodulização são: magnésio, cério e cálcio. O magnésio é o mais utilizado, tanto na sua forma pura quanto como na forma de ligas nodularizantes. O teor residual destes elementos deve ser cuidadosamente observado e não deve exceder a certos limites, especialmente quando se emprega o magnésio como nodulizante, pois pode – se gerar carbonetos na solidificação. Se forem gerados carbonetos, será necessário posterior tratamento térmico para decompor esta fase. Em decorrência do teor elevado de magnésio também podem se formar grafitas degeneradas, tipo *spiky*. (Adalberto,B de S.S; Carlos, H.C.B, 1977, p.84)

Um dos métodos de nodularização consiste em colocar o nodulizante no fundo da panela de vazamento e derramar o metal líquido sobre a liga. Outro método consiste em colocar magnésio sem liga no interior de uma panela, geralmente chamado de panela de nodularização e esta panela é girada fazendo com que o metal líquido escorra sobre o magnésio. Neste trabalho, foi esta técnica utilizada.



Figura 15– Vazamento da liga para a panela de nodularização fonte:Produção da Metalúrgica Riosulense

Na Figura 15, o depósito da liga nodularizante é a parte 1 da panela de nodularização. Na parte 2 é inserido o metal líquido em uma quantidade determinada. A seguir a panela é girada para acontecer a reação de nodularização.

Ocorre uma reação muito forte, como pode ser observado na Figura 16 pelos vapores, onde o magnésio é vaporizado e este vapor atravessa o ferro líquido, diminuindo o teor de enxofre e formando a grafita esferoidal.



Figura 16 – Reação de nodulização dentro da panela.Fonte: Produção da Metalúrgica Riosulense

A seleção do agente nodularizante está condicionada a escolha do processo, quantidade de metal a ser tratado, temperatura de tratamento, forno de

fusão. Deve levar em consideração o impacto no custo final do produto, satisfazer as especificações do produto final e considerações ambientais. (SOCIESC, 2002, p.74)

4.6.3 Tratamento de inoculação

A inoculação em ferros fundidos é um tratamento efetuado pouco antes do vazamento, com a adição de compostos de ação grafitizante que contém geralmente alto teor de silício.

Os objetivos do tratamento de inoculação são: evitar a tendência ao coquilhamento, ou seja, a formação de ferro fundido branco, com a finalidade de aumentar a aptidão à formação da grafita tipo A.; obter uma estrutura homogênea na peça, apesar das condições de resfriamento variáveis em função das espessuras; e obter melhores propriedades de utilização dos ferros fundidos. A inoculação facilita a produção de peças de ferro fundido de qualidade superior utilizando baixo carbono equivalente, apesar da tendência de formação de ferro fundido branco. (Drumond, P.P; et al.,1987, p.10)

Os inoculantes podem ser à base de grafita, ou seja, são uma mistura de pós de grafita e de partículas finas de ferro – silício ou à base de ferro – silício. São utilizados na inoculação de ferros fundidos hipo e hipereutéticos e tem grande eficácia na redução de coquilhamento. O ferro silício comum é bastante utilizado para inocular os ferros fundidos de grafita lamelar e de grafita esferoidal. Quanto mais impurezas contiver (cálcio, alumínio, etc...) maior é seu poder inoculante. O ferro silício em adições especiais tem forte poder de inoculação, são utilizados na inoculação de ferros fundidos de grafita lamelar de elevadas características mecânicas e nos ferros fundidos de grafita esferoidal. (Drumond, P.P; et al., 1987, p.10)

Alguns inoculantes têm suas particularidades como o silício – cálcio que tem a desvantagem de produzir escórias difíceis de separar. O alumínio presente em inoculantes com Silício mesmo em quantidades baixas provoca inclusões de escórias e formação de bolhas.

Para a inoculação ser eficiente o teor de carbono deve estar próximo de 3% .

O teor de silício que contém o inoculante vai interferir no cálculo do silício final.Por isso deve-se levar em conta a composição inicial. Usualmente a

quantidade de silício acrescentada varia entre 0,2 a 0,8% em peso. O teor de fósforo adicionado deve ser o mais baixo possível. (Drumond, P.P; et al.,1987, p.12)

Enfim, a eficiência de um inoculante depende do tipo e quantidade de inoculante, composição do metal, temperatura de inoculação, granulometria, tempo de adição e solidificação, estado da superfície do banho e técnicas de adição.

4.6.3.1 Tipos de inoculantes utilizados.

Os inoculantes utilizados para a fabricação dos ferros fundidos nodulares podem ser de três tipos: inoculantes à base de grafita, à base de ferro silício comum e à base de ferros silícios em adições especiais.

Os inoculantes a base de grafita são eficientes na redução do coquilhamento. São utilizados em ligas hipo e hipereutéticas, quando não se deseja uma melhora nas propriedades mecânicas. São constituídos de pós de grafita e, de partículas finas de ferro-silício ou de inoculante a base de ferro silício.

O ferro-silício comum é normalmente utilizado para inocular ferros fundidos cinzentos de grafita lamelar e, ferros fundidos de grafita esferoidal. Quanto maior a quantidade de impurezas maior será seu poder de inoculação. Estas impurezas podem ser o cálcio, alumínio, etc. (Drumond, P.P; et al., 1987,p. 10).

Existem também os ferros-silício para adições especiais. Estas ligas têm um forte poder de inoculação e, são utilizadas em ferros fundidos cinzentos de grafita lamelar e de grafita esferoidal. Podem ser utilizados em pequenas proporções devido a presença dos elementos de adição, reduzindo o aumento do teor de silício obtido na adição de inoculantes. (Drumond, P.P; et al.,1987, p. 10).

Alguns inoculantes grafitizantes comuns são Ferro-Silício 50%(47,5% Si, 0,2% Ca, 1,3% Al), Ferro – Silício 75% (75% Si, 25% Fe) e Silicieto de cálcio(62,5% Si, 32% Ca, 1,1% Al).

Como grafitizantes especiais podemos citar o Cálcio – Silício (57,5% Si, 14% Ca, 1% Al) , Silício – terras raras (50% Si, 2,5% Ca, 4,25%Al, terras raras 31, 5%) e o Ca – Si – Ti (52,5% Si, 6%Ca,1%Al , 10%Ti). Inoculantes estabilizadores perlizantes podem ser Silicieto de cromo (40% Si, 0,1%Al, 43% Cr e 0,05%C), Cromo – Silício – Manganês (18% Si, , 0,8% Ca, 0,2% Al, 40% Cr, 10% Mn, 0,25% Ti).(SOCIESC, p.75, 2002)

4.6.3.2 Quantidade de inoculante

Quando se aumenta a quantidade de inoculante no banho metálico, observa-se um aumento de sua eficiência. Porém há um limite para esta adição, a partir da qual seu efeito passa a ser praticamente desprezível. (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B ,1977, p.70)

4.6.3.3 Temperatura de inoculação

De um modo geral, o inoculante deve ser misturado no metal líquido a uma temperatura que varia de 1450 a 1550°C. Em seguida o metal deve ser resfriado para atrasar a redissolução dos germes formados. Se o fundido for mantido a uma temperatura muito elevada, uma faixa aproximada de 1500 a 1550°C após o tratamento o efeito do inoculante pode ser limitado e se operar o tratamento de inoculação a temperaturas muito baixas, defeitos como heterogeneidades na estrutura (presença de cementita livre em grande proporção), bolhas ou alimentação defeituosa podem ser causados.

4.6.3.4 Composição do metal

A composição do metal é outro fator relevante quando se trata da eficiência dos inoculantes. A inoculação se torna interessante quando os ferros fundidos são de boa qualidade com baixo teor de carbono e silício. O teor de carbono deve estar próximo a 3% e o teor de silício deve ser coerente com a espessura da peça fundida. Deve-se levar em conta o efeito da inoculação e o teor de silício deve ser relativamente baixo antes deste procedimento. Deve-se cuidar o teor de fósforo, utilizando em teores tão baixos quanto possíveis. Os teores de enxofre no ferro fundido também afetam a inoculação.

A adição de 0,1% de ferro-silício contendo estrôncio ou bário resulta numa maior redução de coquilhamento quando o teor em enxofre for superior a 0,04%. Entretanto, inoculantes à base de silício com notado teor de cálcio, magnésio ou cério conservam a sua eficácia mesmo quando o teor em enxofre for inferior a 0,04%.(Drummond, P.P; et al,1987, p.12).Nos fornos a indução, o teor de enxofre fornecido pelos aços das cargas tem teores entre 0,03 a 0,04%.

Para que a inoculação seja eficiente deve – se seguir pelo menos uma das três condições:

- Utilizar um inoculante que tenha elevado teor de cálcio, cério ou magnésio, como exemplo o sílico-cálcio;
- aumentar a proporção do inoculante quando este for pobre em oligo – elementos;
- aumentar o teor de enxofre no fundido, até aproximadamente 0,06%.

Com proporções baixas de enxofre, pode-se utilizar inoculantes a base de grafita. Os resultados obtidos são satisfatórios. (Drumond, P.P; et al, 1987, p. 12).

4.6.3.5 Granulometria

A granulometria do inoculante deve ser controlada pois as partículas tem que ser suficientemente pequenas para que se tenha rápida dissolução e suficientemente grandes para que não se oxidem ou flutuem. Algumas recomendações são que na panela de transferência o tamanho deve estar entre 0,2 a 0,4mm, na panela de vazamento de 0,4 a 2,0mm, no jato no molde deve ser de 0,1 a 0,6mm e no molde de 0,1 a 0,4mm. (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B, 1977, p.71).

Outro fator que também influencia na eficiência do inoculante é a técnica de inoculação utilizada. Os três métodos utilizados são inoculação na panela, inoculação no jato de enchimento do molde e inoculação no molde. A seguir será descrito cada um dos três métodos de inoculação e sua influência sobre o fundido.

4.6.3.6 Técnicas de inoculação

A adição do inoculante nos ferros fundidos nodulares é sempre feita após o tratamento de nodularização.

Existem três práticas de inoculação: na panela, no jato de enchimento do molde e no molde. O que difere estes três métodos é o tempo que passa entre o instante da inoculação e o da solidificação do metal no molde. Obviamente na panela este tempo é maior. (Drumond, P.P; et al, 1987, p.13.)

A inoculação na panela pode ser feita por vários métodos. Pode-se colocar o inoculante no jato de ferro fundido durante o enchimento da panela,

introduzir na panela ainda vazia ou com pouca quantidade de metal, injeção no metal da panela com auxílio de um gás, diluir no metal já escoriado, diluir o inoculante em uma pequena quantidade de metal e depois misturar com o resto de metal, imersão com um sino. (Drummond, P.P; et al,1987, p.14)

Alguns processos industriais envolvem transferência de metal líquido entre panelas durante o vazamento. Assim é importante que se faça uma inoculação parcelada dos compostos grafitizantes ou se adicione estes materiais somente na transferência para a panela de vazamento com o intuito de minimizar o tempo de fadiga do inoculante. (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B,1977, p.73)

A Inoculação no jato de metal pode ser feita pelo polvilhamento do inoculante no jato de metal durante o vazamento no molde, também pode – se projetar o inoculante em pó sobre as paredes do funil de vazamento ou colocar um inoculante de pequena granulometria num tubo de metal que é mantido no jato de metal durante o vazamento no molde. Outra forma é introduzir um tarugo de inoculante num tubo fixado na panela, a extremidade do tarugo fica no bico da panela e se dissolve no jato de metal durante todo o tempo de vazamento. É um tipo de adição que tem pouca influência sobre a análise química, mas é eficiente para modificar a estrutura, geralmente, é utilizado este método como complemento da inoculação na panela. (Drummond, P.P; et al,1987, p.15)

A Inoculação no molde, também chamada de pós-inoculação, pode ser feita com a colocação de pedaços de inoculantes no canal de descida, colocar o inoculante como forma de macho ou de pastilha em uma cavidade especial do canal de distribuição, polvilhar o inoculante nas paredes da cavidade do molde nos lugares mais adequados. Geralmente, as ligas utilizadas na pós inoculação são a base de ferro – silício com pequeno teor de cálcio com intuito de evitar formação de escórias no molde.

A eficácia do processo de inoculação no molde está ligada à velocidade de enchimento do molde, à concepção do sistema de canais, à temperatura de vazamento do metal, pois se a temperatura for alta demais há uma rápida dissolução do inoculante e as últimas partes do molde não são corretamente inoculados o que resulta numa heterogeneidade de estruturas entre as várias partes da peça.(Drummond, P.P; et al,1987, p.16)

Um ponto importante na inoculação é a taxa a ser utilizada. Deve – se dar atenção à taxa para evitar a inoculação excessiva, provocando defeitos e aumento no custo da peça.

4.6.3.7 Taxa de inoculação

Pode – se ter uma variação de 0,5% a 0,7% na taxa de inoculação levando em conta a espessura da peça, tipo de moldagem, a composição do fundido, a técnica de inoculação e as especificações requeridas. No entanto, a eficácia da inoculação depende do tipo de inoculante utilizado. Recomenda – se realizar alguns ensaios antes de determinar a taxa de inoculação a ser praticada. (Drumond, P.P; et al, 1987, p.17)

Recomenda – se controlar a eficácia do tratamento de inoculação. Este controle pode ser feito através da retirada de três corpos de prova para análise. Um corpo de prova antes do tratamento, um corpo de prova após o tratamento e corpos de prova de coquilhamento onde a redução da altura entre os corpos de prova antes e depois do tratamento denota a eficácia da inoculação.

Pode – se controlar também através de análise térmica onde a curva de solidificação eutética de resfriamento do corpo de prova é modificada pela inoculação. (Drumond, P.P; et al, 1987, p.17)

A prova de coquilha consiste no vazamento de cunhas de dimensões padronizadas em moldes onde as paredes laterais são de areia e o fundo é uma chapa metálica chamada de coquilha. O molde destas cunhas também poder ser confeccionados totalmente em areia ou totalmente metálicos. A medida das dimensões, ou seja, a altura em que se formou o ferro fundido branco, ou branco e mesclado permite avaliar a eficiência da inoculação (Adalberto, B de S.S; Carlos, H.C.B,1977, p.75,).

Em tarugos escalonados podem ser efetuados ensaios micrográficos, ensaios de dureza e ensaios de tração com o intuito de avaliar a eficácia da inoculação. Para uma determinada espessura do corpo de prova geralmente é comprovado um aumento do número das células eutéticas, redução de zonas de grafita tipo D, aumento da resistência à tração e pouca modificação de dureza. (Drumond, P.P; et al, 1987, p.19)

4.6.3.8 Tempo de fadiga do inoculante

O efeito da inoculação no fundido desaparece com o tempo e pode ser constatado por meio de ensaios de coquilhamento. Quando a inoculação for eficaz, a altura de coquilhamento é bastante reduzida.

O prolongamento do efeito do inoculante varia conforme o inoculante utilizado, a temperatura de adição e de manutenção, a composição química base e a temperatura de superaquecimento. Este efeito pode ser percebido após o tratamento, no máximo de dois a três minutos. Entre 10 a 12 minutos este efeito permanece estável e desaparece totalmente após 20 a 30 minutos. O tempo de fadiga do inoculante exige que as peças sejam vazadas logo após o tratamento. (Drumond, P.P; et al,1987, p.13)

5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste item estão relacionados os equipamentos e materiais utilizados para a realização do experimento.

5.1 Equipamentos e materiais utilizados

- Ferramental em madeira
- Moldes em areia Pep – Set
- 4 Pesos para lastragem de 25 kg cada um;
- Forno à indução marca Traisait Box com capacidade para 1000Kg ;
- Ferro gusa
- Retorno de FN 50
- Sucata de aço
- Sucata de Cobre
- Grafite Unicarbo 80
- Inoculante IMSR 75%
- Inoculante Calcium bearing
- Medida de Inoculação
- Pirômetro de imersão marca Raytec, modelo Raynger ST6LXB
- painéis de vazamento com capacidade para 70 Kg
- painel de tratamento de nodularização com capacidade de 220 Kg
- Talhas capacidade 3000 Kg
- Espectrômetro de emissão óptica Spectro Lab, capacidade de leitura de até 28 elementos
- Jato de granalha de aço
- Retífica manual Yadoya, modelo RG 280
- Lixadeira Maxiplan
- Lixa 150 mesh, 320 mesh, 600 mesh, e 1200 mesh
- Feltros para polimento
- Politriz Maxiplan
- Alumina Metalprisma granulometria de 4 micrometros;
- Microscópio Óptico Olympus modelo BX 60 resolução máxima 1000 X, acoplado a uma câmera Sony modelo Hyper HD.

- Durômetro Volpert, medida em Brinell, carga 187,5 Kg, esfera diâmetro 2,5mm
- Vidro de relógio
- Nital 3% e 4%.
- Álcool etílico;
- Secador Steinel, 1450W.
- Durômetro HPO 3000 HBW 5,0 para dureza na superfície;
- Esmerilhadeira elétrica Bosch
- morsa para fixação das peças
- Torno mecânico Riosulense TR 1000
- Máquina Universal de Tração marca Heckert capacidade máxima 20 toneladas

5.2 Metodologia

5.2.1 Desenvolvimento das atividades

Foi escolhido o corpo de prova escalonado, pois no experimento a intenção foi avaliar as propriedades dos diferentes inoculantes e diferentes locais de inoculação em espessuras variadas.

As espessuras foram identificadas como parte fina, média e grossa e suas medidas são respectivamente de 13,5 mm, 26 mm e 51 mm. Primeiramente foi projetado e confeccionado o ferramental em madeira de acordo com a figura 17.

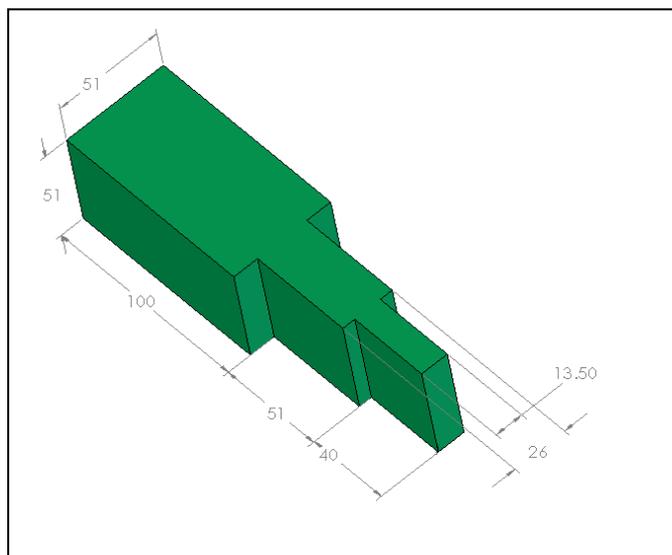


Figura 17: Desenho do corpo de prova escalonado. Fonte: O autor.

Após a confecção do ferramental foram moldados os corpos de prova.

A liga GGG 50 foi utilizada para a fabricação dos corpos de prova fundidos, já que é comumente utilizada em grande variedade de peças. Para a fabricação dos corpos de prova, foi utilizada uma carga de 1000 kg de ferro fundido nodular da classe DIN 1693 – GGG 50 A carga foi calculada e fundida observando-se os parâmetros do processo como temperatura de superaquecimento, composição química do banho metálico, tempo de fusão, temperatura de tratamento de nodularização. No método de inoculação no jato o inoculante foi inserido no jato de metal da panela de nodularização para a panela de vazamento. No método com pós inoculação, foi inserido mais inoculante no jato da panela de vazamento para o molde. Depois que foram vazados os corpos de prova, os mesmos foram desmoldados após 90 minutos do vazamento. As peças foram desmoldadas manualmente e com o auxílio de alicates, os corpos de prova foram identificados e seguiram para quebra de canal.

As peças foram então esmerilhadas e posteriormente preparadas para a análise metalográfica, o ensaio de tração e de dureza (na superfície e dureza no núcleo).

5.2.2 Confecção do ferramental

O ferramental foi confeccionado em madeira, devido à baixa demanda de utilização. Em peças com alta demanda, os ferramentais podem ser em madeira, revestidos com resina, em alumínio ou até mesmo ferro fundido. As dimensões foram definidas de acordo com corpos de prova padrões utilizados pelo Centro Tecnológico de Fundição do Senai de Itaúna – MG no curso Técnico em Fundição conforme figura 17.

5.2.3 Moldagem do corpo de prova

O corpo de prova utilizado no experimento foi moldado por processo de cura a frio – Pep Set, onde se utiliza areia, resina e catalisador, com moldagem manual, onde é colocado areia na cavidade do ferramental e realizado uma compactação com as mãos até preencher a cavidade. Foi passado uma régua para

nivelar o canal de entrada da areia. Na figura 18 é apresentado o molde preparado a partir do ferramental construído.

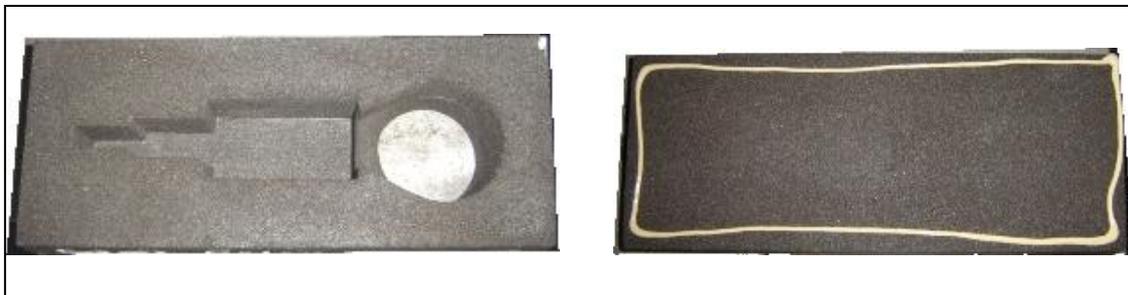


Figura 18: Parte superior e inferior do molde. Fonte: produção da Metalúrgica Riosulense S/A.

A cura do molde foi realizada em temperatura ambiente. O molde foi extraído do ferramental de madeira e em seguida limpo com ar comprimido e colado para que na hora do vazamento ele não abra. A resistência do molde aumenta progressivamente em até 12 horas.

Após colado, o molde foi lastrado com dois pesos de 25 Kg cada um para promover uma colagem mais eficiente e evitar a abertura do mesmo durante o vazamento. Cada molde ficou por aproximadamente 12 horas secando, pois as peças seriam vazadas somente no dia seguinte, porém a secagem da cola se dá aproximadamente 2 horas após a moldagem.

5.2.4 Cálculo de carga

Foi elaborado o cálculo de carga objetivando uma composição química que atenda as propriedades mecânicas do material. O forno utilizado tem a capacidade de fundir 1000 Kg de metal. Na carga foi colocado ferro Gusa Nodular com baixo silício, grafite Unicarbo 80, sucata de aço, retorno de GGG 50 e Sucata de cobre.

Nos anexos 1 e 2 encontram-se os certificados de análise química do Ferro Gusa Nodular de baixo silício e grafite Unicarbo 80, respectivamente. As quantidades utilizadas na preparação da carga estão listadas na Tabela 2.

Tabela2: Materiais utilizados na elaboração da carga

Material	Quantidade (Kg)
Ferro Gusa Nodular baixo silício	500,0
Sucata de Aço baixo Mn	138,8
Retorno GGG 50	360,0
Grafite Unicarbo 80	4,9
Sucata de Cu	1,2

Fonte: O autor

5.2.5 Fusão da Liga

A fusão da liga no forno ocorreu em aproximadamente 60 minutos. Após a fusão, foi retirado um corpo de prova, conforme Figura 19, para análise química no espectrômetro de emissão ótica. O corpo de prova para análise foi vazado na produção, e em seguida lixado para limpar a área onde foi feita a análise.

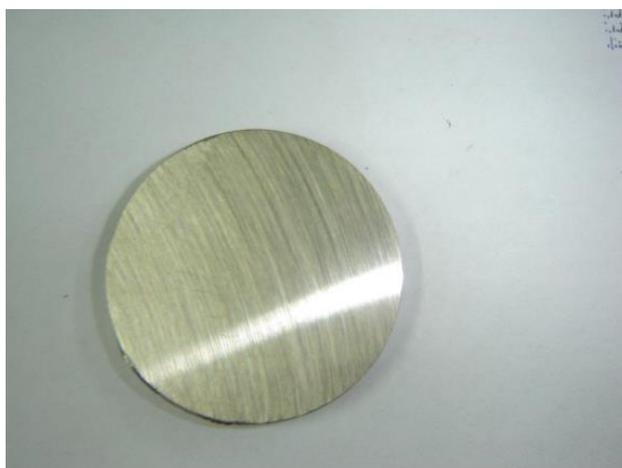


Figura 19 : Corpo de prova de análise química. Fonte: Produção Metalúrgica Riosulense

Também foi feito um corpo de prova de seção retangular, conforme Figura 20 para identificar a altura de coquilhamento, ou seja, ver quanto de ferro fundido branco se formou. Estes dois tipos de corpos de prova foram retirados a uma temperatura de 1453 °C. Após a análise química do corpo de prova da fusão, foram feitas as correções no metal fundido. A análise química do fundido após as correções é apresentada na Tabela 3. Os valores apresentados correspondem a faixa de utilização.

Tabela 3: Faixa de composição química especificada para elementos base da carga metálica.

Elemento	Mínimo (%)	Máximo (%)
C	3,400	3,900
Si	2,300	2,900
Mn	0,010	0,600
Cu	0,010	0,600
P	0,000	0,080
S	0,000	0,020
Mg	0,025	0,090

Fonte: O autor.

Na Figura 20 é apresentado os corpos de prova retirados antes e após a correção química da carga. Verificou – se que o coquilhamento diminuiu após feita a correção da carga. A região coquilhada está indicada.



Figura 20: Diferença de coquilhamento após e antes da correção do banho. Fonte: produção da Metalúrgica Riosulense

O metal então foi superaquecido a uma temperatura de 1514°C.

O superaquecimento consiste em elevar o metal a temperaturas mais altas, o que provoca no resfriamento a formação de uma grafita menor e mais refinada devido à homogeneização do banho e criação de centros efetivos para a nucleação da grafita.

Após todas as etapas da fusão estarem completas foi realizado o tratamento de nodularização.

5.2.6 Tratamento de nodularização

Este tratamento é feito para promover a alteração da morfologia da grafita de lamelar para grafita esferoidal utilizando uma liga nodularizante de Ferro Silício Magnésio de 8 a 10 % . O certificado de análise química desta liga encontra – se no anexo 3.

Em uma panela específica para este tipo de tratamento com capacidade de 220 Kg é inserido de 0,8% a 1,0 % de liga nodularizante, dependendo da composição química do banho, temperatura do metal e tempo de vazamento. O tratamento de nodularização foi feito com o metal a uma temperatura de 1570°C.

Foi colocada a liga nodularizante no fundo da panela e por cima desta liga, foi colocado aproximadamente 1% de sucata de aço como cobertura da liga, com o intuito de retardar a velocidade da reação no processo de nodularização. A inserção desta liga nodularizante foi feita por um tubo que vai até o fundo da panela conforme figura 21



Figura 21: Inserção da liga nodularizante no fundo da panela de nodularização. Fonte: produção da Metalúrgica Riosulense SA

Depois de colocada a liga e a sucata de aço, foi transferido o metal para a panela que foi girada para acontecer a reação de nodularização. Após o tratamento de nodularização foi realizado a inoculação da liga.

5.2.7 Tratamento de inoculação.

Os inoculantes utilizados neste tratamento foram Calcium Bearing e IMSR 75% cujos certificados de análise química encontram-se no anexo 4 e 5 deste trabalho. A granulometria dos inoculantes foi de 0,2 x 2,0 mm. Nas tabelas 4 e 5 encontram-se detalhadas as faixas de composição química dos inoculantes Calcium Bearing e IMSR 75%, respectivamente.

Tabela 4: Faixa de composição química do inoculante Calcium Bearing.

Elemento	Mínimo (%)	Máximo (%)
Silício	74	79
Cálcio	0,8	1,2
Alumínio	0,5	1,0

Fonte: O autor

Tabela 5: Faixa de composição química do inoculante IMSR 75%

Elemento	Mínimo(%)	Máximo (%)
Silício	74,0	79,0
Estrôncio	0,80	1,20
Cálcio	0,00	0,10
Alumínio	0,00	0,50

Fonte: O autor

A principal diferença entre estes dois inoculantes é o elemento estrôncio que é encontrado no IMSR 75%. Este elemento promove um potente efeito de nucleação retardando o a perda de efeito do inoculante, como também forma sulfetos com menor desajuste do arranjo cristalino em comparação com a grafita.

Segundo o boletim técnico deste inoculante que consta no anexo 6, este tem sido reconhecido como o que proporciona uma maior diminuição do coquilhamento por peso adicionado durante o vazamento.

A taxa de inoculação foi de 0,6% do peso de metal líquido contido na panela de vazamento em todos os corpos de prova. Para o experimento em questão foram preparadas quatro amostragens, com variações no tipo de inoculante e também na forma de inoculação.

Dois corpos de prova, um com cada tipo de inoculante, ou seja, um com Calcium Bearing e um com IMSR 75% foram inoculados somente no jato de metal da panela de nodularização para a panela de vazamento. Este método é chamado de inoculação no jato e é mostrado na figura 22.



Figura 22: Técnica de inoculação no Jato. Fonte: Produção da Metalúrgica Riosulense.

Os outros dois corpos de prova com os mesmos tipos de inoculantes receberam o mesmo tratamento de inoculação, porém, no jato de metal da panela de vazamento para o molde, receberam mais 0,10% de inoculante em cada corpo de prova, método este que também é chamado de pós inoculação e é mostrado na figura 23.



Figura 23 : Técnica de pós inoculação. Fonte: produção da Metalúrgica Riosulense SA

5.2.8 Desmoldagem dos corpos de prova

A desmoldagem dos corpos de prova ocorreu em aproximadamente 94 minutos após o vazamento dos mesmos. Este tempo é necessário para que todas as transformações de fases já tenham sido completadas, para que não ocorra interferência nas propriedades mecânicas da peça.

A desmoldagem manual foi executada com o auxílio de alicates para a retirada da areia.

5.2.9 Acabamento dos corpos de prova

O peso total do corpo de prova juntamente com o sistema de alimentação e enchimento foi igual a 6 Kg.

Foram cortados os canais dos corpos de prova, e em seguida foram retiradas as rebarbas e colocados em um jato de granalha para retirar o excesso de areia aderida ao metal.

5.2.10 Ensaio de dureza na superfície

A verificação da dureza foi feita na superfície do corpo de prova escalonado em três espessuras diferentes.

Esta medida de dureza na superfície foi feita no durômetro HPO 3000 com esfera de tungstênio de 5 mm de diâmetro e carga máxima de 750Kg conforme norma NBR NM 187-1. A dureza foi medida em cada secção do corpo de prova .

5.2.11 Preparação de amostras para análise

Os corpos de prova foram seccionados em três partes cada um, com o objetivo de se avaliar as diferentes espessuras.

Destas três partes foram retiradas um corpo de prova para análise metalográfica e verificação de dureza no núcleo e outro corpo de prova para a tração preparado de acordo com a norma NBR ISO 6892. Foram cortadas duas amostras para cada espessura do corpo de prova escalonado.

Os corpos de prova para análise metalográfica e dureza no núcleo foram retificados em uma retífica manual da marca Yadoya. Após a retificação, as amostras foram lixadas e polidas em uma politriz utilizando um feltro para polimento lubrificado com alumina de 4 micrometros.

5.2.12 Contagem de nódulos

A contagem de nódulos foi feita segundo a norma NBR 6913 que prescreve o método para contagem de nódulos de grafita em ferros fundidos nodulares utilizando microscópio e corpo de prova preferencialmente não atacado.

Para a contagem de nódulos foi utilizada a ampliação de 100 vezes e utilizado um corpo de prova devidamente polido. O método utilizado para a contagem de nódulos foi o MB 1512 que utiliza lentes oculares com retículos. Para a determinação da quantidade de nódulos por mm^2 contou – se os esferóides situados no interior do retículo em seis campos visuais, ou seja, foram realizadas seis contagens. O resultado apresentado é a média de 6 contagens.

5.2.13 Ensaio de dureza no núcleo

Para verificar a dureza no núcleo foi utilizado um durômetro Volpert com uma carga de 187,5 Kg e esfera de tungstênio de 2,5mm de diâmetro.

As medidas de dureza foram realizadas segundo norma NBR NM 187-1 que especifica o método de medição de dureza Brinell para materiais metálicos. Foram medidos três pontos de dureza em cada amostra

5.2.14 Ensaio Metalográficos

Os corpos de prova foram preparados conforme descrito no item 2.2.10, atacados com nital a 3% com o intuito de revelar as microestruturas presentes.

O equipamento utilizado para a metalografia foi um microscópio Olympus modelo BX 60 resolução máxima 1000 X, acoplado a uma câmera Sony modelo Hyper HD. Foi observado a quantidade de ferrita e perlita presente na matriz comparando com o efeito do resfriamento nas diferentes secções dos corpos de prova.

5.2.15 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado conforme norma NBR ISO 6892 Para este ensaio foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca Heckert, modelo EDZ – 20 com capacidade máxima de 20 toneladas e corpos de prova para tração conforme figura 24.

O corpo de prova utilizado é do tipo M8 e o comprimento base inicial para o cálculo do alongamento foi de 25 mm.



Figura 24 :Corpo de prova utilizado para tração.Fonte: Produção da Metalúrgica Riosulense SA

Os corpos de prova foram usinados no torno riosulense TR 1000 conforme especificações da NBR ISO 6892.

6 RESULTADOS

6.1 Resultados obtidos no processo prático utilizando a técnica de inoculação no jato.

6.1.1 Resultados obtidos nos ensaios de dureza na superfície e no núcleo

Os resultados obtidos com o ensaio de dureza no núcleo do corpo de prova e dureza na superfície estão descritos nas tabelas 6 e 7 , respectivamente.

Tabela 6 – Valores obtidos nos ensaios de dureza no núcleo na técnica de Inoculação no jato

Inoculante	Localização	Medida 1 (HB)	Medida 2 (HB)	Medida 3 (HB)
IMSR 75%	Parte fina	184	180	187
	Parte média	195	191	191
	Parte grossa	187	184	187
Calcium Bearing	Parte fina	191	191	195
	Parte média	195	191	191
	Parte grossa	195	191	195

Fonte: O autor

Tabela 7 - Valores obtidos no ensaio de dureza na superfície na técnica de Inoculação no jato

Inoculante	Localização	Medida (HB)
IMSR 75%	Parte fina	169
	Parte média	170
	Parte grossa	169
Calcium Bearing	Parte fina	169
	Parte média	177
	Parte grossa	169

Fonte: O autor

6.1.2 Resultados obtidos no ensaio de tração

A partir dos ensaios de tração também foram obtidos os valores de alongamento e escoamento do material. O resultado do ensaio de tração está descrito na tabela 8.

Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de tração na técnica de Inoculação no jato

Inoculante	Localização	Tração (N/mm ²)	Alongamento (%)	Escoamento (N/mm ²)
IMSR 75%	Parte fina	548	13,7	284
	Parte Média	574	11,3	389
	Parte grossa	542	12,7	379
Calcium Bearing	Parte fina	558	13,5	421
	Parte Média	579	10,2	398
	Parte grossa	576	12,7	399

Fonte: O autor

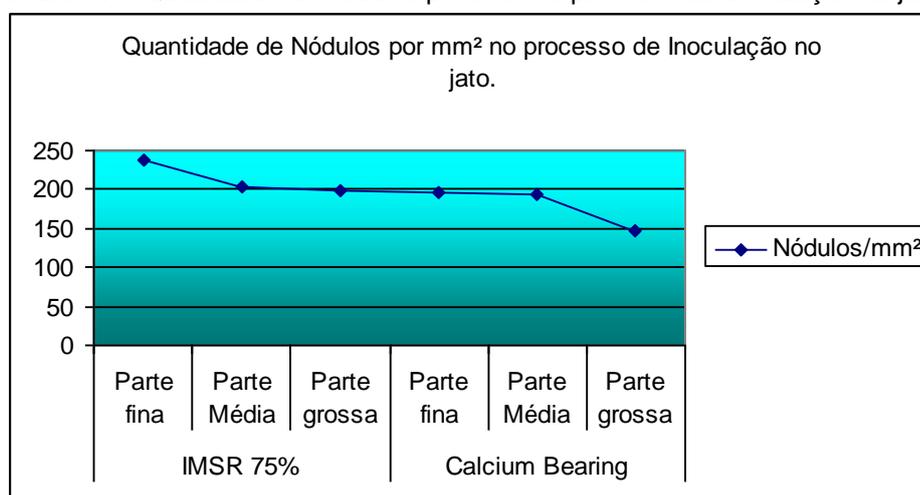
6.1.3 Resultados obtidos nos Ensaio Metalográficos

Os resultados obtidos no ensaio de grau de nodularização estão descritos na tabela 9

Tabela 9: Valores obtidos no ensaio de grau de nodularização na técnica de Inoculação no jato

Inoculante	Localização	Nódulos/mm ²
IMSR 75%	Parte fina	237
	Parte Média	203
	Parte grossa	198
Calcium Bearing	Parte fina	195
	Parte Média	193
	Parte grossa	147

Fonte: O autor

Gráfico 1 – Quantidade de nódulos por mm² no processo de Inoculação no jato

Nas figuras 25 e 26 pode – se verificar as micrografias evidenciando o grau de nodularização dos corpos de prova.

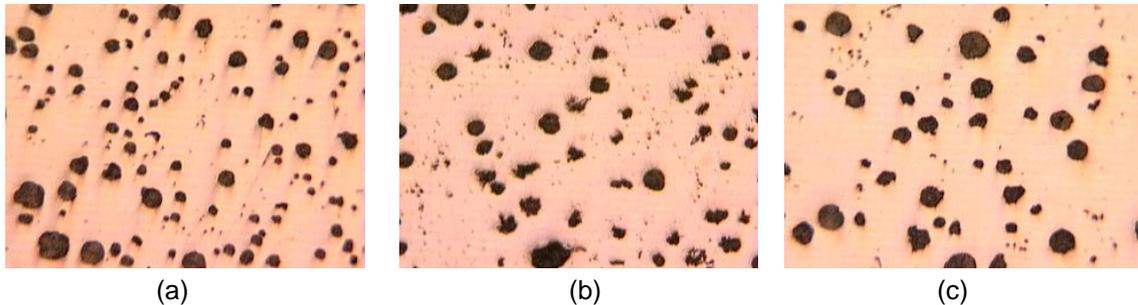


Figura 25 – grau de nodularização parte fina (a), média (b) e grossa (c) respectivamente, na técnica de inoculação no jato, utilizando inoculante IMSR 75%.100X. Sem ataque.

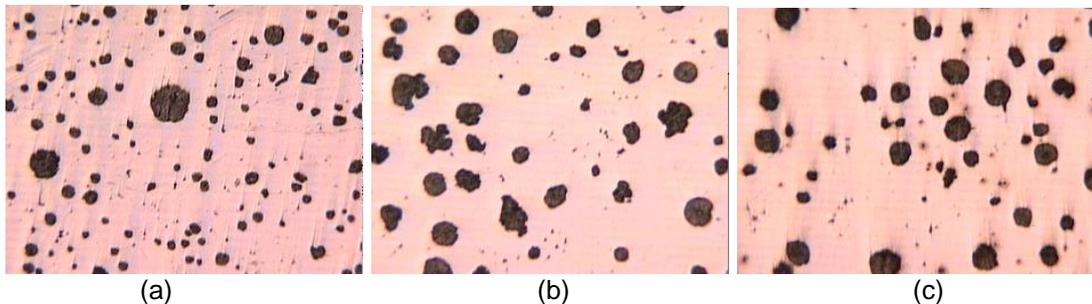


Figura 26 – grau de nodularização parte fina (a), média (b) e grossa (c) respectivamente, na técnica de Inoculação no jato, utilizando inoculante Calcium Bearing.100X. Sem ataque.

Nas figura 27 e 28 pode – se observar as micrografias obtidas na análise da matriz dos corpos de prova.

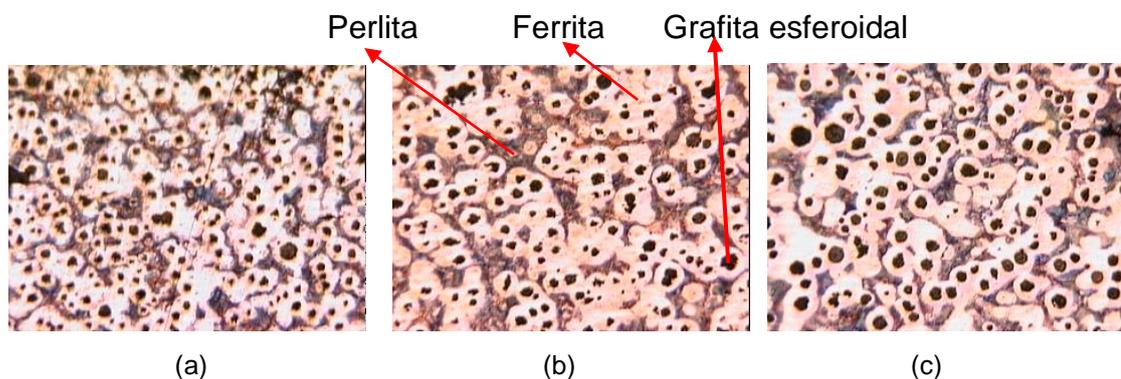


Figura 27 – Matriz parte fina (a), média (b) e grossa (c), respectivamente, na técnica de inoculação no jato, utilizando inoculante IMSR 75%. Ataque: Nital 3%. 100X

As peças inoculadas com IMSR 75% quando atacadas com nital 3%, apresentaram uma matriz ferrítica com aproximadamente 40% de perlita. Todas as

matrizes foram analisadas utilizando um padrão visual comparativo interno da empresa, fornecido pela Montadora Mercedes, feito por um analisador de imagem.

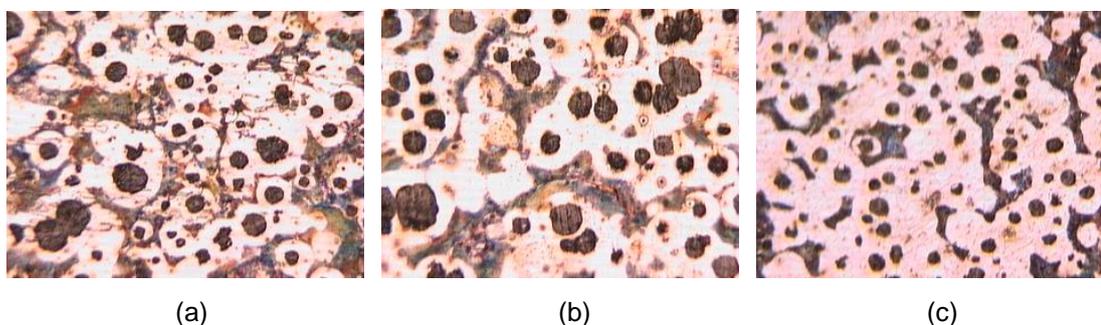


Figura 28 – Matriz parte fina (a), média (b) e grossa (c), respectivamente, na técnica de Inoculação no jato, utilizando inoculante Calcium Bearing. Ataque: Nital 3%. 100X

As peças inoculadas com Calcium Bearing quando atacadas com nital 3% apresentaram uma matriz ferrítica. A parte fina apresentou aproximadamente 40% de perlita, bem como a parte média. A parte grossa apresentou 30% de perlita.

6.2 Resultados obtidos no processo prático utilizando o método de pós inoculação

6.2.1 Resultados obtidos nos ensaios de dureza na superfície e no núcleo

Os resultados obtidos com os ensaios de dureza no núcleo dos corpos de prova e dureza na superfície estão descritos nas tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 – Valores obtidos no ensaio de dureza no núcleo na técnica de pós inoculação

Inoculante	Localização	Medida 1 (HB)	Medida 2 (HB)	Medida 3 (HB)
IMSR 75%	Parte Fina	187	191	191
	Parte Média	187	195	191
	Parte grossa	184	195	187
Calcium Bearing	Parte Fina	187	184	187
	Parte Média	187	187	187
	Parte grossa	191	187	184

Fonte: O autor

Tabela 11 - Valores obtidos no ensaio de dureza na superfície na técnica de pós inoculação

Inoculante	Localização	Medida (HB)
IMSR 75%	Parte fina	161
	Parte Média	169
	Parte grossa	169
Calcium Bearing	Parte fina	170
	Parte Média	167
	Parte grossa	167

Fonte: O autor

6.2.2 Resultados obtidos no ensaio de tração

Os valores do ensaio de tração obtidos para os corpos de prova nesta técnica de inoculação estão descritos na tabela 12. Juntamente com os valores de tração também estão descritos os valores de alongamento e escoamento, obtidos a partir do ensaio de tração.

Tabela 12 – Valores obtidos no ensaio de tração na técnica de pós inoculação

Inoculante	Localização	Tração (N/mm ²)	Alongamento (%)	Escoamento ((N/mm ²))
IMSR 75%	Parte fina	542	12	298
	Parte Média	569	14,3	380
	Parte grossa	555	13,9	383
Calcium Bearing	Parte fina	522	14	344
	Parte Média	558	14,5	380
	Parte grossa	540	10,8	384

Fonte: O autor

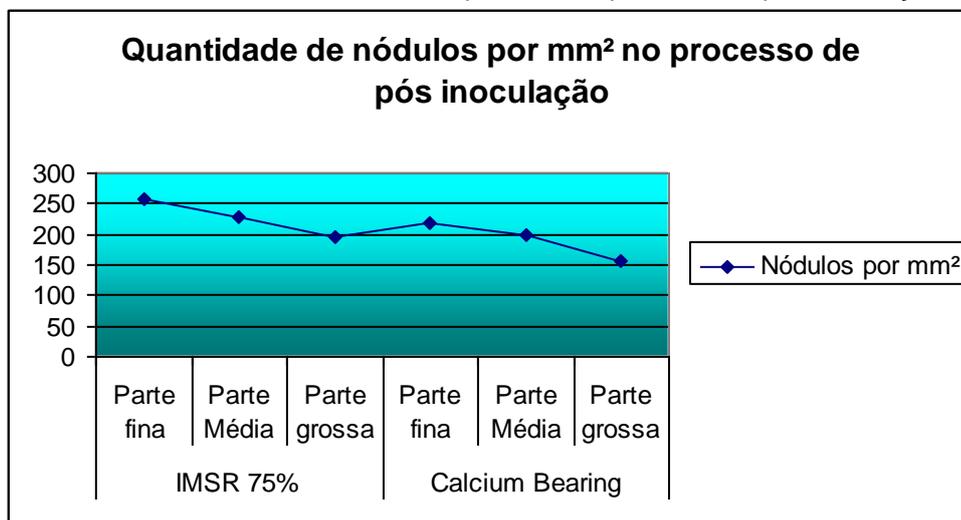
6.2.3 Resultados obtidos nos ensaios metalográficos

Na tabela 13 estão descritos os resultados obtidos no ensaio de grau de nodularização.

Tabela 13: Valores obtidos no ensaio de grau de nodularização na técnica de pós inoculação

Inoculante	Localização	Nódulos/mm ²
IMSR 75%	Parte fina	256
	Parte Média	228
	Parte grossa	197
Calcium Bearing	Parte fina	218
	Parte Média	199
	Parte grossa	155

Fonte: O autor

Gráfico 2 – Quantidade de nódulos por mm² no processo de pós inoculação

Nas figuras 29 e 30 pode – se observar as micrografias evidenciando o grau de nodularização das peças.

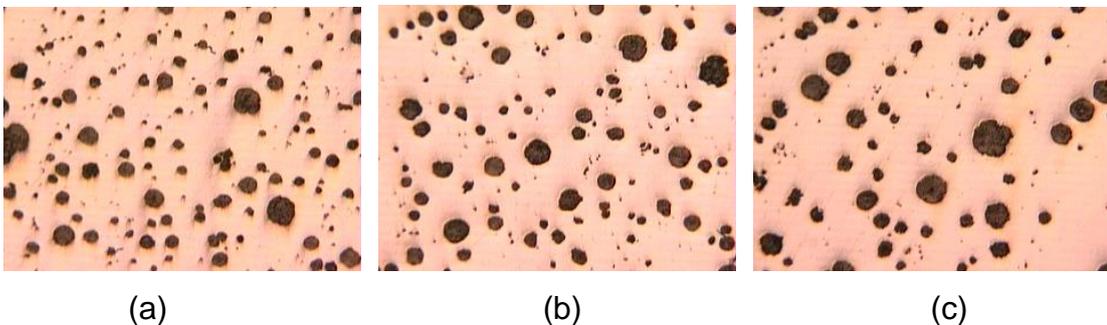


Figura 29 – grau de nodularização parte fina (a), média (b) e grossa (c) respectivamente, na técnica de pós Inoculação, utilizando inoculante IMSR 75%.200X. Sem ataque.

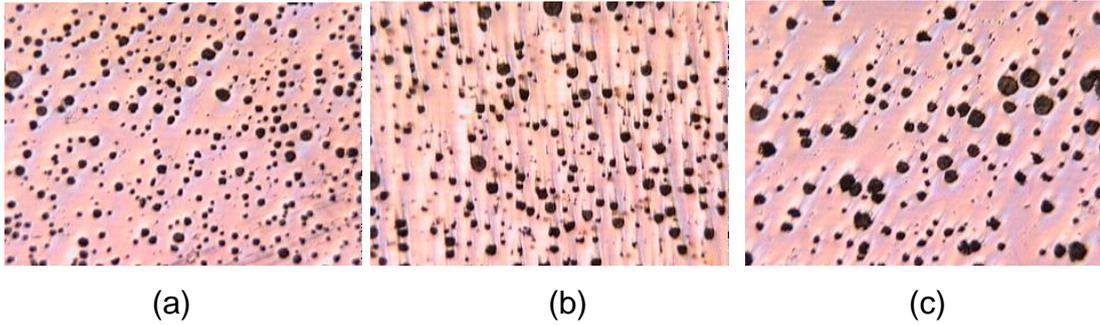


Figura 30 – grau de nodularização parte fina (a), média (b) e grossa (c) respectivamente, na técnica de pós inoculação ,utilizando inoculante Calcium Bearing.100X.Sem ataque.Fonte: O autor.

Nas figuras 31e 32 são mostradas as matrizes reveladas dos corpos de prova.

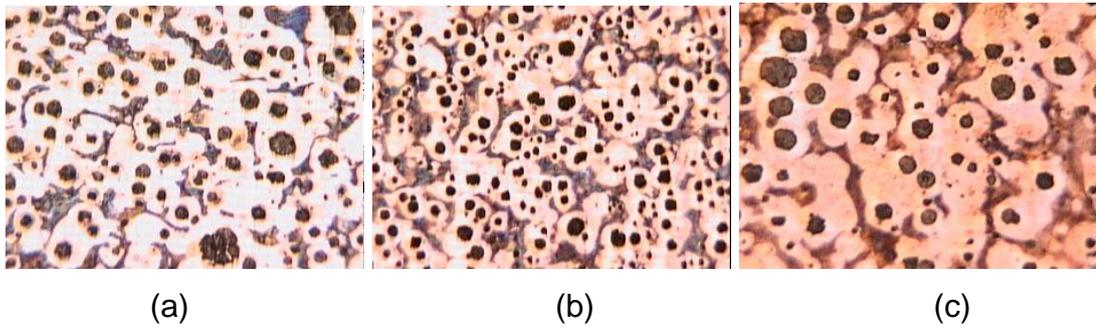


Figura 31 – Matriz parte fina (a), média (b) e grossa (c), respectivamente, na técnica de pós inoculação, utilizando inoculante IMSR 75%. Ataque: Nital 3%. 200X

Quando as peças foram atacadas com nital 3%, observou – se a presença de uma matriz ferrítica. A matriz da parte fina apresentou 20% de perlita. Na parte média e grossa os valores quantificados de perlita foram os mesmos, 30%.

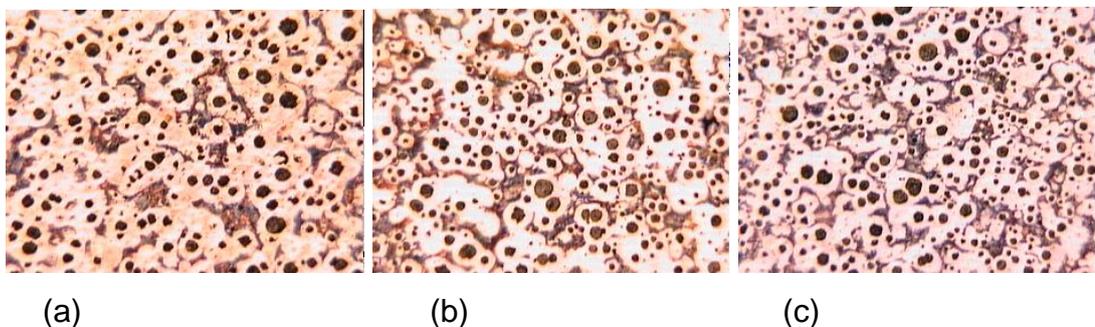


Figura 32 - Matriz parte fina (a), média (b) e grossa (c), respectivamente, na técnica de pós inoculação, utilizando inoculante IMSR 75%. Ataque: Nital 3%. 100X

Nas peças atacadas com nital 3%, observou – se a presença de uma matriz ferrítica. A matriz da parte fina apresentou 20% de perlita. Na parte média e grossa os valores quantificados de perlita foram os mesmos,40%.

7 DISCUSSÕES

Na tabela 14 estão relacionados os resultados obtidos com os diferentes ensaios realizados.

Tabela 14: Resultados obtidos no experimento

		Processo de inoculação no jato						Processo de inoculação no jato com pós inoculação					
		IMSR 75%			Calcium Bearing			IMSR 75%			Calcium bearing		
		Fina	Média	Grossa	Fina	Média	Grossa	Fina	Média	Grossa	Fina	Média	Grossa
Dureza sup (HB)		169	170	169	169	177	169	161	169	169	161	169	169
Dureza média núcleo (HB)		183,5	193	185,5	187	193	190	185,5	193	189	185,5	187	187,5
Resist. Tração (N/mm ²)		548	574	542	558	579	576	542	569	555	522	558	540
Escoamento (N/mm ²)		284	389	379	421	398	399	298	380	383	344	380	384
Alongamento (%)		13,7	11,3	12,7	13,5	10,2	12,7	12	14,3	13,9	14	14,5	10,8
Nódulos por mm ²		237	203	198	195	193	147	256	228	197	218	199	155
Matriz	Ferrita	60	60	60	60	60	70	80	70	70	60	60	80
	Perlita	40	40	40	40	40	30	20	30	30	40	40	20

7.1 Discussão dos resultados obtidos no processo de inoculação no jato.

Pelos resultados listados na tabela 22, pode – se observar que a dureza na superfície e no núcleo apresentam resultados maiores na parte média e menores na parte fina e grossa respectivamente tanto para o inoculante IMSR 75% quanto para o inoculante Calcium Bearing. Isto aconteceu possivelmente, porque a parte grossa foi a última a solidificar devido a ligação com o sistema de massalotes, dificultando a extração de calor e apresentando uma estrutura mais grosseira. Na parte fina, apesar de ter uma alta taxa de extração de calor, a dureza menor se justifica pelo alto grau de núcleos de grafita .

A resistência à tração apresentou resultados maiores na parte média e menores na parte fina e grossa, tanto no inoculante calcium bearing quanto no IMSR 75%. Porém os resultados obtidos com o calcium bearing foram superiores aos resultados obtidos com o IMSR 75%. Possivelmente, aconteceu um endurecimento da ferrita por solução sólida, devido ao silício apresentar – se mais alto nas amostras vazadas com Calcium Bearing do que as vazadas com inoculante IMSR 75%.

Quanto ao escoamento os resultados maiores foram nas peças vazadas com inoculante Calcium Bearing do que os resultados obtidos nas peças vazadas com inoculante IMSR 75%. Isto se deu possivelmente, porque as peças que apresentam silício alto em sua composição química, no caso do corpo de prova inoculado com calcium bearing tendem a apresentar maiores resultados nos ensaios de escoamento.

O alongamento apresentou melhores resultados nas partes finas e nas partes grossas do que os resultados obtidos na parte média, observando também que para o inoculante IMSR 75% foi mais eficiente que para o inoculante Calcium Bearing. Isto aconteceu possivelmente porque em todos os resultados onde se observa dureza e resistência a tração mais alta, conseqüentemente há uma queda no percentual de alongamento. Esta tendência acontece devido a uma interrelação entre a matriz metálica e grau de nucleação obtido.

O número de nódulos por mm² apresentou maiores resultados para as espessuras finas e médias do que na parte grossa e também demonstrou que o inoculante IMSR 75% pode ter um maior poder de nucleação do banho visto que este apresentou um maior número de nódulos por mm² que o inoculante calcium bearing. A diferença na quantidade de nódulos nas espessuras também pode se dar devido a uma maior extração de calor nas secções menos espessas.

7.2 Discussão resultados obtidos no processo de inoculação no jato com pós inoculação no molde

As durezas na superfície e no núcleo apresentam resultados bem próximos para os dois tipos de inoculantes. Porém dentro destes resultados foi observado que as partes finas apresentaram durezas inferiores. Possivelmente, o percentual de 0,6% de inoculante que foi utilizado foi eficiente independente do método de inoculação utilizado para as espessuras mais finas.

A Resistência à tração apresentou resultados maiores na peça média e menores na peça fina e grossa, tanto para o inoculante calcium bearing quanto para o IMSR 75%. O inoculante IMSR 75% apresentou melhores resultados em todas as espessuras. Na parte média, a extração de calor foi igual para todas as

condições. Consequentemente apresentou uma matriz mais homogênea, com tamanhos de nódulos mais uniformes, diferentemente da parte fina e grossa que tiveram velocidades de extração de calor diferentes.

O escoamento apresentou resultados maiores nas peças vazadas com inoculante calcium bearing do que os resultados obtidos nas peças vazadas com inoculante IMSR 75%. Porém percebe – se uma pequena variação com os resultados obtidos entre os dois tipos de inoculantes utilizados. Isto possivelmente ocorreu devido ao percentual de Si usado para esta liga foi superior ao necessário, visto que o elemento Si possui o tamanho do átomo diferente do ferro, o que cria um campo de tensões em torno deste átomo do soluto, e este campo de tensões interage com a discordância atuando como elemento substitucional aumentando a resistência da liga.

Para o alongamento, todos os resultados analisados apresentaram resultados satisfatórios visto que apresentaram resultados superiores aos desejados para um GGG 50, observando também que as partes médias em ambos os inoculantes apresentaram melhores resultados que as partes finas e grossas.

O número de nódulos por mm^2 apresentou maiores resultados e menor diferença de nódulos por mm^2 entre as espessuras com o uso do inoculante IMSR 75%. Porém observa – se que a quantidade de nódulos por mm^2 encontrada no corpo de prova inoculado com calcium bearing é menor do que a obtida com o IMSR 75%, visto também que no inoculante calcium bearing as diferenças de nódulos encontradas entre as partes fina e grossa são bastante significativas. A explicação para este resultado pode vir do fato do inoculante IMSR 75 % apresentar um maior poder de nucleação do que o inoculante Calcium Bearing.

8 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, durante os procedimentos experimentais realizados pode – se concluir que:

- Todos os resultados obtidos no alongamento atendem as especificações técnicas para a obtenção do GGG 50, porém é importante ressaltar que foi obtido valores maiores no processo de inoculação no jato com pós inoculação no molde.

- As peças vazadas com o inoculante calcium bearing, apresentaram maior limite de escoamento, portanto não atingiram a faixa específica para a obtenção do GGG 50.

- Os valores de dureza obtidos, não tiveram considerável variação, ficaram dentro do especificado na norma DIN 1693.

- A resistência à tração apresentou todos os resultados conforme a especificação. A variação entre a resistência a tração máxima e a mínima obtida entre os processos demonstra que no processo de inoculação no jato com pós inoculação no molde utilizando o inoculante IMSR 75% apresentou uma menor variação nos resultados obtidos.

Após a análise dos resultados obtidos constatou – se que o processo de inoculação no jato com pós inoculação no molde apresenta maior número de nódulos por mm² e melhor homogeneidade na distribuição dos nódulos em relação ao processo de inoculação no jato.

REFERÊNCIAS

- [1] METALÚRGICA RIOSULENSE. **Histórico, Industrial, Comercial**. Disponível em: <http://www.riosulense.com.br/>. Acesso em junho de 2006.
- [2] WILLIAN, D. C. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 2002. p. 251-255.
- [3] CARMO, D. J; et al. **Guia Micrográfico dos Ferros Fundidos**. Itaúna: SENAI/MG – CEFET. 1995. p. 12-33.
- [4] ADALBERTO , B. DE S. S.;CARLOS,H.C.B.**Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares**.Instituto de Pesquisas tecnológicas do Estado de São Paulo S/A.1977.p.
- [5] DRUMOND, P.P;et al. **Ferros Fundidos de Grafita Lamelar**.Itaúna: SENAI/MG – CEFET.1987.p 10-41
- [6] [3] CHIAVERINI, **Aços e Ferros Fundidos**.Associação Brasileira de Metais.1982.p.22-36;425-490.
- [7] **ELKEN ASA, Foundry Products Division**. De acordo com a Norma EN ISO 945.
- [8] SINHA, A. K.**Physical Metallurgy Handbook**.MCGrawn – Hill Handbooks, 2003.p.335-343.
- [9] SOCIESC – CAPACITAÇÃO EMPRESARIAL. **Metalurgia Básica**.2002.