



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE FUNDIÇÃO SOBRE A FORMAÇÃO
DE MICROESTRUTURAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR DE ALTO
IMPACTO A BAIXA TEMPERATURA E AS SUAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS: ESTUDO DE CASO, SIMISA FUNDIÇÃO**

LUIS HENRIQUE DE AZEVEDO REMIGIO

Orientador:

Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho

Recife – PE

2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE FUNDIÇÃO SOBRE A FORMAÇÃO
DE MICROESTRUTURAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR DE ALTO
IMPACTO A BAIXA TEMPERATURA E AS SUAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS: ESTUDO DE CASO, SIMISA FUNDIÇÃO**

LUIS HENRIQUE DE AZEVEDO REMIGIO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Recife – PE
2013

Catálogo na fonte

Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- R387i Remigio, Luis Henrique de Azevedo.
Influência dos parâmetros de fundição sobre a formação de microestruturas em ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura e as suas propriedades mecânicas: estudo de caso, Simisa Fundição / Luis Henrique Azevedo Remigio – Recife: O Autor, 2013.
113f. il., figs., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.
Inclui Referências e Anexos.
1. Engenharia Mecânica. 2. Fundição. 3. Ferro Fundido Nodular . 4. Propriedades Mecânicas de Tração. 5. Propriedades Mecânicas de Impacto. 6. Ensaio de Tração. 7. Ferro DIN EM 1563-1998, EM-GJS-400-18LT. I. Urtiga Filho, Severino Leopoldino (Orientador). II. Título.

“INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE FUNDIÇÃO SOBRE A
FORMAÇÃO DE MICROESTRUTURAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR
DE ALTO IMPACTO A BAIXA TEMPERATURA E AS SUAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS: ESTUDO DE CASO, SIMISA FUNDIÇÃO”

LUIS HENRIQUE DE AZEVEDO REMÍGIO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E
FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
VICE-COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DR. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO (UFPE)

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ (UFPE)

Prof. Dr. NICOLAU APOENA CASTRO (UFRN)

“O que faz andar o barco não é a vela enfunada, mas o vento que não se vê.”

Platão

AGRADECIMENTOS

Á Deus, pela saúde, equilíbrio, paz e harmonia.

À minha esposa, Juliana Quintella Remigio, companheira, dedicada e guerreira, que sempre acreditou no meu potencial e sempre esteve ao meu lado, minha eterna parceira.

Aos meus filhos, Luis Henrique Filho e Leonardo Remigio, que são minha fonte de energia, minha descontração e minha alegria. Estes dois, são meus eternos amigos, companheiros, que me enchem de orgulho o tempo inteiro.

A todos os membros de minha família, minha mãe, Célia e irmãos, André e Mônica, que tenho certeza de que estão felizes por minha conquista;

Ao meu orientador Severino Leopoldino Urtiga Filho, pelo apoio, suporte e dedicação, pela perseverança, paciência e palavras de incentivo;

Aos meus amigos de trabalho, da Simisa, foram tantos que torceram e me ajudaram que fica difícil não reconhecer todo o suporte que me foi dado, desde o analista Carlos do Laboratório, o Engº. Itamar Rodrigues ao Diretor Engº. Antonio Balau, que me compartilharam suas opiniões, ensinamentos e experiências;

A todas as pessoas que não citei, mas que me ajudaram, colaboraram e me incentivaram.

RESUMO

A fundição é uma das mais antigas formas de beneficiamento do ferro e suas ligas e as mais utilizadas no mundo são o ferro cinzento, o ferro nodular e o aço, respectivamente. O ferro fundido nodular, em especial, vem crescendo ao longo dos anos, principalmente por apresentar propriedades mecânicas intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o aço. Um dos grandes setores que vem crescendo nos últimos anos, são as fontes alternativas de energia e dentro deste setor o segmento de energia Eólica. Na realidade, este segmento consome muitos componentes em ferro fundido nodular, porém trata-se de uma liga especial, onde as propriedades mecânicas de tração e impacto desta liga torna este ferro fundido nodular capaz de substituir os componentes em aço fundido e o mais importante é que estas propriedades devem ser atendidas com o fundido na sua condição de bruto de fundição.

Este trabalho, realizado na fundição Simisa, teve a finalidade de analisar os parâmetros de fundição sobre a formação de microestruturas em ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura e suas propriedades mecânicas.

Neste trabalho foram realizados experimentos dentro da indústria e em ordem de grandezas representativas em termos de espessura de parede, dimensões e peso. Os experimentos foram realizados com o objetivo de validar quais são os principais parâmetros de processo que assegurem as propriedades mecânicas de tração e impacto da liga em questão. Foram realizadas análises químicas, metalográficas, ensaios de tração, impacto e dureza, para cada experimento, assim como foram definidos os principais parâmetros de processo em termos de tempo e temperatura de vazamento e composição química, que influenciam nas propriedades mecânicas de tração e impacto da liga.

Como conclusão, os resultados mostraram que para atender os requerimentos da norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT , a matriz 100% ferrítica é fundamental e que é extremamente importante analisar tanto o número de nódulos como a nodularidade, assim como a velocidade de resfriamento e o percentual de silício visto que foi verificado que estes parâmetros influenciam diretamente nos valores de resistência e impacto.

Palavras – chave: ferro fundido nodular, alto impacto e baixa temperatura, ensaio de tração, bruto de fundição, DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT .

ABSTRACT

The foundry is one of the oldest ways of iron processing and its alloys and the most used in the world are gray iron, ductile iron and steel, respectively. The nodular cast iron, this one in particular, has been growing over the years, mainly by presenting intermediate mechanical properties between cast iron and steel. One of the major sectors that have been growing in recent years are the alternative sources of energy and within this sector, the Wind Energy segment. In fact, this segment consumes many components in nodular cast iron, but, this is a special alloy, where the mechanical properties of tensile and impact, makes this nodular cast iron, can replace cast steel components and the most important, is that these properties must be met with the casting on the as-cast condition.

This study, developed at Simisa foundry, had the purpose to analyze the casting parameters on the microstructure formation of nodular cast iron, high-impact and low temperature and mechanical properties.

In this work, experiments were performed within the industry and in order of magnitudes representative in terms of thickness, dimensions and weight.

The experiments were done in order to validate which are the main process parameters to ensure the mechanical properties of tensile and impact in the alloy in question.

Chemical analyzes, metallographic, tensile, impact and hardness were performed for each experiment as well as defined the main process parameters in terms of pouring time and temperature and chemical composition, which influence the mechanical properties of tensile and impact in the alloy.

In conclusion, the results showed that to meet the requirements of DIN EN 1563-1998, EN-GJS-LT 400-18, the 100% ferritic matrix is essential, and that is extremely important to analyze both the number of nodules as the nodularity, as well as the cooling speed and the percentage of silicon since it was found that these parameters directly influence the values of resistance and impact.

Keywords: ductile iron, high impact and low temperature, tensile test, as cast, DIN EN 1563-1998, EN-GJS-LT 400-18.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	01
1. INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos	05
1.1.1 Objetivo Geral	05
1.1.2 Objetivos Específicos	05
1.2 Justificativa e Relevância	06
 CAPÍTULO II	 09
2. REVISÃO DE LITERATURA	09
2.1. Ferro Fundido	09
2.1.1 Ferro Fundido Nodular	11
2.1.2 Ferro Fundido Nodular de Alto Impacto e Baixa Temperatura	17
2.2. Solidificação do Ferro Fundido Nodular	21
2.3. Influência da velocidade de resfriamento nas propriedades mecânicas	25
2.4. Influência da composição química nas propriedades mecânicas	27
2.5. Influência da grafita nas propriedades mecânicas	33
2.6. Resistência ao Impacto de Ferros Fundidos Nodulares	43
2.7. Elaboração de Metal Líquido	48
2.8. Nodulização	50
2.9. Inoculação	60
 CAPÍTULO III	 67
3. MATERIAIS E MÉTODOS	67
3.1. Descrição dos Experimentos	67
3.2. Análise Química	70
3.3. Análise das Propriedades Mecânicas de Tração	71
3.4. Análise das Propriedades Mecânicas de Impacto	72
3.5. Análise Microestrutural	73

CAPÍTULO IV	74
4. Resultados e discussão.....	74
4.1 Corrida#1	74
4.2 Corrida#2.....	79
4.3 Corrida#3.....	84
4.4 Corrida#4	91
 CAPÍTULO V	102
5. Conclusão	102
 CAPÍTULO VI	104
6. Sugestões para trabalhos futuros	104
 CAPÍTULO VII	105
7. Referências Bibliográficas	105
 CAPÍTULO VIII	111
8. Anexos	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção Mundial de Fundidos.....	01
Figura 2: Produção de Fundidos nas Américas.....	01
Figura 3: 05 maiores produtores de fundido no mundo.....	02
Figura 4: Fundição de uma peça.....	04
Figura 5: Forno a Arco Elétrico.....	04
Figura 6: Projeto de fundição de uma peça.....	04
Figura 7: Evolução da capacidade instalada de geração eólica de eletricidade no mundo.	06
Figura 8: Evolução tecnológica das turbinas eólicas comerciais.....	07
Figura 9: Crescimento da morfologia da grafita.....	12
Figura 10: Fluxo de fabricação de ferro fundido	13
Figura 11: Comportamento mecânico dos diversos ferros em comparação ao aço	15
Figura 12: Nódulo de grafita examinada com iluminação de campo claro	15
Figura 13: Nódulo de grafita examinada com luz polarizada cruzada.....	15
Figura 14: Nódulo de grafita examinada com luz polarizada.....	16
Figura 15: Nódulo de grafita examinada com MEV	16
Figura 16: Metalografia de um ferro fundido nodular ferrítico.....	16
Figura 17: Vista de uma torre eólica.....	17
Figura 18: Seção transversal de uma torre eólica.....	17
Figura 19: Foto de um Cubo(HUB) de uma turbina eólica	18
Figura 20: Diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono.....	22
Figura 21: Ampliação do diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono.....	23
Figura 22: Curva de esfriamento de um ferro fundido nodular	24
Figura 23: Efeito dos elementos de ligas sobre as temperaturas eutéticas	30
Figura 24: %Mn recomendado para uma liga com 2,5%Si	32
Figura 25: Linhas de tensão nas lamelas ou nódulos de grafita.....	33
Figura 26: Classificação da forma de grafita no ferro fundido nodular	34
Figura 27: Fator de esfericidade.....	35
Figura 28: Classificação segundo o fator de esfericidade	35
Figura 29: Nodularidade em quatro níveis	36
Figura 30: Tamanho de grafita esferoidal.....	37

Figura 31: Padrão comparativo de número de nódulos, 75 nódulos/mm ²	39
Figura 32: Padrão comparativo de número de nódulos, 100 nódulos/mm ²	39
Figura 33: Padrão comparativo de número de nódulos, 125 nódulos/mm ²	40
Figura 34: Padrão comparativo de número de nódulos, 150 nódulos/mm ²	40
Figura 35: Padrão comparativo de número de nódulos, 175 nódulos/mm ²	41
Figura 36: Padrão comparativo de número de nódulos, 200 nódulos/mm ²	41
Figura 37: Efeito da quantidade de perlita na resistência ao impacto	44
Figura 38: Efeito do teor de carbono no teste de impacto	45
Figura 39: Efeito do número de nódulos de grafita no teste de impacto	46
Figura 40: Influência da nodularidade da grafita no teste de impacto	47
Figura 41: Influência do teor de silício no teste de impacto.....	47
Figura 42: Influência do teor de fósforo no teste de impacto.....	48
Figura 43: Temperatura de equilíbrio e temperatura de formação de CO	50
Figura 44: Processo de nodulização, Sanduíche	53
Figura 45: Processo de nodulização, Tundish Cover	54
Figura 46: Processo de nodulização realizado No Molde	55
Figura 47: Processo de nodulização, No Molde	55
Figura 48: Formas degeneradas de grafita	57
Figura 49: Influência da temperatura de espera na perda do magnésio	59
Figura 50-a: Núcleo da partícula de um complexo de sulfetos e óxidos	62
Figura 50-b: Representação esquemática do núcleo da partícula	62
Figura 51: Influência da temperatura de inoculação no número de nódulos	64
Figura 52: Vazamento de metal líquido.....	68
Figura 53: Nodulização	68
Figura 54: Inoculação	68
Figura 55: Espectrômetro	71
Figura 56-a: Dimensão do corpo de prova	71
Figura 56-b: Dimensão do corpo de prova de tração, para usinagem.....	71
Figura 57: Laboratório metalurgico da Simisa, máquina de ensaio de tração	72
Figura 58: Dimensão do corpo de prova de impacto, para usinagem	72
Figura 59: Máquina de impacto	73
Figura 60: Laboratório metalurgico da Simisa, microscópios	73
Figura 61: Metalografia da Corrida#1.....	77
Figura 62: Metalografia da Corrida#2.....	82

Figura 63: Metalografia da Corrida#3.....	88
Figura 64: Metalografia da Corrida#4.....	94
Figura 65: Valores de resistência a tração e impacto das corridas	97
Figura 66: Análises metalográficas das corridas#1,2,3 e 4	97
Figura 67: Gráfico de correlação entre impacto e resistência a tração	98
Figura 68: Gráfico de correlação entre impacto e percentual de silício.....	99
Figura 69: Validação da equação de regressão entre Impacto e Silício com as curvas de influência do teor de silício no teste de impacto com entalhe em V.....	100
Figura 70: Gráfico de tendência de alongamento e impacto	101
Figura 71: Gráfico de correlação entre impacto e alongamento.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela de Seleção de Materiais	14
Tabela 2: Tabela das propriedades mecânicas de tração da Norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18-LT	18
Tabela 3: Tabela das propriedades mecânicas de impacto da Norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18-LT	19
Tabela 4: Tabela das propriedades mecânicas de tração por espessura de parede do fundido da Norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18-LT	19
Tabela 5: Tabela das propriedades mecânicas de impacto por espessura de parede do fundido da Norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18-LT	19
Tabela 6: Tabela de %Carbono e %Silício recomendada para ferros nodulares de média liga a não ligado	32
Tabela 7: Dimensão linear da grafita.....	37
Tabela 8: %Si recomendado para obtenção do número de nódulos, no ferro nodular não ligado	43
Tabela 9: Tipos de processo de nodulização	51
Tabela 10: Comparativo entre os principais processos de nodulização	52
Tabela 11: Variáveis do processo de inoculação	62
Tabela 12: Temperaturas de processo.....	70
Tabela 13: Especificação química da liga da Corrida#1.....	74
Tabela 14: Especificação química do gusa e da sucata da Corrida#1	75
Tabela 15: Composição química da Corrida#1	76
Tabela 16: Resultado do ensaio de tração da Corrida#1	78
Tabela 17: Resultado do ensaio de impacto da Corrida#1.....	78
Tabela 18: Especificação química do gusa e da sucata da Corrida#2	80
Tabela 19: Composição química da Corrida #2	81
Tabela 20: Resultado do ensaio de tração da Corrida#2	83
Tabela 21: Resultado do ensaio de impacto da Corrida#2.....	84
Tabela 22: Especificação química da liga da Corrida#3.....	85
Tabela 23: Especificação química do gusa e da sucata da Corrida#3	86
Tabela 24: Composição química da Corrida#3	87
Tabela 25: Resultado do ensaio de tração da Corrida#3	89
Tabela 26: Resultado do ensaio de impacto da Corrida#3.....	89

Tabela 27: Resultado do segundo ensaio de tração da Corrida#3.....	90
Tabela 28: Especificação química da liga da Corrida#4.....	92
Tabela 29: Especificação química do gusa e da sucata da Corrida#4	92
Tabela 30: Composição química da Corrida#4	93
Tabela 31: Resultado do ensaio de tração da Corrida#4	95
Tabela 32: Resultado do ensaio de impacto da Corrida#4.....	96
Tabela 33: Resultado das Corridas	96
Tabela 34: Resultado dos percentuais de silício e impacto.....	99
Tabela 35: Resultado dos percentuais de alongamento e impacto	101

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: % de austenita	22
Equação 2: % de líquido	22
Equação 3: $L \rightarrow$ austenita + grafita	22
Equação 4: Austenita $\rightarrow$ ferrita + grafita	23
Equação 5: Austenita $\rightarrow$ ferrita+cementita(perlita)	23
Equação 6: Carbono Equivalente	31
Equação 7: Grau de Saturação	31
Equação 8: Fator de Esfericidade	35
Equação 9: Nodularidade	36
Equação 10: Calculo do número de nódulos.....	38
Equação 11: Temperatura de transição dúctil-frágil	45
Equação 12: Redução do óxido de silício	49
Equação 13: Correlação entre impacto e resistência a tração	98
Equação 14: Correlação entre impacto e percentual de silício.....	99

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

AFS – *American Foundry Society*

ASM- *American Society for Metals*

ASTM- *American Society for Testing and Materials*

EN – *European Standard*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABM – Associação Brasileira de Materiais

ABIFA – Associação Brasileira de Fundição

CTG- Centro de Tecnologia e Geociências

DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

Ferro- α – Ferrita

Fe₃C – Cementita

Perlita – Ferro- α + Fe₃C

FoFo – Ferro Fundido

Temperatura *Líquidus* – Temperatura na qual o primeiro sólido se forma durante a solidificação.

Temperatura *Solidus* – Temperatura abaixo da qual todo o líquido esta completamente solidificado.

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

MET - Microscópio eletrônico de transmissão

LISTA DE UNIDADES E SÍMBOLOS

% - por cento

Kg/mm² – quilograma por milímetro quadrado

N/mm² – newton por milímetro quadrado

RT – resistência á tração

RE – resistência ao escoamento

A - alongamento

HB – dureza brinell

Nod./mm² – nódulos por milímetro quadrado

Mm – milímetro

J – joules

1 N = 1 Mpa

MPa – mega pascal

1 kg/mm² = 9,806 MPa

C - Carbono

Si – Silício

Mn – Manganês

P – Fósforo

S – Enxofre

Cr – Cromo

Ni – Níquel

Mo – Molibdênio

Al – Alumínio

Cu – Cobre

Sn – Estanho

Sb – Antimônio

Mg – Magnésio

V - Vanádio

W - Tungstênio

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A fundição é uma indústria de base que remete aos tempos da evolução da humanidade, no qual um dos seus primeiros registros foi um sino da antiga China a mais de 5000 anos.

Como indústria de base, a fundição sempre será demandada, uma vez que na seleção de um processo de manufatura, ela se torna viável tanto para peças de geometria complexas como para pequenas peças, como fundição de precisão (microfusão) ou para as grandes peças, fundição sob encomenda. Foi a partir desta indústria de base, que muitas outras indústrias foram erguidas.

Segundo Koshiba (apud Cintia Castro e Luiz Antonialli 2005, p.62)

[...] A Revolução Industrial não teria acontecido sem o desenvolvimento da metalurgia. E isso porque toda sociedade industrial deve contar tanto com o funcionamento do setor de produção de bem de consumo quanto do setor de produção de bens de capital, voltado para a produção de máquinas e equipamentos industriais.

Em se tratando de fundição, as ligas mais utilizadas no mundo ainda são: 1º ferro cinzento e 2º ferro nodular, observado na figura-1, segundo o 46º Censo Anual da Produção Mundial de Fundição, publicado em dezembro de 2012 pela revista Modern Casting.

Fig.-1. Produção Mundial de Fundidos em tons, revista Modern Casting, Dez.2012.

World Totals									
Gray Iron	Ductile Iron	Malleable Iron	Steel	Copper Base	Aluminum	Magnesium	Zinc	Other Nonferrous	Total
45,870,050	24,782,540	1,381,461	10,342,738	1,799,294	13,197,181	181,931	505,614	532,313	98,593,122

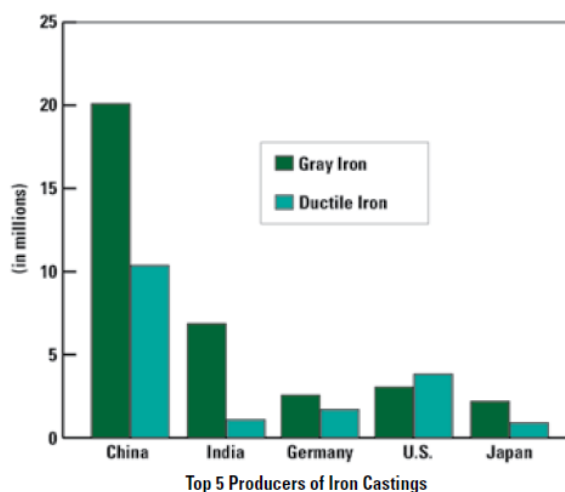
Fig.-2. Produção de Fundidos nas Américas em tons, revista Modern Casting, Dez.2012.

The Americas										
Country	Gray Iron	Ductile Iron	Malleable Iron	Steel	Copper Base	Aluminum	Magnesium	Zinc	Other Nonferrous	Total
Brazil	1,963,556	812,467	23,177	270,302	14,245	251,640	4,617	3,681	-	3,343,685
Canada	378,394	-	-	92,131	14,560	221,083	-	-	-	706,168
Mexico*	771,700	58,947	-	78,746	140,701	600,469	109	1,007	-	1,651,679
United States	2,962,000	3,841,000	102,000	977,000	263,000	1,523,000	99,000	181,000	60,000	10,008,000

* 2010 data

Fig.-3. 05 maiores produtores de fundidos no mundo, revista Modern Casting, Dez.2012.

GRAY IRON VS. DUCTILE IRON



Com relação ao volume, 48% do fundidos no mundo ainda é o ferro fundido cinzento, 28% é nodular e 10% é aço, segundo o 46º Censo Anual da Produção Mundial de Fundição (MODERN CASTING,2012).

Existe um crescimento dos volumes de ferro fundido nodular em relação ao cinzento, em alguns países como Estados Unidos o volume de nodular já é superior ao de cinzento, conforme figura-3. Com relação aos volumes das Américas, o Brasil ocupa a segunda posição, ver figura-2.

Na realidade, a indústria do ferro vem crescendo ano após ano, em função de características como: baixo custo de produção, bom desempenho em absorção de vibrações, alta resistência à compressão, elevada resistência ao desgaste, boa fluidez, que possibilita o preenchimento de geometrias complexas na fundição, baixa contração possibilitando fundir peças com o máximo rendimento metálico e baixo retrabalho desde que o processo seja bem controlado (CALLISTER, 2002).

A desvantagem do ferro cinzento é a baixa resistência à tração e péssimo alongamento, devido à forma de sua grafita em veios, o que no ferro nodular não se observam estas desvantagens, devido à forma esferoidal dos nódulos, algumas ligas de ferro nodular possuem o mesmo desempenho de um aço baixo carbono, em termos de alongamento e resistência. Nesta tendência crescente de volume de ferro nodular, encontra-se o ferro nodular ferrítico, bastante utilizado na fabricação de componentes, como, Cubos (HUBS) e

Eixos, dos Aerogeradores (Turbinas Eólicas). O grande desafio desta liga é a obtenção das propriedades mecânicas e de impacto na condição de bruto de fundição, uma vez que financeiramente não são viáveis os tratamentos de ferritização e normalização seguida de estabilização, pois são extremamente longos e onerosos.

É de conhecimento geral que o controle da nodularidade, número de nódulos/mm² e a matriz ferrítica, são fundamentais para atender as propriedades requeridas para a liga, o problema é que apenas estes parâmetros não são suficientes para assegurar as propriedades de impacto. Assim, o objetivo deste trabalho é: Analisar quais os parâmetros ótimos de processo que garantam as propriedades mecânicas e de impacto na condição de bruto de fundição e adotados na Fundição Simisa, visto que as fundições em geral possuem características muito peculiares que as diferenciam umas das outras (ROEDTER e GAGNÉ, 2003).

Este trabalho consistiu em realizar um procedimento experimental que evidenciassem a importância de parâmetros de fundição sobre a formação de microestruturas em ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura e suas propriedades mecânicas, realizados na fundição SIMISA.

Foram realizadas 04 corridas, onde cada etapa foi analisada criteriosamente em termos dos parâmetros de processo que atendessem as propriedades da liga, sendo a última corrida, à validação dos parâmetros em relação às propriedades requeridas.

A Fundição Simisa é uma indústria de processos sob encomenda, está localizada na região metropolitana de Recife-PE, com 18.000m² de área construída, possui dois fornos de fusão a arco elétrico, com capacidade de metal líquido de 32 tons.

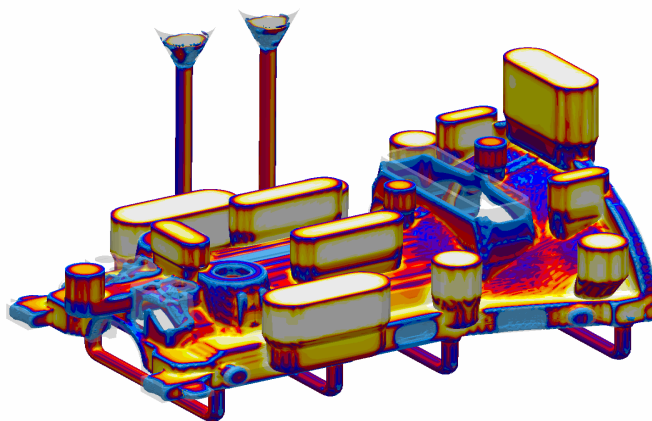
A moldagem manual possui capacidade para moldar peças em caixas de até 5,0 X 5,0 X 3,0 m, misturadores contínuos com capacidades que variam de 15 a 30 ton/h, fossos para moldagem e fundição de peças de grande porte, moldes de até 125 toneladas e modelação.

O setor de acabamento possui 05 fornos de tratamento térmico com capacidades que variam de 10 a 40 ton, e 17 pontes rolantes com capacidade de 15 a 50 ton.

Fig.-4. Fundição de uma peça, Simisa, 2007**Fig.-5. Forno a arco elétrico, Simisa, 2007**

A área de usinagem possui máquinas de grande porte, desde tornos verticais de 40 ton. de capacidade a mandrilhadoras e tornos horizontais, laboratório metalúrgico, sistema de regeneração de areia, laboratório de areia, inspetores qualificados de líquido penetrante, partícula magnética e ultrassom.

A área de engenharia dispõe de software de simulação por elementos finitos (MAGMA), que simulam desde o enchimento até a solidificação das peças.

Fig.-6. Projeto de uma peça de fundição, Simisa, 2012

A Fundição atualmente possui uma capacidade de produção de 18.000 toneladas/ano de peças em aço carbono, baixa liga e ferro fundido cinzento e nodular, com peso máximo de até 24 toneladas para aço e 28 toneladas para ferro fundido, atendendo clientes no Brasil e no exterior nos setores de mineração, automobilístico, siderurgia, hidrogeração, usinas de açúcar e álcool, máquinas e equipamentos em geral, e exporta 20% da sua produção para a Europa e Estados Unidos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O trabalho teve como objetivo analisar e validar influência dos parâmetros de fundição sobre a formação de microestruturas em ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura em relação as suas propriedades mecânicas adotados na fundição SIMISA.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da composição química nas propriedades do ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura;
- Avaliar a influência da quantidade de nódulos e da nodularidade da grafita nas propriedades do ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura
- Avaliar a influência da matriz metalográfica nas propriedades do ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura;
- Avaliar a influência da nodulização nas propriedades do ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura;
- Avaliar a influência da inoculação nas propriedades do ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura;
- Avaliar o efeito do tempo de desmoldagem nas propriedades do ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura.

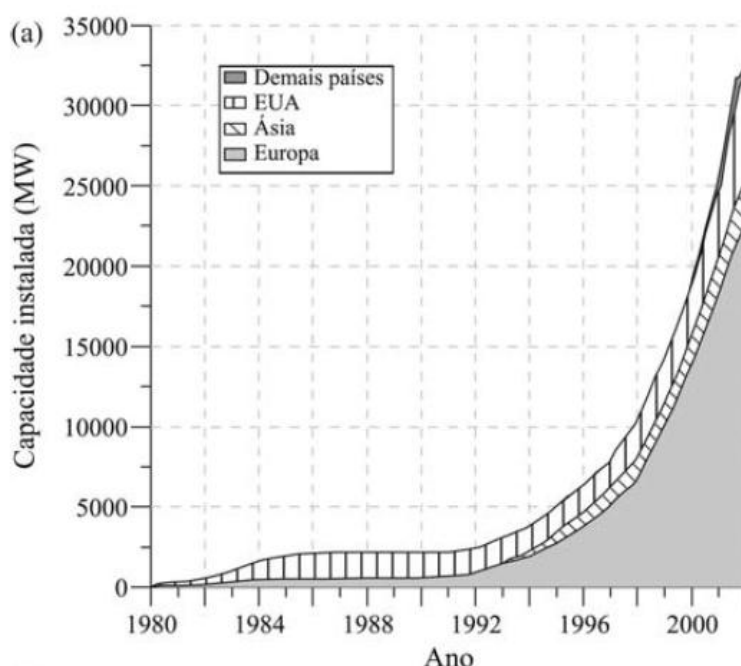
1.2. Justificativa e Relevância

A alta demanda de produtos de ferro fundido no mundo cresce a cada ano, principalmente em função do seu baixo custo de produção e de suas propriedades.

Com o crescimento da população mundial, tornou-se evidente a preocupação em relação à necessidade de suprimento de energia para suportar este crescimento, assim como o desenvolvimento de máquinas e equipamentos para as indústrias de transformação e de bens e consumo.

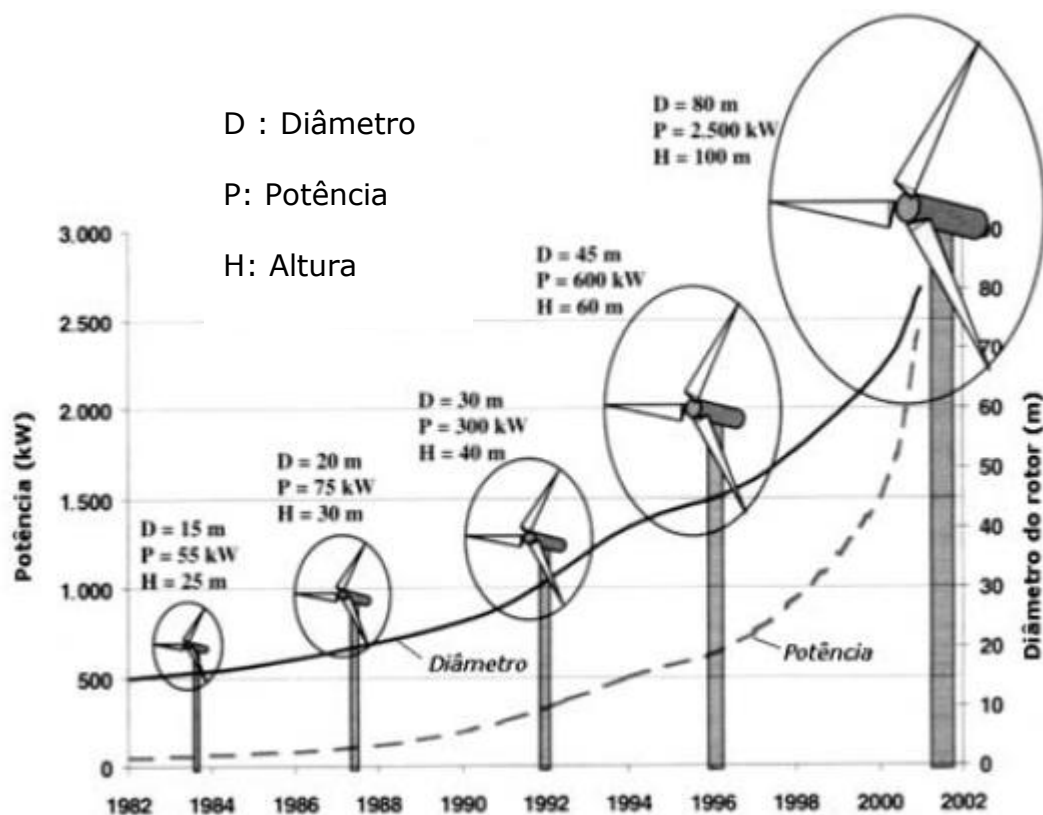
Neste cenário se encontra o setor de energia eólica que vem crescendo a cada ano (ver figura-7) com a fabricação dos aerogeradores, que cada vez mais vem utilizando componentes em ferro fundido nodular, pois possui características similares a alguns aços carbono sendo o seu custo de fabricação reduzido em 10%.

Fig.-7. Evolução da capacidade instalada de geração eólica de eletricidade no mundo, (MARTINS, F. R., GUARNIERI, R. A. e PEREIRA, E. B, 2008).



Com a necessidade de equipamentos cada vez mais potentes existe uma tendência de produtos e componentes cada vez maiores, assim como as peças fundidas em ferro nodular, conforme pode ser observado na figura-8. (MARTINS, F. R., GUARNIERI, R. A. e PEREIRA, E. B, 2008).

Fig.-8. Evolução tecnológica das turbinas eólicas comerciais, no mundo (MARTINS, F. R., GUARNIERI, R. A. e PEREIRA, E. B, 2008).



Esta liga em especial possui características que as distingue das demais, trata-se de um ferro fundido nodular ferrítico, em que são exigidas especificações de propriedades mecânicas como resistência mínima a tração de 400 N/mm^2 , resistência mínima ao escoamento de 240 N/mm^2 , alongamento mínimo de 18% e resistência mínima ao impacto de 12 Joules na média de três ensaios e não podendo ter valores individuais menores que 9 Joules, estes valores são especificados para espessura de parede do fundido menor que 30 mm.

Como os tratamentos térmicos utilizados para melhorar as propriedades dos ferros fundidos são extremamente longos, estes por sua vez são inviabilizados pelo alto custo na sua fabricação, sendo assim, torna-se fundamental o controle do processo para assegurar as propriedades mecânicas de tração e impacto na condição de bruto de fundição.

O presente trabalho de pesquisa foi desenvolvido com o intuito de validar e entender a importância do controle das variáveis não só para estabilização do processo como também para assegurar as propriedades mecânicas de tração e impacto.

Vale ressaltar que: Em se tratando de um processo sob encomenda, desenvolvido dentro de uma fundição de grande porte, algumas particularidades são intrínsecas ao processo, sendo assim é necessário realizar uma análise e talvez ajustes destes parâmetros em função do processo de cada fundição, como exemplo podemos citar as definições de temperatura, uma vez que as mesmas são definidas com base no processo metalúrgico, assim como o tempo necessário para movimentação de painéis, que deve ser levado em consideração, pois varia de acordo com o processo e com o tamanho das painéis e peças.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será descrita a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho, abordando aspectos do processo metalúrgico, elaboração, controles e análises necessárias para obtenção do ferro fundido nodular dentro das propriedades requeridas.

2.1. Ferro Fundido

São ligas ferrosas que contém na sua totalidade ferro, carbono e silício, são normalmente classificadas como ferro ligas cujo teor de carbono está acima 2,14%, porém, na prática, a grande parte dos ferros produzidos contém entre 2,5 e 4,5% de carbono, também chamados pela nomenclatura de fofo (ferro fundido), essas ligas apresentam uma reação eutética durante a solidificação e são classificados como: (CALLISTER et al,2002)

a) Ferros fundidos cinzentos

São ferros cujo teor de carbono varia normalmente de 2,5 a 4,0% e silício de 1,0 a 3,0%, as fases formadas na solidificação são austenita e grafita, segundo o diagrama de equilíbrio estável, sua principal característica são suas grafitas na forma de veios e sua matriz pode ser ferrita (ferro- α) ou perlita [ferro- α + cementita (Fe_3C)].

O nome é dado em função da superfície fraturada desta liga, pois possui uma aparência acinzentada, isto em função dos flocos de grafita. Possuem elevada resistência ao desgaste, elevada resistência à compressão, possuem boa eficiência na absorção de vibração, alta fluidez e baixo custo de fabricação (SANTOS e BRANCO et al,1977).

b) Ferros fundidos nodulares

São ferros que apresentam características mecânicas bem diferentes do ferro cinzento e isto se deve a forma particular de sua grafita. Esta liga apresenta sua grafita na forma de nódulos ou esferoides que podem ser

obtidos através da adição de pequena quantidade de certos elementos de liga como cério ou magnésio ou através de condições particulares de fabricação.

A característica principal deste ferro é sua ductilidade, que chega a ser aumentada por um fator de até 20 vezes e sua resistência chega a dobrar o seu valor (SHACKELFORD, 2008), devido aos nódulos, o que não se observa no ferro cinzento devido a sua grafita se apresentar na forma de flocos, uma vez que estes atuam como concentradores de tensão. Possuem as mesmas características do ferro cinzento, sendo que com resistência e ductilidades melhores (SANTOS e BRANCO et al,1977).

c) Ferros fundidos vermiculares

São ferros que possuem resistência a tração compatíveis com os ferros dúcteis e maleáveis, a sua ductilidade é intermediária entre o cinzento e nodular (CHIAVERINI, 1988). A sua grafita se apresenta na forma de um verme, daí o nome de ferro fundido vermicular, é obtido adicionando-se pequenas quantidades de elementos de liga inferiores ao nodular.

Suas principais características são: maior condutividade térmica, melhor resistência a choques térmicos e menor oxidação em temperaturas elevadas (SANTOS e BRANCO et al,1977).

d) Ferros fundidos brancos

São ferros que apresentam elevada resistência ao desgaste, elevada dureza sem muita ductilidade, são obtidos através de resfriamento rápido e teores de silício inferiores a 1%, o carbono presente na liga encontra-se na forma de cementita ou outros carbonetos metálicos, sua sequência de solidificação e microestrutura é analisada através do diagrama de equilíbrio metaestável (Fe-Fe₃C), seu nome é devido a sua superfície de fratura a qual possui aparência esbranquiçada (CALLISTER et al,2002).

e) Ferros fundidos maleáveis

Foi a primeira família de ferros fundidos a apresentar ductilidade significativa. Trata-se de um ferro fundido branco, submetido a um tratamento térmico de maleabilização (800 a 900°C e tempos de patamares prolongados em atmosfera neutra), onde o objetivo é decompor a cementita em grafita+austenita, no qual a grafita formada é compacta, este ferro é chamado ferro fundido maleável de núcleo preto ou americano, usados na fabricação de

suportes de molas, caixas de direção, cubos de roda, bielas e etc. Quando o tratamento é realizado em atmosfera oxidante, o carbono é removido por descarbonetação, não havendo a formação de grafita, neste caso o ferro é chamado, ferro fundido de núcleo branco ou europeu, usados na fabricação de barras de torção, corpos de mancais e etc.

Possuem resistência relativamente alta e ductilidade considerável. São produzidos em menores escalas assim como o ferro branco.

f) Ferros fundidos especiais

Podem ser ferros cinzentos, brancos e nodulares, mas que possuem uma quantidade significativa de elementos de liga, por exemplo:

- Fofo cinzento ao silício (15%Si), com elevada resistência à corrosão.
- Fofo branco ao cromo (13%Cr), com elevada resistência à abrasão.
- Fofo nodular ao alumínio (25%Al), com elevada resistência à oxidação a temperaturas elevadas (SANTOS e BRANCO,1977).

2.1.1. Ferro Fundido Nodular

Historicamente o ferro fundido nodular foi oficialmente descoberto em 07 de maio de 1948, na reunião anual da American Foundryman Society, na Philadelphia (SANTOS e BRANCO et al, 1989). O processo que havia sido patenteado fazia uso da adição de cério pouco antes do vazamento, com baixo teor de enxofre no metal líquido, em seguida a inoculação era realizada com compostos grafitizantes.

Em 1942 ocorreram as primeiras experiências com as ligas de magnésio, em 1943, foram obtidos os primeiros resultados com ferro nodular de grafita esferoidal, utilizando ligas de magnésio. A partir daí os pesquisadores deram continuidade aos estudos do ferro fundido nodular.

Segundo, A. Santos e C.Branco , 1977, p-6.

[...] O desenvolvimento dos ferros fundidos nodulares obtidos através da adição do magnésio deve-se a Keith D.Millis, Albert P.Gagnebin e Norman B.Pilling, em cujos nomes se encontram a patente americana.

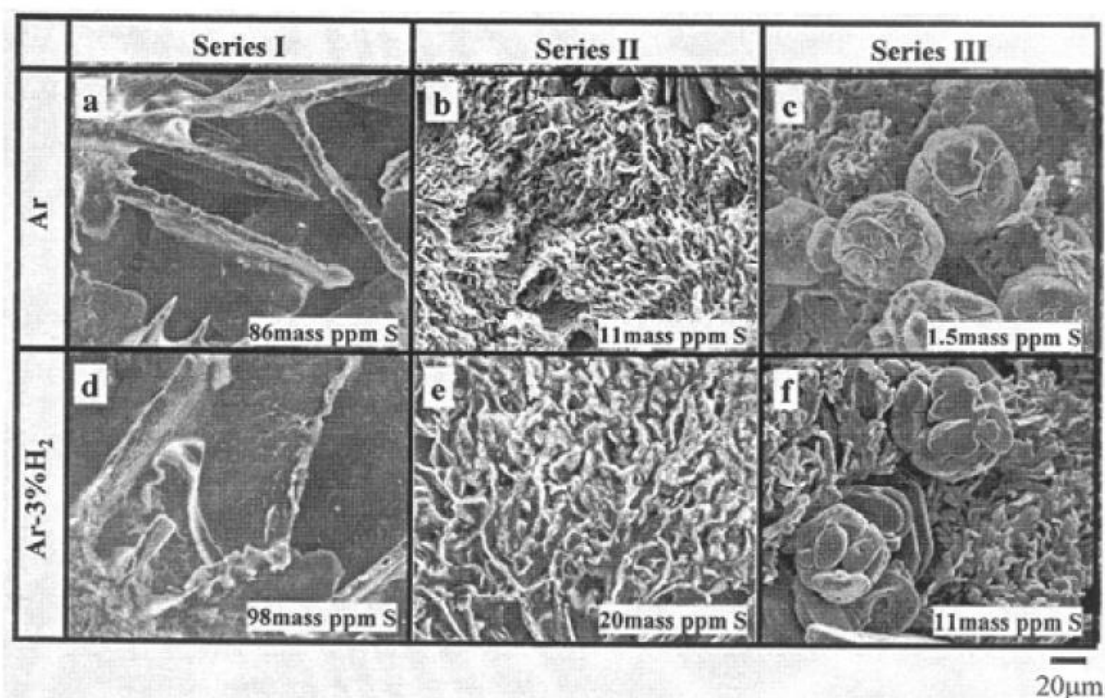
Na obtenção do ferro fundido nodular, o magnésio tem uma importante função, na realidade como ele é um forte elemento desoxidante e dessulfurante, isto é, a sua adição faz com que estes elementos, enxofre e oxigênio, sejam removidos da solução.

Como tanto o enxofre quanto o oxigênio são elementos ativos superficialmente, isto faz com que a energia de interface grafita-líquido aumente, atingindo um valor mínimo para que a forma da grafita seja nodular (esferoidal), isto se deve em função de que foi constatado que os ferros cinzentos se formavam com menor energia de interface grafita-líquido e que a partir de um determinado valor, esta energia aumentaria proporcionando a formação do ferro nodular (SANTOS e BRANCO apud BUTTNER, TAYLOR e WULFF, 1977).

Os controles dos níveis de enxofre e oxigênio são fundamentais para o crescimento da grafita nodular (SKALAND, 2005).

A figura-9 mostra a transição do crescimento de uma grafita de veios(flocos) para nodular, através de fotos tridimensionais de microscopia eletrônica de varredura alterando apenas a concentração de enxofre de 98 para 1,5 partes por milhão de massa (SKALAND, 2005).

Fig.-9. Crescimento da morfologia da grafita com a redução das concentrações de enxofre mostrando a transição de grafita em veios para nodular, sem a introdução de nodulizante no ferro, (Skaland, 2005).

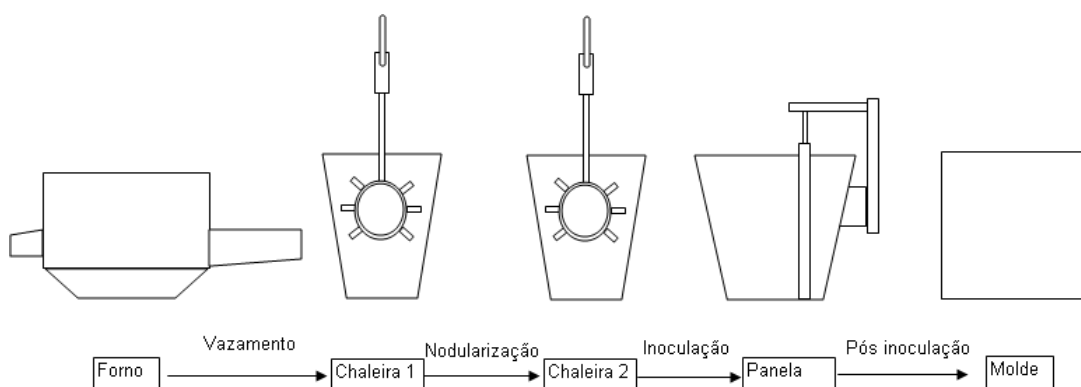


Na realidade uma elevada energia de interface faz com que o crescimento esferoidal se torne mais estável do ponto de vista termodinâmico, possibilitando que o sistema possua energia livre mínima, favorecendo o crescimento da grafita segundo plano basal (GUESSE,2009).

Visto que no ferro cinzento, a grafita lamelar cresce com orientação prismática e no ferro nodular, a grafita em nódulos (figuras-12,13,14 e 15) cresce com orientação basal.

Na prática, o processo de fabricação do ferro fundido nodular de peças grandes em fundição sob encomenda, utilizando o processo de nodulização Sanduíche, ocorre em quatro etapas, mostrado no esquema da figura-10, e que serão descritas nos itens posteriores deste capítulo:

Fig.-10. Fluxo de fabricação do ferro fundido, (Simisa, 2013).



Etapa-1 - Elaboração do Metal Líquido e Vazamento

Etapa-2 – Nodulização

Etapa-3 – Inoculação

Etapa-4 – Pós-inoculação e Fundição

Os ferros fundidos nodulares apresentam custo de fabricação inferior aos aços fundidos, porém a aplicação é que definirá qual o material a ser utilizado em função dos requisitos e propriedades mecânicas, na realidade o ferro nodular surgiu com propriedades intermediárias entre o aço fundido e o ferro fundido, conforme pode ser observado na figura-11 e tabela-1.

Tabela-1. Tabela de Seleção de Materiais.

Seleção dos Materiais			
Propriedade	Fofo Cinzento	Fofo Nodular	Aço
Resistência Mecânica	*	**	***
Ductilidade	-	***	****
Usinabilidade	***	**	*
Amortecimento de Vibrações	***	**	-
Transmissão de Calor	***	**	*
Facilidade para Fundir (fluidez)	***	**	*
Custo	*	**	***
Legenda: - Não Existe ; * Baixo ; ** Médio ; *** Alto ; **** Muito Alto			

Fig.-11. Comportamento mecânico dos diversos ferros em comparação ao aço, Sorelmetal, 1990

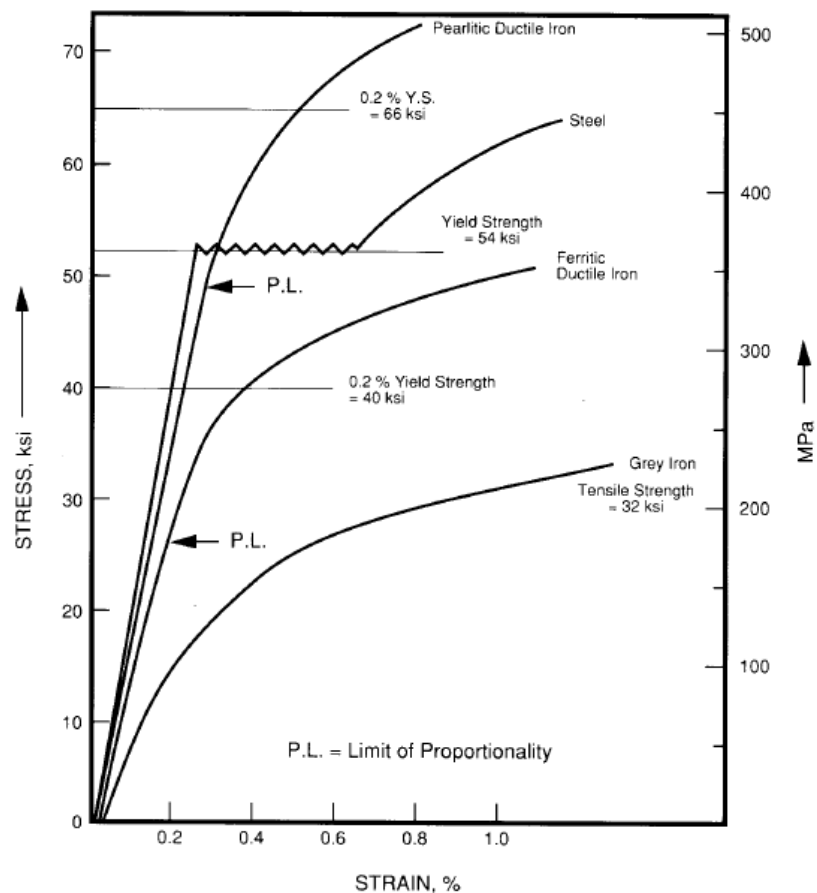


Fig.-12. Nódulo de grafita com iluminação de campo claro e polimento de 1000X ,ASM, 2004.

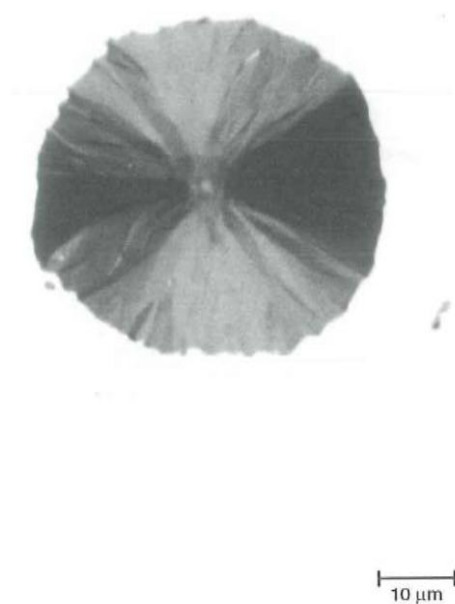


Fig.-13. Mesmo nódulo de grafita examinada com luz polarizada cruzada 1000X ,ASM, 2004.

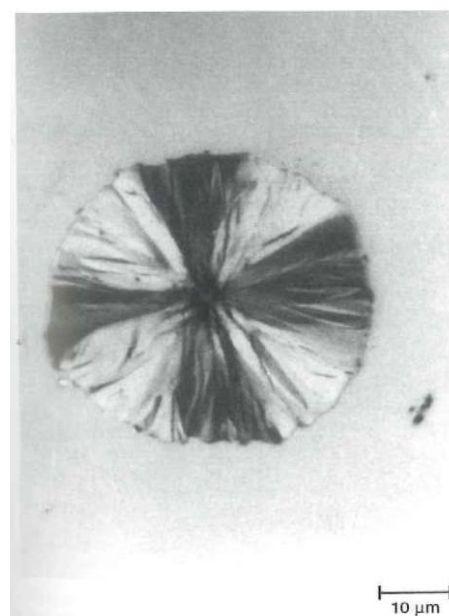


Fig.-14. Nódulo de grafita examinada com luz polarizada cruzada 1000X ,ASM, 2004

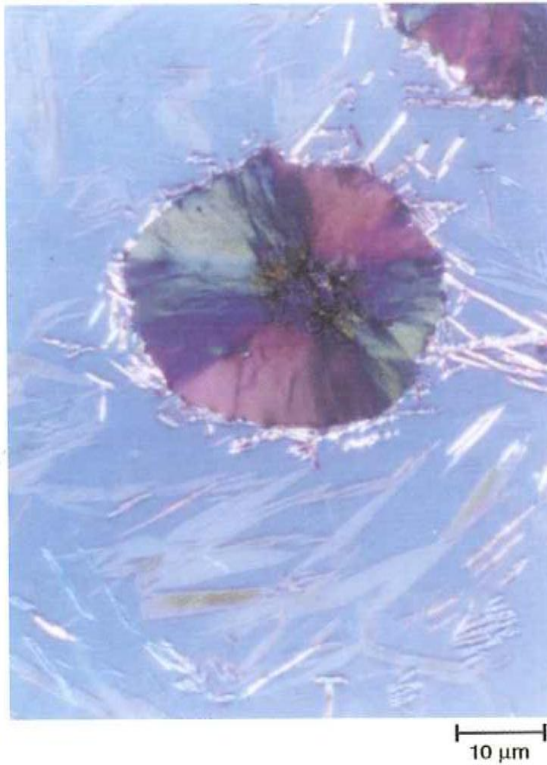


Fig.-15. Nódulo de grafita examinada com MEV e atacado com 50% HCl, 1000X , ASM, 2004.

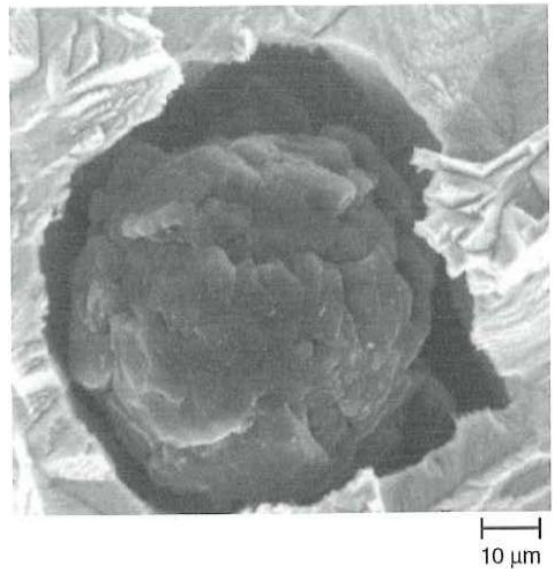
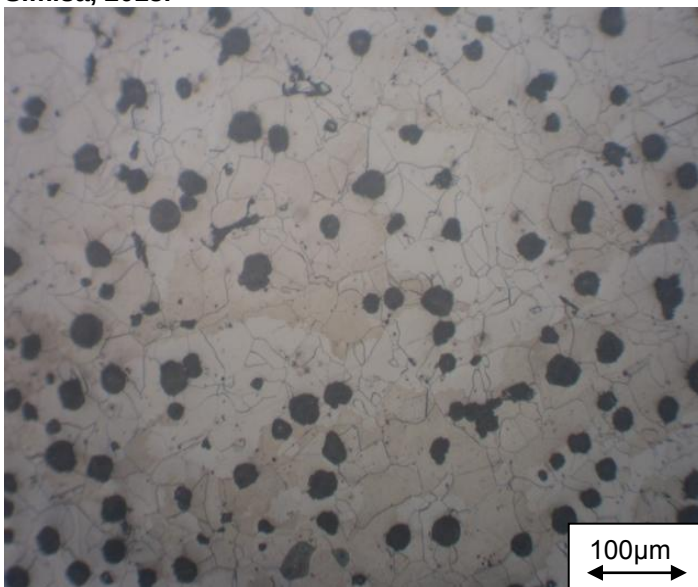


Fig.-16. Metalografia de ferro fundido nodular ferrítico atacado com Nital 2%, 100X, Simisa, 2013.



2.1.2. Ferro Fundido Nodular de Alto Impacto a Baixa Temperatura

O ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura, figura-16, é uma liga cujas características de alongamento e impacto são compatíveis com alguns aços carbono, e atualmente está com uma demanda crescente ano após ano, em função do crescimento do setor de energia eólica no mundo e principalmente no Brasil.

Fig.-17. Vista de uma Torre Eólica de 4,5MW, Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron,2003



A utilização de componentes de energia eólica de ferro nodular em substituição ao aço reduz em média 10% o custo dos componentes como cubos e eixos mostrados nas figuras-17 e 18.

Fig.-18. Seção Transversal de uma Torre Eólica com Sistema de Redução, Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron,2003

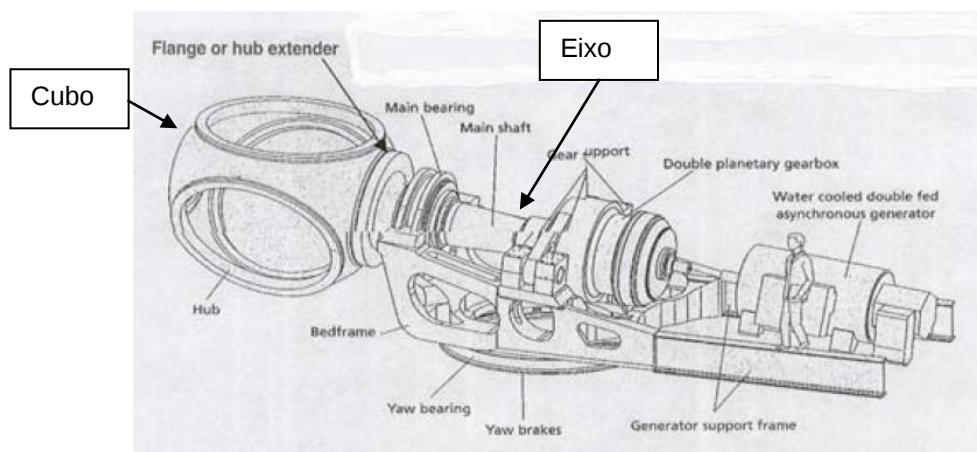


Fig.-19. Foto de um Cubo (HUB) de uma turbina eólica, Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, 2003



Esta liga, não se trata de um ferro nodular padrão, os parâmetros de processo necessários para se atender as características exigidas são extremamente importantes, uma vez que os requerimentos de alongamento e impacto são extremamente elevados. A norma requerida para esta liga é DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT, descrita nas tabelas-2 e 3, compatível com a DIN 1693 GGG-40.3.

Tabela-2. Tabela das propriedades mecânicas de tração da Norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT.

Especificação do material		Resistência a tração: R_m N/mm^2 mín.	Limite convencional de elasticidade 0,2% $R_{p0,2}$ N/mm^2	Alongamento mínimo A % mín.
Simbólica	Numérica			
EN-GJS-350-22-LT ¹⁾	EN-JS1015	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT ²⁾	EN-JS1014	350	220	22
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT ¹⁾	EN-JS1025	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT ²⁾	EN-JS1024	400	250	18
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	400	250	18
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	400	250	15
EN-GJS-450-10	EN-JS1040	450	310	10
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	500	320	7
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	600	370	3
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	700	420	2
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	800	480	2
EN-GJS-900-2	EN-JS1090	900	600	2

Tabela-3. Tabela das propriedades mecânicas de Impacto, Norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT

Especificação do material		Valores mínimos de resistência ao impacto, em Joules					
		A temperatura ambiente $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$		baixa temperatura $a (-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$		baixa temperatura $a (-40 \pm 2) ^\circ\text{C}$	
		Valor médio de três ensaios	Valor individual	Valor médio de três ensaios	Valor individual	Valor médio de três ensaios	Valor individual
Simbólica	Numérica						
EN-GJS-350-22-LT ¹⁾	EN-JS1015	–	–	–	–	12	9
EN-GJS-350-22-RT ²⁾	EN-JS1014	17	14	–	–	–	–
EN-GJS-400-18-LT ¹⁾	EN-JS1025	–	–	12	9	–	–
EN-GJS-400-18-RT ²⁾	EN-JS1024	14	11	–	–	–	–

1) LT: baixa temperatura

2) RT: temperatura ambiente

Como este trabalho está direcionado para peças fundidas sob encomenda e de grande porte, a espessura de parede média se encontra acima de 60 mm.

Tabela-4. Tabela das propriedades mecânicas de tração e impacto por espessura de parede do fundido, Norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT

Especificação do material		Espessura de parede t mm	Resistência mínima a tração R_m N/mm^2 mín.	Limite convencional de elasticidade 0,2% $R_{p0,2}$ N/mm^2 mín.	Alongamento mínimo A % mín.
Simbólica	Numérica				
EN-GJS-400-18U-LT ¹⁾	EN-JS1049	$t \leq 30$	400	240	18
		$30 < t \leq 60$	390	230	15
		$60 < t \leq 200$	370	220	12
EN-GJS-400-18U-RT ²⁾	EN-JS1059	$t \leq 30$	400	250	18
		$30 < t \leq 60$	390	250	15
		$60 < t \leq 200$	370	240	12

Tabela-5. Tabela das propriedades mecânicas de impacto por espessura de parede do fundido, Norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT

Especificação do material		Espessura de parede t mm	Valores mínimos de resistência ao impacto, em Joules					
			A temperatura ambiente $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$		baixa temperatura $a (-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$		baixa temperatura $a (-40 \pm 2) ^\circ\text{C}$	
			Valor médio de três ensaios	Valor individual	Valor médio de três ensaios	Valor individual	Valor médio de três ensaios	Valor individual
Simbólica	Numérica							
EN-GJS-400-18U-LT ¹⁾	EN-JS1049	$30 < t \leq 60$	–	–	12	9	–	–
		$60 < t \leq 200$	–	–	10	7	–	–

Como pode ser observado, existem faixas de valores em função da espessura de parede do fundido e os requerimentos da norma são definidos em função desta espessura, tanto para as propriedades mecânicas como para as propriedades de impacto, ambos mostrados nas tabelas-4 e 5.

Então, para atender as estes requerimentos serão necessários alguns controles de processo para que se obtenha um fundido com características metalúrgicas específicas que garantam as propriedades, são eles:

1. Uma matriz 100% ferrítica, isenta de carbonetos, perlita, inclusões não metálicas e outros constituintes.
2. Número de Nódulos recomendado é de 100 a 200 nódulos/mm² ou mais, visto que um número de nódulos excessivo interfere na resistência ao impacto e por outro lado um número de nódulos muito baixo impacta nos parâmetros de resistência e ductilidade (FORREST,2006).
3. Nodularidade acima de 90%, em outras palavras, o nódulo deve estar o mais circular possível.
4. Isentos de microrechupes.

Uma matriz ferrítica e o controle dos nódulos além de atender as propriedades mecânicas e de impacto, também contribuem para que se tenha uma boa usinabilidade, devido a baixa dureza da matriz ferrítica e do efeito da lubrificação dos nódulos de grafita (ROEDTER e GAGNÉ, 2003).

Demais controles são extremamente necessários:

1. Carga Metálica
2. Elaboração do Metal e Composição Química
3. Nodulização
4. Inoculação
5. Tempo de Desmoldagem

Além destes itens descritos acima, para que se obtenha a liga dentro dos parâmetros exigidos, é extremamente importante que se tenha um bom planejamento de manufatura do processo de fundição como um todo.

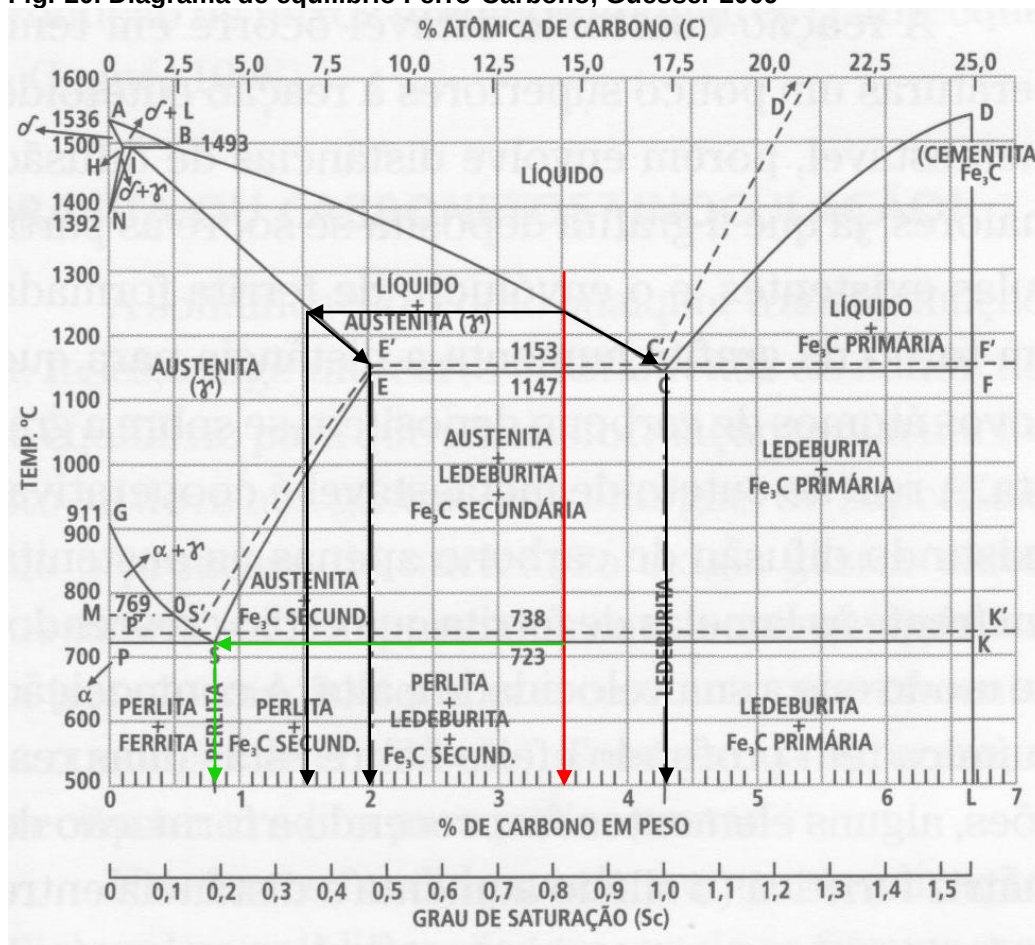
Levando em consideração detalhes desde o projeto de fundição com simulação do enchimento e solidificação, assim como um bom projeto e execução do ferramental utilizado para fabricação dos moldes e machos, visto que em se tratando de peças grandes em uma fundição sob encomenda, tanto os modelos quanto a caixa de macho, quanto o processo de moldagem devem ser muito bem controlados para evitar qualquer tipo desvio no fundido, neste trabalho não serão abordadas as demais etapas do processo, apenas a elaboração do metal líquido e suas propriedades.

2.2. Solidificação do Ferro Fundido Nodular

Para que se entenda o processo de solidificação do ferro fundido nodular, é importante falar sobre o diagrama de equilíbrio ferro-carbono, na realidade estamos falando de um mapa temperatura-composição, onde é possível identificar as fases de equilíbrio, as transformações de fase, assim como definir os constituintes de cada fase.

Considerando um ferro fundido com 3,5% de carbono, a uma temperatura de 1300°C, conforme figura-20, sua fase de equilíbrio é o líquido, sua solidificação ocorre com a redução da temperatura através do resfriamento, ao atingir a linha Líquidus. Na temperatura Líquidus, em aproximadamente 1250°C, inicia-se a solidificação com as primeiras dendritas de austenita, neste momento o percentual de carbono na austenita é de aproximadamente 1,5% de carbono, a quantidade de austenita vai aumentando com a diminuição da temperatura e o excesso de carbono é rejeitado para o líquido (GUESSER,2009).

Fig.-20. Diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono, Guesser 2009



Em 1153°C, conforme figuras-20 e 21, A austenita tem composição de 2,0%C e o líquido esta com 4,3%C, que pela regra da alavanca temos os seguintes percentuais de fases:

$$(1) \quad \% \text{ de austenita} = \frac{(3,5 - 2,0)}{(4,3 - 2,0)} = 65,2\%$$

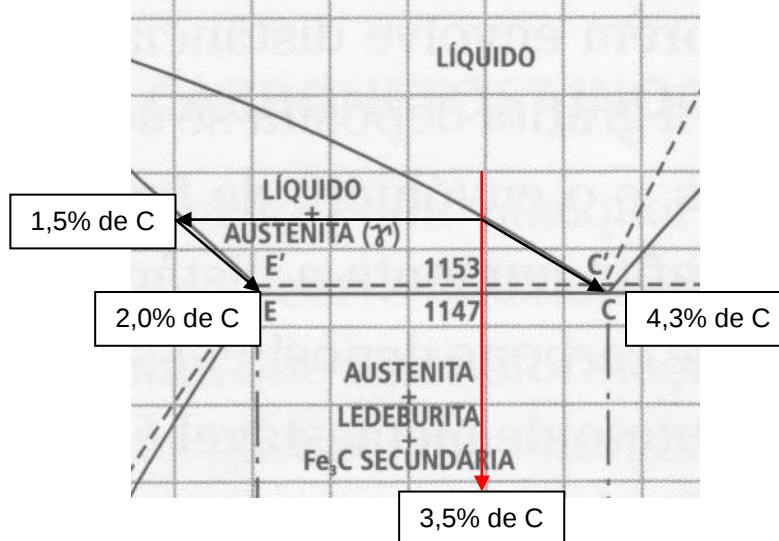
$$(2) \quad \% \text{ de líquido} = \frac{(4,3 - 3,5)}{(4,3 - 2,0)} = 34,8\%$$

Esta temperatura chama-se eutética, na qual um líquido se transforma em dois sólidos, que são a austenita e a grafita.



Esta transformação ocorre até a solidificação

Fig.-21. Ampliação do diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono, Guesser 2009



Depois da solidificação, o resfriamento continua, porém existe uma diminuição do teor de carbono dissolvido na austenita, e este carbono excedente se precipita nas partículas já existentes de grafita.

O processo de resfriamento continua e ao atingir 723°C, o teor de carbono dissolvido na austenita é reduzido para 0,7%, a partir daí temos uma importante transformação, chamada de transformação eutetóide, no qual um sólido se transforma em dois outros sólidos.

Esta reação ocorre de duas formas:

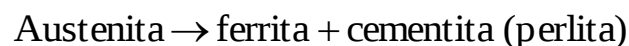
1. Reação eutetóide estável

(4)



2. Reação eutetóide metaestável

(5)



A reação eutetóide estável ocorre em temperaturas ligeiramente superiores a metaestável.

Em termos de solidificação dos ferros fundidos nodulares, tanto o eutético estável (austenita + grafita) quanto o metaestável (austenita + cementita) são influenciados pelo teor de silício.

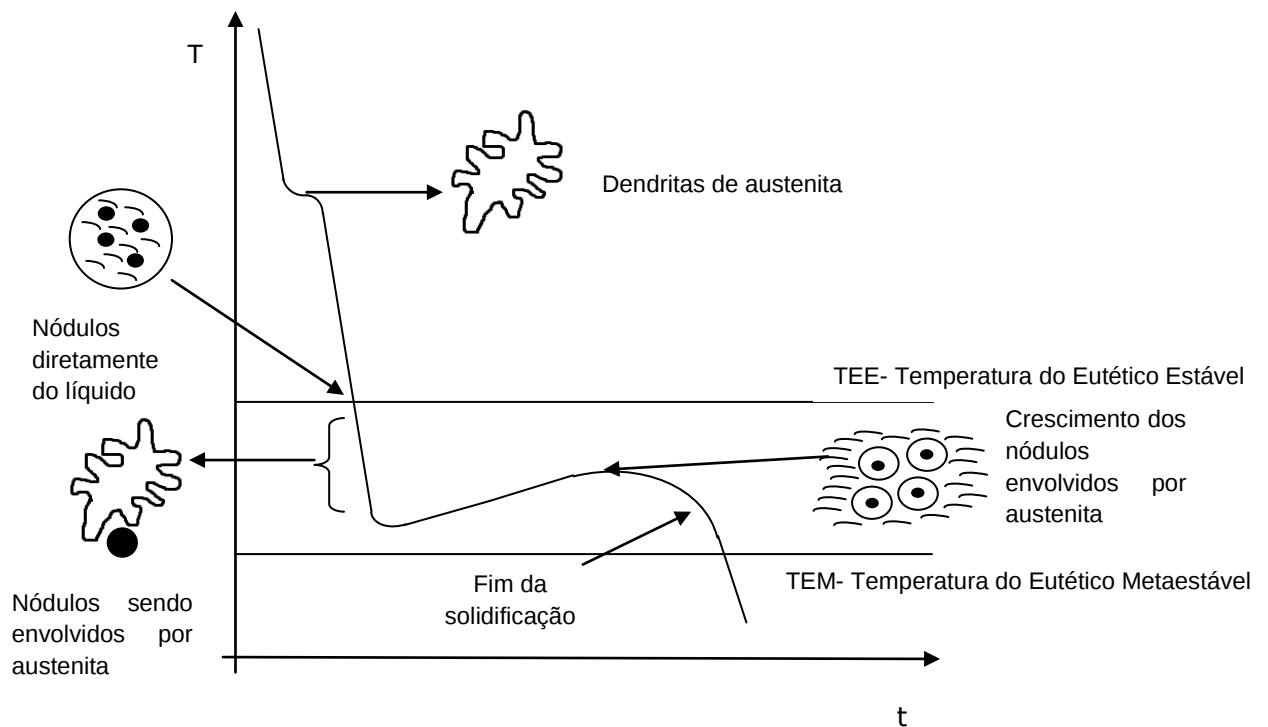
O aumento do %Si, aumenta o intervalo de temperatura entre estes eutéticos, tornando mais provável o sistema eutético estável. Tanto o carbono

quanto o silício determinam a proporção das fases de austenita e grafita ou carbonetos na solidificação da liga.

- Solidificação dos ferros fundidos nodulares hipoeutéticos:

Na solidificação desta liga, conforme figura-22, a formação das dendritas de austenita é pobre em carbono, com a diminuição da temperatura o líquido residual fica mais rico em %C e %Si que são rejeitados a medida que a austenita cresce, após determinado super-resfriamento abaixo da temperatura do eutético estável começam a se formar os nódulos de grafita, e a curva de esfriamento define um patamar em função das condições de nucleação e esfriamento do banho, no qual o calor liberado pela solidificação(calor latente) compensa a perda de calor para o meio externo decorrente da velocidade de extração de calor pelo molde, a partir deste momento, os nódulos de grafita são envolvidos por um envólucro de austenita, o crescimento dessas células segue até a liberação de todo o calor latente de solidificação (SANTOS e BRANCO, 1977).

Fig.-22. Curva de esfriamento de um ferro fundido nodular, Santos,1977.



- Solidificação dos ferros fundidos nodulares eutéticos:

Nas ligas eutéticas, a solidificação inicia após um super-resfriamento abaixo da temperatura do eutético e os nódulos de grafita se formam em contato direto com o líquido, em seguida a grafita é envolvida pela austenita, finalizando o processo com a liberação de todo o calor latente de solidificação (SANTOS e BRANCO, 1977).

- Solidificação dos ferros fundidos nodulares hipereutéticos:

No caso dessas ligas, o processo é diferente, a grafita é a fase primária, a grafita nodular precipita-se a partir do banho ao passar pela temperatura *liquidus*, com a diminuição da temperatura sua composição se aproxima da eutética.

A reação eutética é observada após um determinado super-resfriamento, formando mais nódulos de grafita que serão envolvidos pela austenita, no caso dessas ligas existe a possibilidade de formação de dendritas de austenita (SANTOS e BRANCO, 1977).

A principal diferença entre os nódulos das ligas hipereutéticas em comparação com as eutéticas e hipoeutéticas é que no primeiro caso os nódulos são formados de tamanhos diferentes, já no segundo e terceiro casos os nódulos são menores (SANTOS e BRANCO et al,1977).

2.3. Influência da velocidade de resfriamento nas propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do ferro fundido nodular ferrítico são função do teor de perlita e ferrita contidos em sua matriz assim como do número de nódulos.

A velocidade de resfriamento é quem controla a microestrutura, sendo assim, a velocidade de resfriamento influencia diretamente nas propriedades mecânicas.

Neste trabalho o objetivo é analisar os parâmetros de fundição sobre a formação de microestruturas em ferro fundido nodular de alto impacto a baixa temperatura e as suas propriedades mecânicas.

O principal requerimento da liga DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT é o alto valor de alongamento e impacto a baixa temperatura e para obtenção destes valores é imprescindível que a matriz tenha baixa dureza e alta ductilidade, isto é, ferrítica.

A velocidade de resfriamento define o tempo disponível para a difusão do carbono na reação eutetóide estável, logo para pequenas velocidades de resfriamento, ocorrerá mais tempo para difusão do carbono e consequentemente a formação de ferrita e grafita, então para a obtenção de uma matriz ferrítica é importante ter velocidades de resfriamento mais lentas.

De outra forma, altas taxas de resfriamento favorecem a formação da perlita e grafita, dificultando a formação da ferrita.

Existem alguns casos em que a formação das fases ferrita e perlita não estão associadas à competição entre as reações eutetóides estável e metaestável, a ferrita livre é facilmente observada em ferros fundidos esfriados lentamente ou tratados isotermicamente (ferritização), e é obtida a partir da decomposição da perlita anteriormente formada.

Segundo ASKELAND (apud ANGELO JUNIOR, E. C., 2003), que estudou o efeito da taxa de resfriamento sobre o número de nódulos e a matriz de um ferro fundido nodular.

[...] A taxa e o tempo de difusão são responsáveis pelas quantidades relativas de ferrita e perlita na matriz. Com um baixo número de nódulos o espaçamento entre os mesmos é bastante grande, aumentando as distâncias para difusão do carbono, consequentemente favorecendo a transformação segundo sistema metaestável. Por outro lado, a matriz com um alto número de nódulos apresenta distâncias pequenas para a difusão do carbono, consequentemente as altas taxas de resfriamento reprimem a formação da ferrita. Quantidades pequenas de perlita são verificadas em regiões com um alto número de nódulos.

Altas temperaturas de vazamento diminuem a velocidade de resfriamento, visto que o molde é encharcado rapidamente, por outro lado, baixas temperaturas de vazamento aumenta a velocidade de resfriamento,

principalmente porque a temperatura fica muito próxima da temperatura de solidificação não havendo tempo para um encharcamento nas paredes do molde. Então com a diminuição da temperatura de vazamento, aumenta-se a velocidade de resfriamento e obtém-se maior número de células em crescimento e conseqüentemente uma estrutura mais refinada, deve-se atentar para que esta velocidade não seja tão excessiva a ponto de promover a formação de ferro fundido branco.

Logo, para obtenção de uma matriz ferrítica é extremamente importante baixas velocidades de resfriamento no estado sólido (tempo de desmoldagem) e um maior número de nódulos (SANTOS e BRANCO et al,1977).

2.4 Influência da Composição Química nas Propriedades Mecânicas

As reações eutéticas estáveis que promovem a matriz ferrítica e metaestáveis que promovem a matriz perlítica, sofrem efeito significativo de alguns elementos químicos e estas matrizes têm influencia direta nas propriedades mecânicas.

- Carbono é o elemento que determina a percentagem de grafita presente na microestrutura, sua variação praticamente não altera a solubilidade deste elemento na austenita nas temperaturas em que podem se iniciar as reações eutetóides estável e metaestável. O acréscimo do teor de carbono no nodular diminui as propriedades mecânicas de resistência e alongamento e dureza. A resistência ao impacto também diminui com o aumento da concentração de carbono e seu efeito na temperatura de transição dúctil-frágil é pequeno. O efeito deste elemento nas propriedades mecânicas ocorre em função do aumento da fração de grafita presente na microestrutura assim como do percentual de ferrita (SANTOS et al, 2005).
- Silício, este elemento aumenta o intervalo de temperatura entre os eutéticos promovendo a solidificação do eutético austenita + grafita, conforme mostra a figura-23, sendo assim, um elemento de efeito grafitizante.

O Silício é ferritizante na transformação do estado sólido, amplia a faixa de coexistência entre austenita, ferrita e grafita no diagrama Ferro – Carbono – Silício.

O Silício aumenta o coeficiente de carbono equivalente, que por sua vez aumenta o número de nódulos, aumentando assim a quantidade de ferrita livre, porém a elevação do percentual de silício em nodulares com matriz essencialmente ferrítica, mantendo-se as concentrações e mesma velocidade de resfriamento, promove um aumento de dureza, da resistência a tração, da resistência ao escoamento, diminuição do alongamento e diminuição da temperatura de transição dúctil-frágil e do valor máximo da energia absorvida no ensaio de impacto na região dúctil, de forma geral o percentual de silício acima de 2,5% reduz de forma significativa a tenacidade à fratura (ANGELO JUNIOR, 2003).

Já em nodulares de matriz ferrítica-perlítica, o aumento do percentual de silício promove uma maior formação de ferrita, diminuindo a dureza, a resistência à tração, a resistência ao escoamento e aumentando o alongamento (SANTOS et al, 2005).

- Níquel atua como grafitizante médio, aumenta o intervalo, porém não tem muita influencia na perlitização, mas melhora resistência à tração, resistência ao escoamento, dureza e reduz o alongamento.
- Antimônio, Cobre e Estanho, são considerados elementos perlitizantes, visto que dificultam a reação eutetóide estável, dificultando a deposição de carbono sobre a grafita. Uma matriz perlítica tem menos ductilidade, porém mais resistência e dureza.
- Manganês, Cromo e Vanádio, reduzem as diferenças entre as temperaturas eutetóides, promovendo a reação eutetóide metaestável, matriz perlítica. Atenção em especial ao Vanádio e Cromo, pois são fortes formadores de carbonetos, são mais utilizados quando se necessita elevada resistência a abrasão.

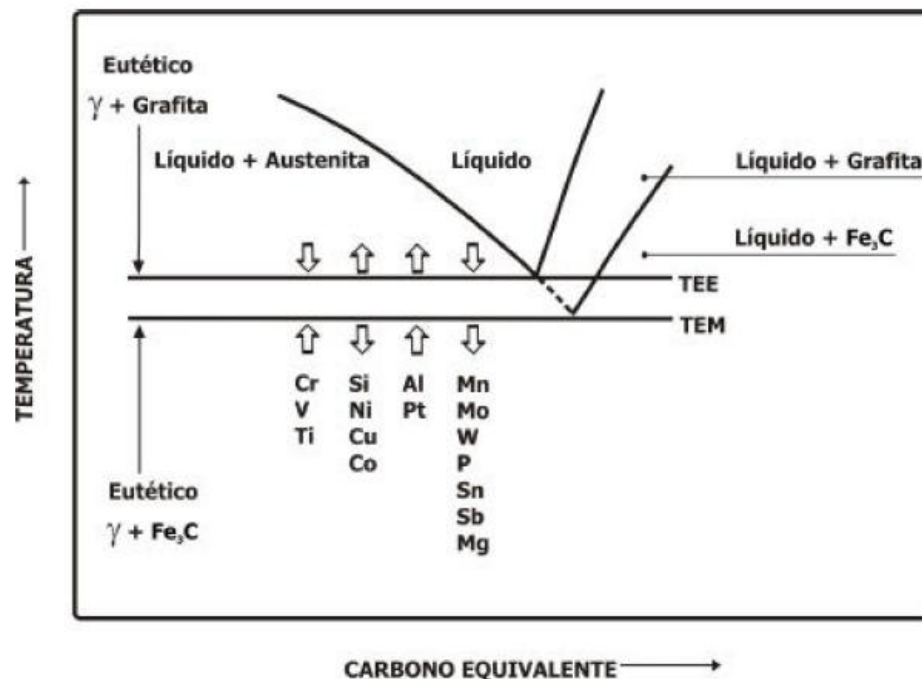
O manganês é um forte perlitizante porque estabiliza a austenita, diminui o coeficiente de difusão do carbono e aumenta a solubilidade do

carbono nesta fase. Este elemento promove o refino da perlita sendo mais eficiente do que elementos como cobre e estanho. Já nos ferros fundidos nodulares ferríticos, seu teor deve ser limitado a aproximadamente 0,20%Mn.

- Molibdênio, quando adicionado aos ferros fundidos nodulares, promove um grande aumento de resistência e dureza, em consequência reduz a ductilidade.
- Elemento como Fósforo, eleva a temperatura de transição dúctil-frágil, diminuindo a resistência ao impacto, para nodulares em que se requer alto desempenho ao impacto recomenda-se trabalhar abaixo de 0,06%P, este elemento em concentrações maiores que 0,08% promovem a formação de steadita e fosfetos de ferros insolúveis o que prejudica as propriedades mecânicas (SANTOS et al, 2005).
- Enxofre, os elementos que promovem o crescimento esferoidal da grafita nos ferros fundidos são excelentes dessulfurantes, por esta razão, o teor de enxofre no ferro base para produção de ferro fundido nodular deve ser o menor possível, em caso de teores mais elevados torna-se necessário aumentar a adição do agente nodulizante, aumentando o custo e a probabilidade de maior formação de inclusões de escória e drosses. Para fabricação de ferros fundidos nodulares recomenda-se trabalhar com teores de enxofre menores que 0,020%S.
- Oxigênio, na fabricação dos ferros fundidos nodulares deve-se trabalhar com a menor quantidade possível de oxigênio dissolvido no banho, uma vez que os elementos nodulizantes são excelentes desoxidantes, assim, uma maior concentração deste elemento aumentaria o custo do agente nodulizante.
- Elementos deletérios como: Selênio, Telúrio, Bismuto, Alumínio, Antimônio e Titânio promovem a degenerescência da grafita mesmo em pequenos teores, no caso do Alumínio concentrações acima de 0,1% já são significativas, afetando as propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares.
- O Magnésio é extremamente importante para o processo de nodulização, sendo sua faixa recomendada de 0,04 a 0,08%Mg, valores

inferiores a 0,04% podem causar a degeneração do nódulo e valores superiores a 0,10%Mg, pode promover a formação de grafita degenerada, não nodular, tipo “spiky”.

Fig.-23. Efeito dos elementos de ligas sobre as temperaturas eutéticas, Ângelo Junior 2003.



Na realidade, os ferros fundidos são ligas complexas que além de ter Ferro e Carbono sofrem influência de outros elementos, tais como Silício e Fósforo que exercem grande influência no ponto eutético.

Para levar em consideração o efeito destes elementos, o Gray Iron Research Institute, desenvolveu a fórmula do carbono equivalente, que leva em consideração a influência destes elementos sobre a posição das curvas no diagrama de equilíbrio.

$$(6) \quad CE = \%C + \frac{(\%Si + \%P)}{3}$$

Onde:

CE = 4,3 , liga eutética

CE < 4,3 , liga hipoeutética

CE > 4,3 , liga hipereutética

Para fabricação de peças em ferro fundido nodular, normalmente é recomendado um carbono equivalente(CE) na faixa de 4,3 a 4,6, composições proximas da faixa eutética ou hipereutética porém existem situações específicas em que são utilizadas ligas na composição hipoeutética, 3,9 a 4,2% de CE (SANTOS, 2005).

- Os teores de Carbono e Silício mais utilizados são 3,4 a 3,7% de C e 2,1 a 2,8% de Si, nestas faixas obtem-se nódulos de grafita mais perfeitos e com menor tendência de formação de carbonetos eutéticos na estrutura.

Uma vez definido a influência dos principais elementos químicos, no caso específico do ferro fundido nodular ferrítico são extremamente importantes analisar a influência do carbono e silício na matriz ferrítica, que na tabela-6 mostram os valores recomendados. Assim como a influência do manganês como agente perlitizante, conforme pode ser observado na figura-24, recomenda-se uma valor máximo de 0,20% de manganês para se obter uma matriz predominantemente ferrítica.

Existe também o grau de saturação, que avalia o quanto a composição química se afasta da composição eutética.

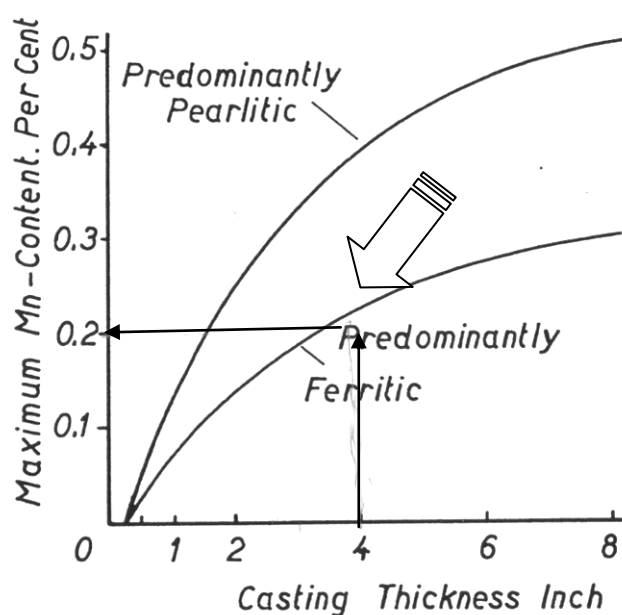
$$(7) \quad Sc = \frac{\%C}{(4,3 - \frac{\%Si}{3} - \frac{\%P}{3})}$$

Tabela-6. Tabela de %Carbono e %Silício recomendada para ferros nodulares de média liga a não ligado, Karsay,1975

Recommended C and Si contents for unalloyed to medium alloyed ductile irons.

Wall Thickness, inch		Matrix Desired, As-Cast			
minimum	maximum	predominantly pearlitic		predominantly ferritic	
		TC %	Si %	TC %	Si%
1/8	1/8	4.00	3.75	3.95	4.00
	1/4	3.70	3.75	3.65	4.00
	1/2	3.50	3.75	3.35	4.00
	1	3.20	3.75	3.15	4.00
	2	3.05	3.75	3.00	4.00
	4 or more	3.00	3.75	2.95	4.00
1/4	1/4	3.90	3.25	3.75	3.75
	1/2	3.70	3.25	3.55	3.75
	1	3.40	3.25	3.25	3.75
	2	3.25	3.25	3.10	3.75
	4 or more	3.20	3.25	3.05	3.75
1/2	1/2	3.85	2.75	3.70	3.25
	1	3.55	2.75	3.40	3.25
	2	3.40	2.75	3.25	3.25
	4 or more	3.35	2.75	3.20	3.25
1	1	3.60	2.50	3.50	3.00
	2	3.45	2.50	3.35	3.00
	4 or more	3.40	2.50	3.30	3.00
2	2	3.60	2.10	3.40	2.75
	4 or more	3.55	2.10	3.35	2.75
4 or more		3.60	2.00	3.40	2.50

Fig.24. %Mn recomendado para uma liga com 2,5%Si, Karsay,1975



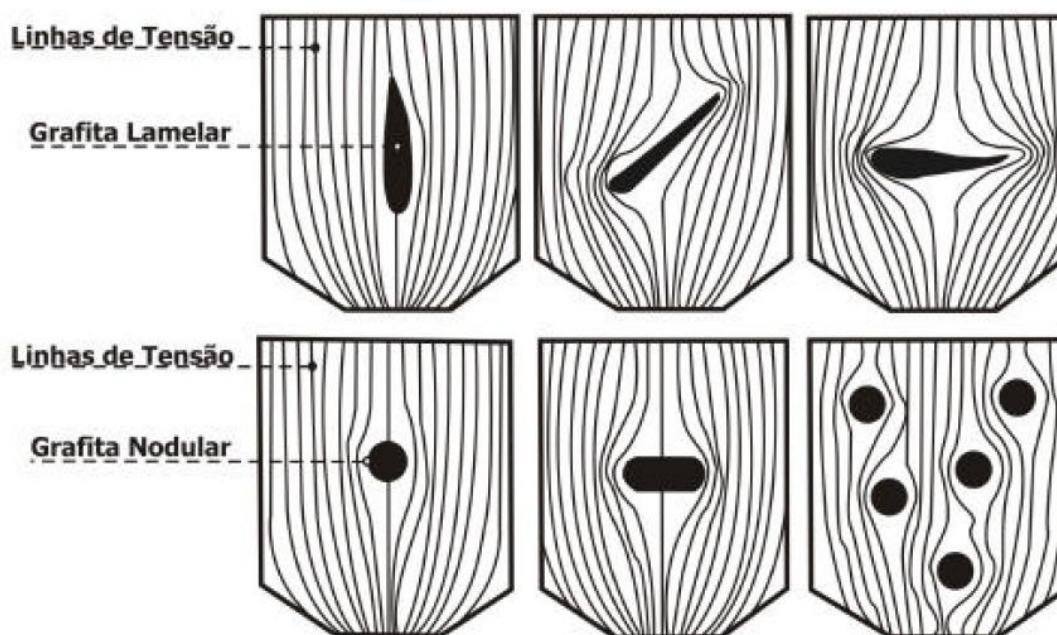
2.5 Influência da Grafita nas Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos são extremamente influenciadas pela forma, tamanho, distribuição e quantidade de grafita na matriz.

Isto se deve, devido ao efeito da grafita na matriz, conforme mostra figura-25, por um lado, a grafita reduz a área resistente da matriz, conhecido como efeito estrangulamento e por outro lado, determina a concentração de tensões em certos pontos, conhecido como efeito entalhe. As linhas de fluxo de tensões em uma matriz metálica de ferro fundido são desviadas e aproximadas em torno do nódulo ou lamela.

Os efeitos de estrangulamento e entalhe promovem tensões que reduzem a resistência e ductilidade nos ferros fundidos, porém estes efeitos são mais pronunciados no ferro fundido cinzento devido à forma de sua grafita ser lamelar e menos pronunciado nos ferros fundidos nodulares devido à forma de sua grafita ser esferoidal e isto faz com que este ferro fundido tenha mais resistência e ductilidade em relação ao ferro fundido cinzento (ANGELO JUNIOR,2003).

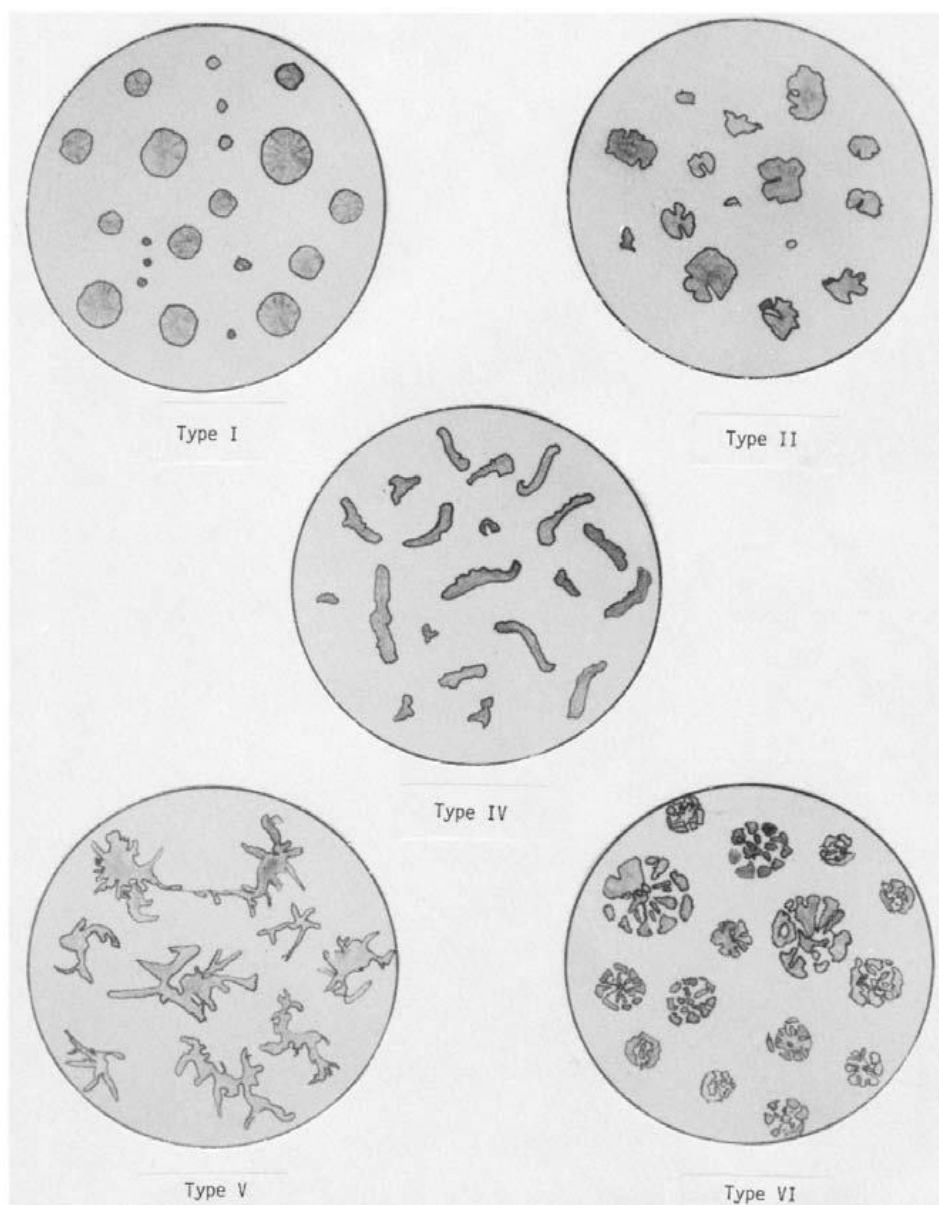
Fig.-25. Linhas de tensão nas lamelas ou nódulos de grafita, Ângelo Junior 2003.



As grafitas são classificadas quanto a forma da grafita, forma do nódulo, tamanho e quantidade.

1. Quanto a sua forma elas são classificadas pela norma ASTM A395/A395M – 99 (2009), conforme figura-26, onde os nódulos perfeitos são do tipo I, os nódulos irregulares tipo II, partículas de grafita vermicular tipo IV, grafita Crab tipo V e grafita explodida tipo VI, numa mesma metalografia é possível encontrar uma distribuição onde se tem nódulos perfeitos e alguns nódulos degenerados.

Figura-26. Classificação da forma de grafita no ferro fundido nodular, ASTM A395/A395M – 99 (2009).



2. Quanto à forma do nódulo, isto é, sua morfologia, que é determinada pelo grau de nodularidade, que mede o percentual de grafitas esféricas tipo I e II, segundo ASTM A395/A395M – 99 (2009).

Para determinação da nodularidade é necessário considerar o fator de esfericidade, *Roundness Factor*, que é dado pela equação abaixo e mostrado na figura-27 e 28:

(8)

$$\text{Fator de esfericidade} = \frac{A}{A_m} = \frac{4 * A}{\pi * (l_m)^2}$$

Onde:

$A \rightarrow$ área da partícula;

$A_m \rightarrow$ área do círculo;

$l_m \rightarrow$ comprimento máximo da partícula;

Figura-27. Fator de esfericidade dos ferros fundidos nodulares, Ângelo Junior 2003.

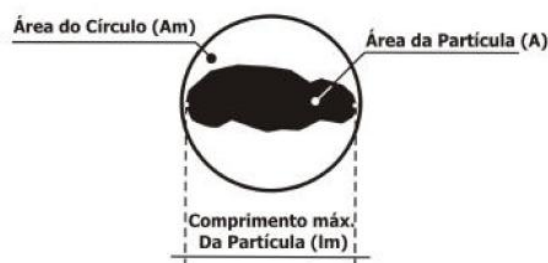
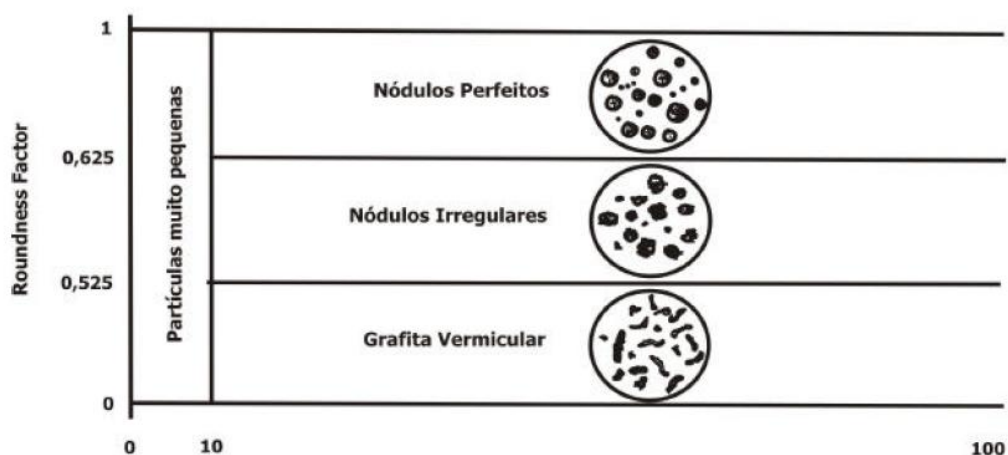


Figura-28. Classificação segundo fator de esfericidade, Ângelo Junior 2003.



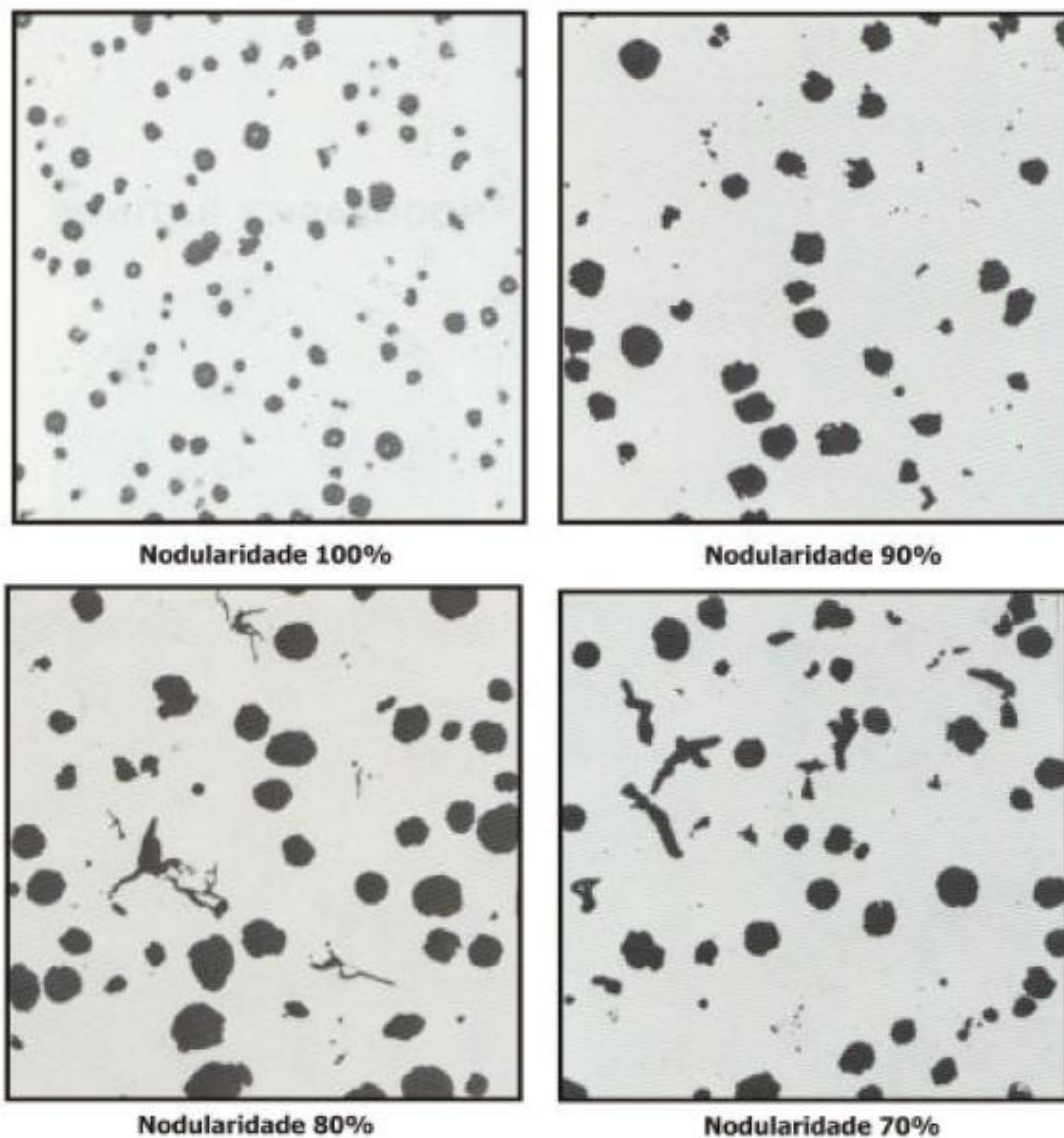
Nodularidade é definida pela seguinte equação:

(9)

$$\text{Nodularidade} = \frac{\sum A_{\text{nódulos-perfeitos}} + 0,5 * \sum A_{\text{nódulos-irregulares}}}{\sum A_{\text{partículas}}} * 100$$

É recomendada uma área mínima de 4mm² para análise. Na figura-29 é possível observar alguns padrões de nodularidade.

Figura-29. Nodularidade em quatro níveis, sem ataque, Ângelo Junior 2003.



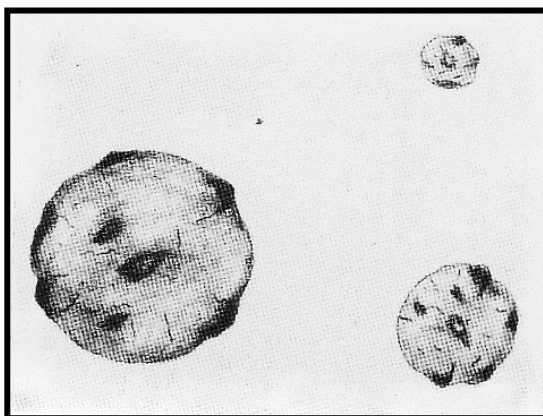
Quanto melhor for à nodularidade melhor serão os valores de tensão de ruptura e alongamento, visto que os efeitos de estrangulamento e entalhe serão minimizados à medida que o nódulo fique mais esferoidizado.

3. Quanto ao tamanho do nódulo, neste caso, a classificação é feita pela dimensão linear da grafita, conforme norma ASTM A247-10., mostrado na tabela-7 e figura-30.

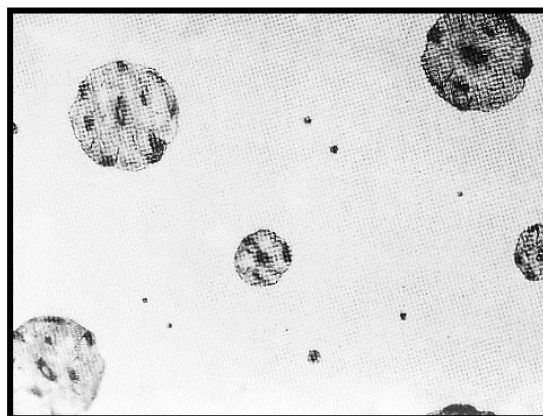
Tabela-7. Dimensão linear(tamanho) da grafita de acordo com a classe, ASTM A 247-10.

Classe de tamanho	Dimensão máxima em mm com aumento de 100X.
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

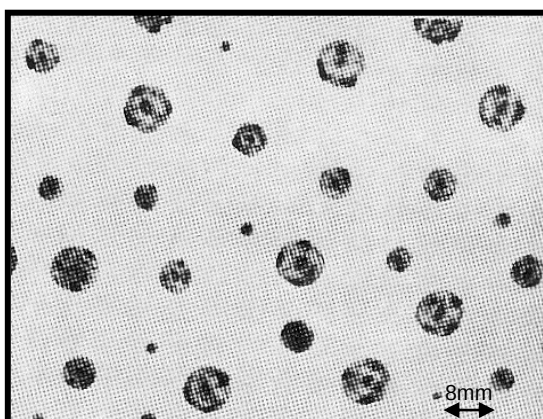
Figura-30. Tamanho de grafita esferoidal, ASTM A 247-67, Reaprovada em 1990, SENAI – CEFET, 1995.



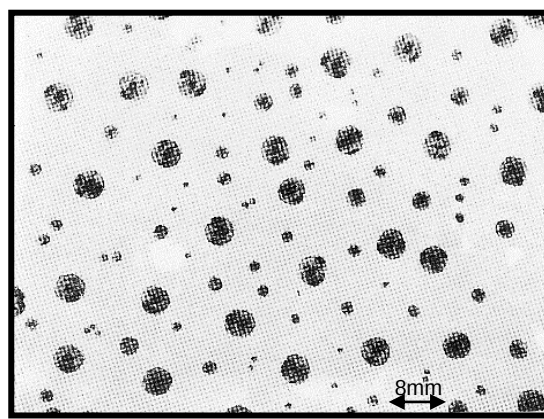
Tamanho 3



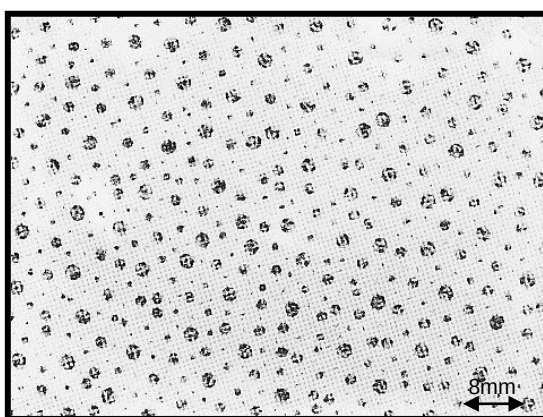
Tamanho 4



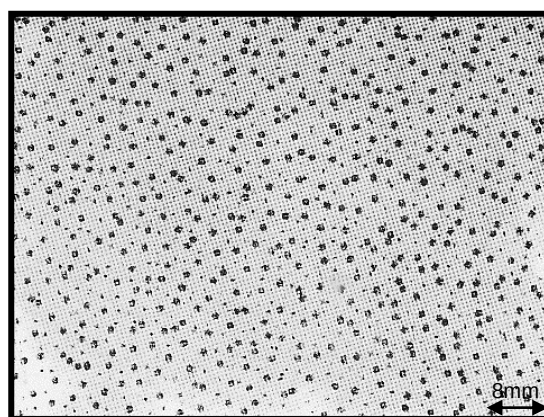
Tamanho 5



Tamanho 6



Tamanho 7



Tamanho 8

O tamanho dos nódulos é função da taxa de resfriamento, do teor de carbono e da inoculação, quanto menor for o superesfriamento menor será a velocidade de crescimento das células eutéticas e maior será o nódulo. Quanto maior o percentual de carbono maior será a fração de grafita presente na microestrutura.

4. Quanto a quantidade de nódulos por milímetro quadrado, é definido pela seguinte equação (ABNT MB 1512):

$$(10) \quad N^{\circ} \text{ de Nódulos/mm}^2 = \frac{\sum N_{\text{nódulos-inteiros}} + 0,5 * \sum N_{\text{nódulos-fracionados}}}{\left[\frac{\text{área.real}}{(\text{ampl.linear})^2} \right]}$$

Onde:

$N_{\text{nódulos-inteiros}}$ → Número de nódulos inteiros

$N_{\text{nódulos-fracionados}}$ → Número de frações de nódulos

área real → Área real da superfície analisada

ampl.linear → Ampliação utilizada no exame

Figura-31. Padrão comparativo de nº de nódulos, 75 nódulos/mm², Karsay, 1975.

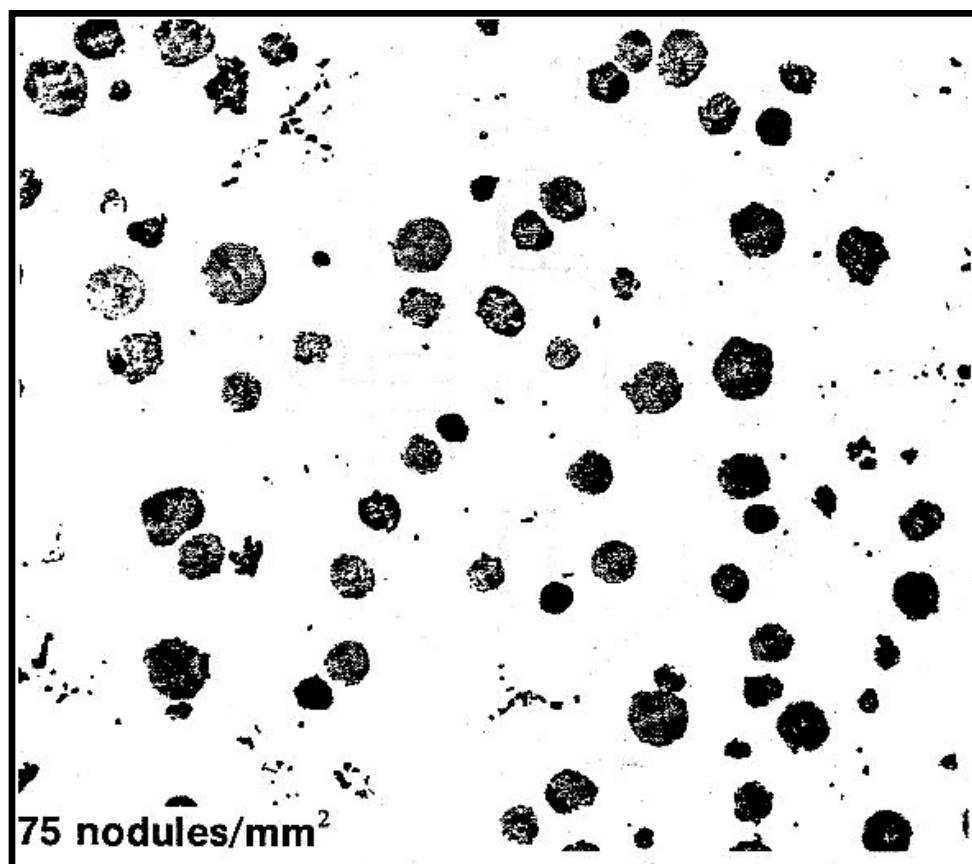


Figura-32. Padrão de comparativo de nº de nódulos, 100 nódulos/mm², Karsay, 1975.

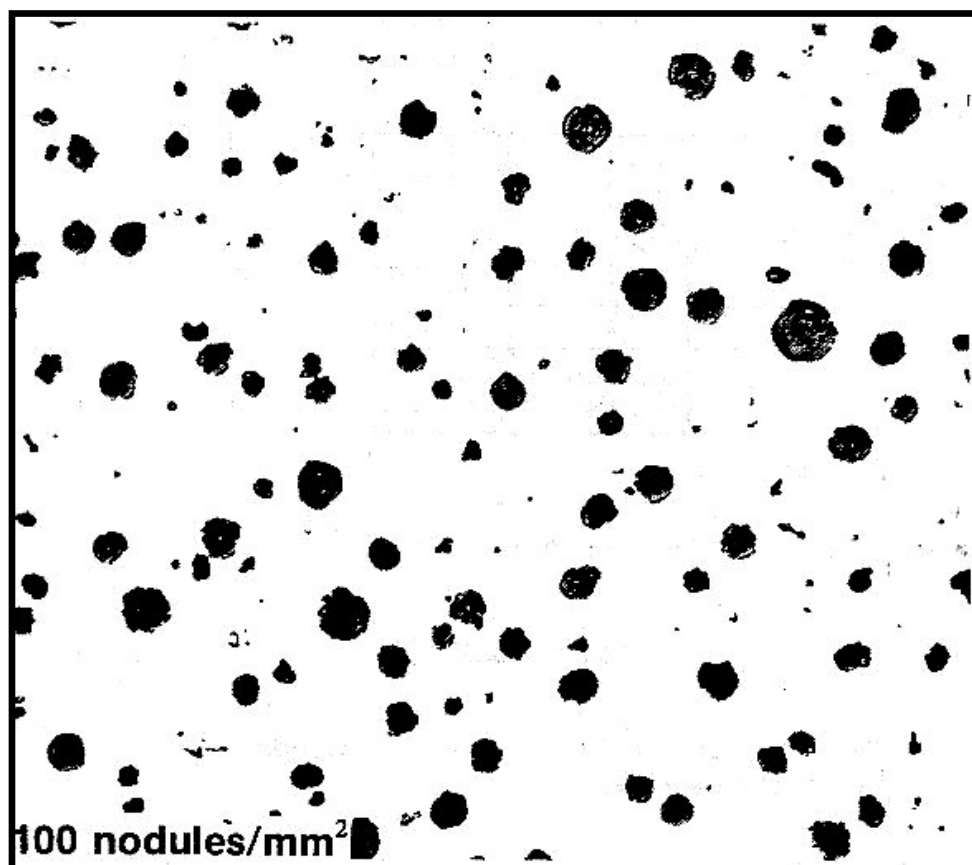


Figura-33. Padrão de comparativo de nº de nódulos, 125 nódulos/mm², Karsay, 1975.

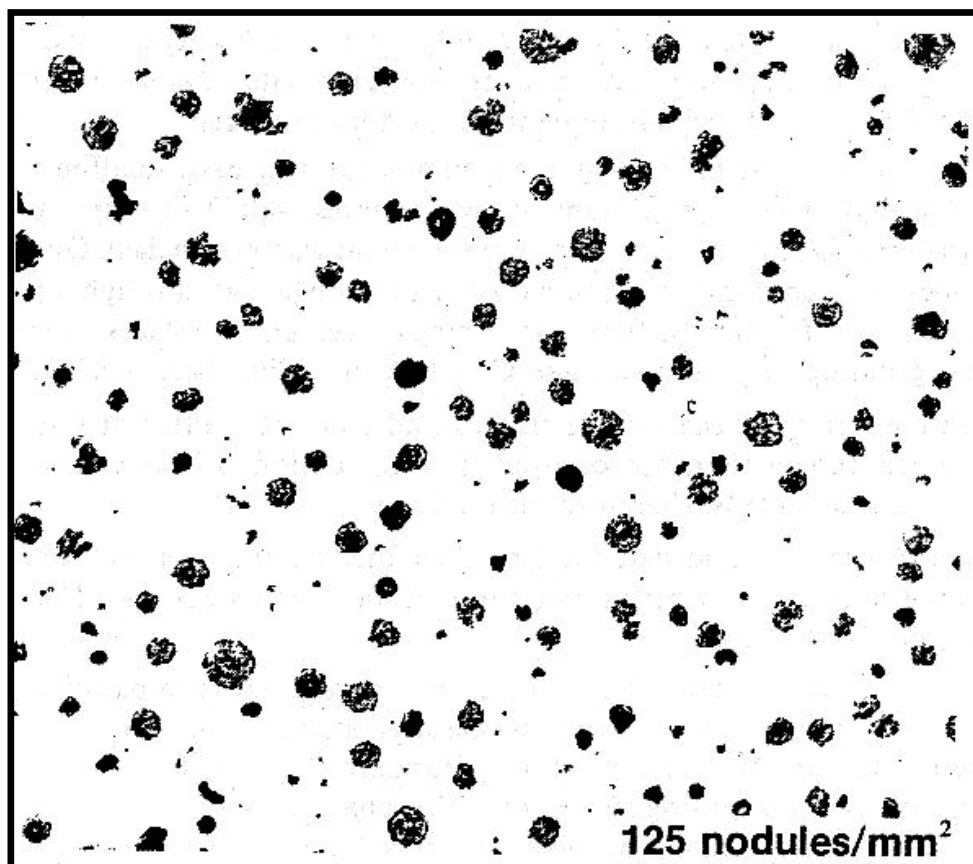


Figura-34. Padrão de comparativo de nº de nódulos, 150 nódulos/mm², Karsay, 1975.

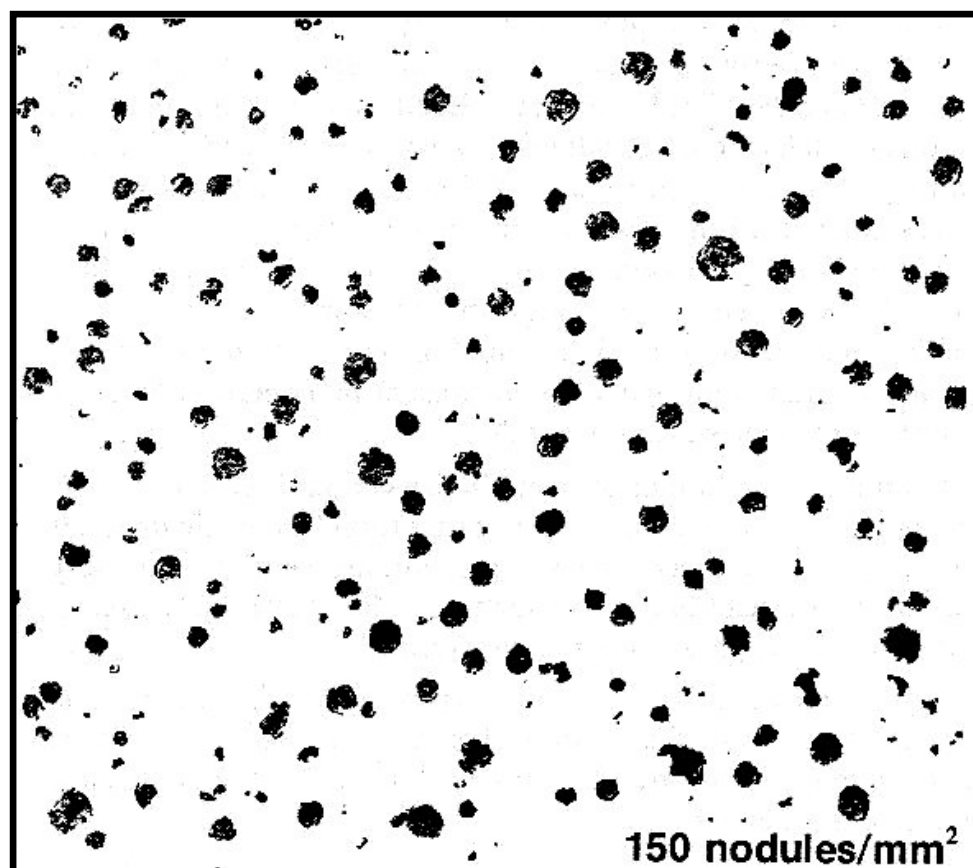


Figura-35. Padrão de comparativo de nº de nódulos, 175 nódulos/mm², Karsay, 1975.

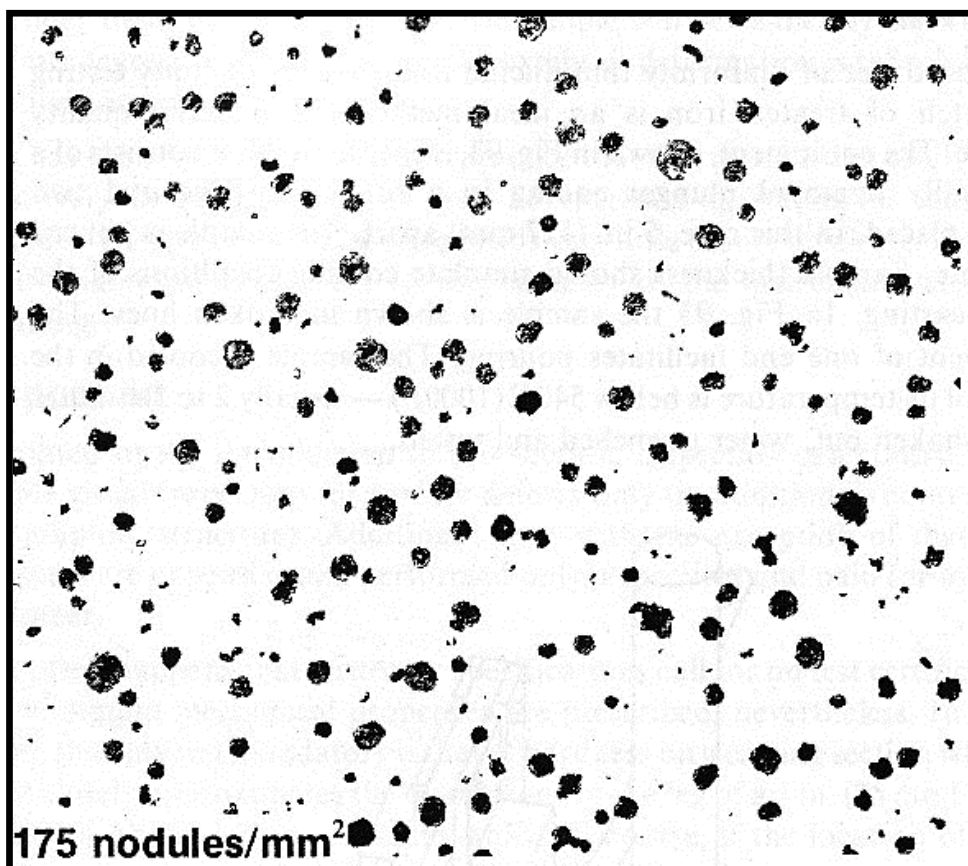
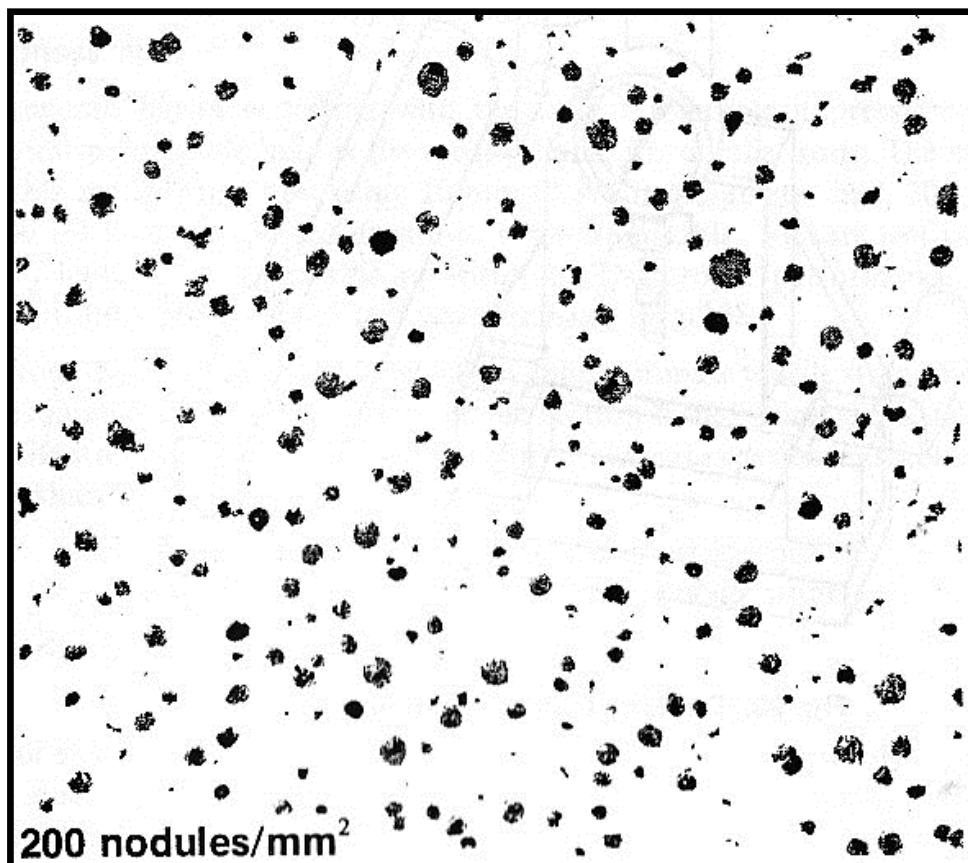


Figura-36. Padrão de comparativo de nº de nódulos, 200 nódulos/mm², Karsay, 1975.



O número de nódulos, mostrados nas figuras de 31 a 36, tem grande influência na formação da matriz e conseqüentemente, nas propriedades mecânicas.

Como visto anteriormente, quanto maior o numero de nódulos, menor a distância entre nódulos, como o carbono precisa difundir da área entre os nódulos para a grafita, então quanto menor a distância entre os nódulos, maior será a formação de uma estrutura ferrítica na matriz, melhorando o alongamento.

O aumento do número de nódulos aumenta a nodularidade, isto é, aumenta a quantidade de grafitas esferoidais, que por conseqüência, melhora os valores de tensão de ruptura e alongamento.

Um alto número de nódulos produz uma microestrutura mais fina, homogênea, reduzindo a segregação de elementos nocivos que contribuem para a precipitação de carbonetos intercelulares e reduz também a fração de volume de carbonetos eutéticos.

O tamanho dos nódulos diminui com o aumento do número de nódulos, provocando um aumento na tensão de ruptura, fadiga e propriedades de fratura.

Normalmente pequenas quantidades de perlita são encontradas nas regiões com grande número de nódulos.

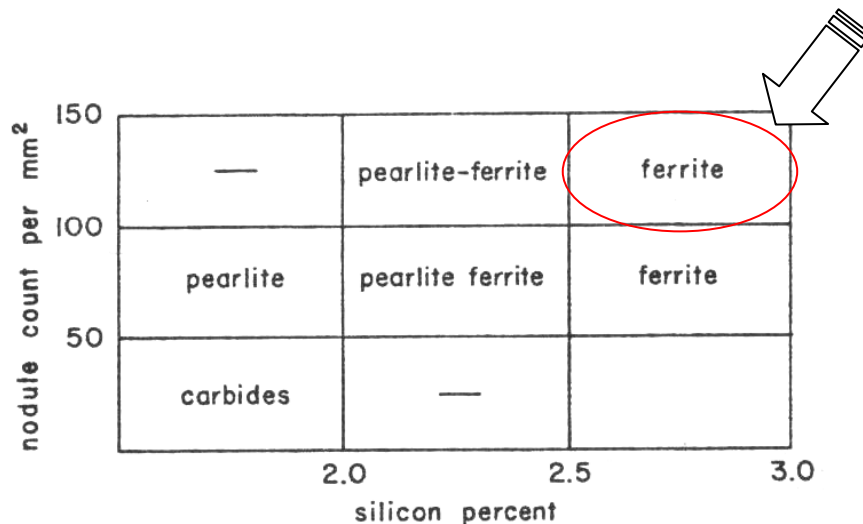
È importante ressaltar que, existe uma relação ótima de nódulos por seção do fundido e que um número excessivo de nódulos poderá afetar as propriedades.

Para um ferro fundido nodular com um grande número de nódulos a matriz será ferrítica e menor será o efeito da taxa de resfriamento na formação de perlita.

Por outro lado, quanto menor a quantidade de nódulos, maior será a distância entre os nódulos e mais difícil será a difusão do carbono, normalmente, a quantidade de perlita fica mais sensível a mudanças quando o número de nódulos é baixo, principalmente quando existem elementos com efeitos perlitizantes na composição química, como o Manganês.

Na tabela-8 é mostrada a influência do silício no número de nódulos considerando o tipo de matriz, que no nosso caso deve ser a ferrítica.

Tabela-8. %Si recomendado para obtenção do número de nódulos, no ferro nodular não ligado, Karsay,1975



2.6 Resistência ao Impacto de Ferros Fundidos Nodulares Ferríticos

O ensaio de impacto é extremamente importante para componentes sujeitos a aplicação de impacto e a baixas temperaturas, nestas condições é muito importante identificar o momento em que a fratura passa de dúctil (ocorre normalmente a altas temperaturas), para frágil (normalmente ocorre a baixas temperaturas), também denominada de zona de transição dúctil-frágil, dependendo do tipo de variável estudada podem ser utilizados corpos de prova com ou sem entalhe para avaliar quantidade de energia absorvida.

A fratura no ferro fundido é caracterizada pela forma como a mesma ocorre.

○ Modo Dúctil de Fratura

Ocorre com intensa deformação plástica e em condições que propiciem uma boa movimentação de discordâncias, tais como: baixa densidade de discordâncias, alta temperatura, baixo teor de elementos de liga que endurecem por solução sólida, baixa

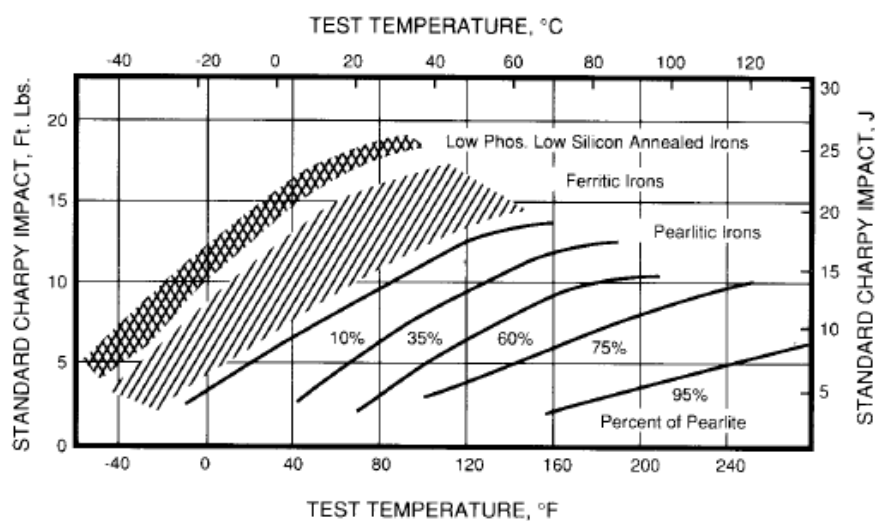
quantidade de interface que diminuem o livre caminho médio das discordâncias (GUESSER, 2009).

- Modo Frágil de Fratura

Quando a deformação plástica tem dificuldade para ocorrer, a fratura característica é a clivagem, trata-se de um mecanismo frágil de fratura que ocorre em planos cristalográficos preferenciais (GUESSER, 2009).

Uma das variáveis que influenciam no teste de impacto é a quantidade de perlita, visto que seu aumento desloca a zona de transição dúctil-frágil para maiores temperaturas diminuindo a energia absorvida no patamar dúctil, que pode ser observado na figura-37.

Figura-37. Efeito da quantidade de perlita na resistência ao impacto de ferros fundidos nodulares, ROEDTER, H. e GAGNÉ, 2003.



Effect of matrix microstructure on impact energy for v-notched Charpy specimens.

O aumento do teor de carbono também aumenta a quantidade de grafita e em consequência o número de nódulos, diminuindo a energia absorvida no patamar dúctil devido à diminuição da distância entre as partículas de grafita, conforme figura-38.

A temperatura dúctil-frágil também diminui devido à dificuldade de propagar trincas de clivagem em nodulares com alto número de nódulos, figura-39, uma vez que cada nódulo encontrado pela trinca se comporta como

um arredondamento local da ponta da trinca exigindo um maior esforço para continuar sua propagação.

Segundo Bradley & Srinivasan (apud GUESSER, 2009), a temperatura de transição dúctil-frágil, em amostras sem entalhe, para ferro fundido nodular ferrítico, pode ser expressa por:

(11)

$$TT = 74 - 15,8 * \sqrt{d} - 19,5 * \frac{1}{\sqrt{D}}$$

Onde:

TT → temperatura de transição (°C)

d → distância entre os nódulos de grafita(mm)

D → tamanho de grão ferrítico(mm)

Figura-38. Efeito do teor de carbono no teste de impacto com entalhe em V, para o ferro fundido nodular ferrítico, ROEDTER, H. e GAGNÉ, 2003.

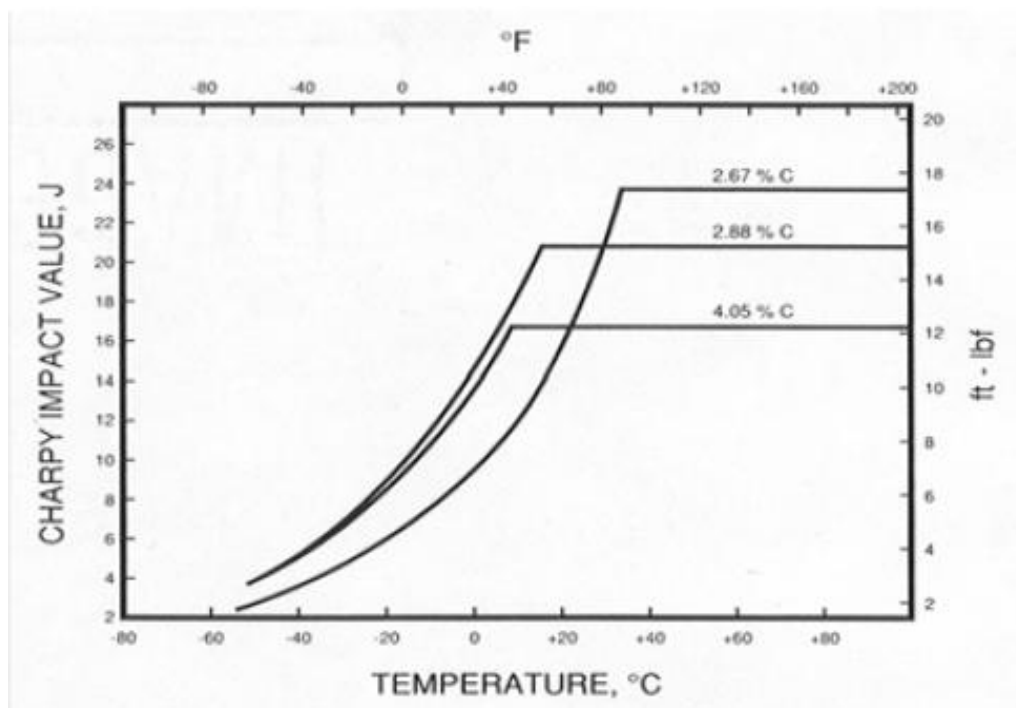
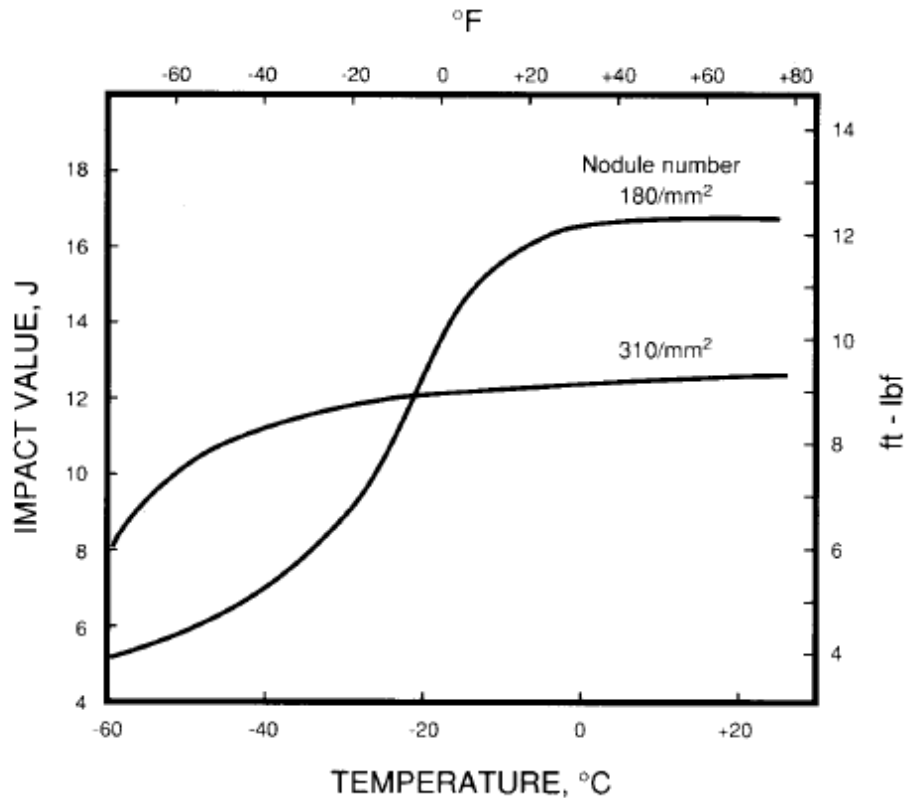


Figura-39. Efeito do número de nódulos de grafita , no teste de impacto com entalhe em V, para o ferro fundido nodular ferrítico, ROEDTER, H. e GAGNÉ, 2003.



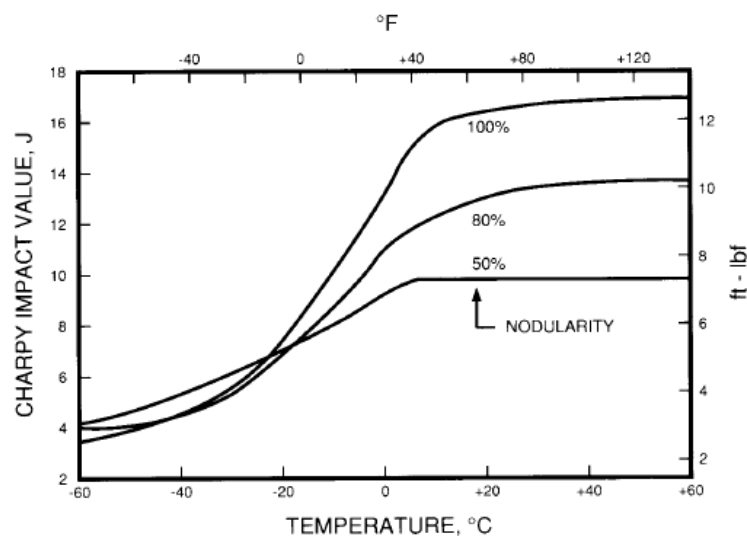
Effect of nodule count on the v-notched Charpy impact properties of ferritic Ductile Iron.

O aumento do número de nódulos de grafita diminui a energia absorvida no patamar dúctil possivelmente devido a diminuição da distância entre as partículas de grafita, figura-39 (GUESSER, 2009).

O aumento da nodularidade diminui o efeito das tensões provocadas pela má formação do nódulo, efeito estrangulamento e entalhe, fazendo com que aumente a energia absorvida no patamar dúctil, conforme figura-40.

Por outro lado a diminuição da nodularidade aumenta as tensões e diminui a energia absorvida no mesmo patamar (GUESSER, 2009).

Figura-40. Influência da nodularidade da grafita no teste de impacto com entalhe em V, para o ferro fundido nodular ferrítico, ROEDTER, H. e GAGNÉ, 2003.



Influence of graphite nodularity on the Charpy fracture properties of v-notched samples of ferritic Ductile Iron.

Os elementos de liga como Silício, figura-41 e Fósforo, figura-42, que causam endurecimento por solução sólida, tendem a aumentar a temperatura de transição dúctil-frágil, então, recomenda-se que, no caso do ferro fundido nodular ferrítico, a depender da aplicação, que não se aumente sem necessidade a resistência mecânica sob perda da tenacidade, sugere-se a utilização do níquel, que aumenta 10°C a temperatura de transição, para uma adição de 1%Ni (GUESSER,2009).

Figura-41. Influência do teor de Silício no teste de impacto com entalhe em V, para o ferro fundido nodular ferrítico, SORELMETAL, 1990.

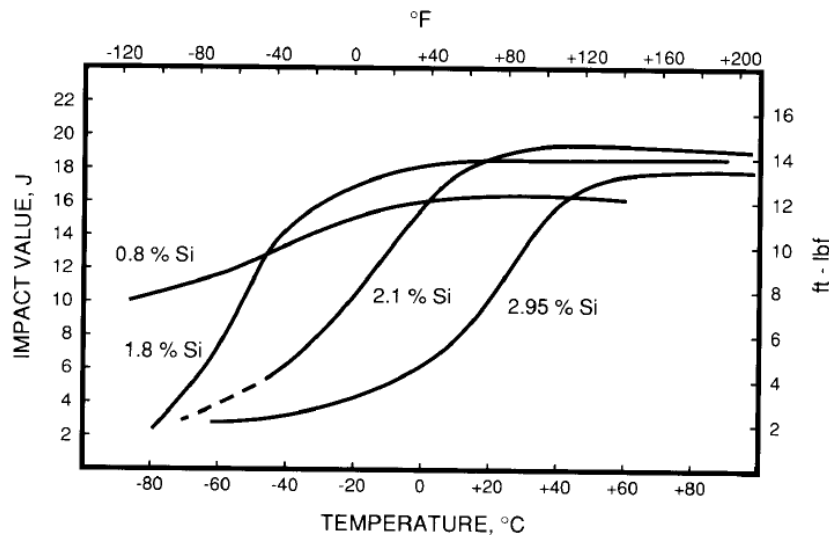
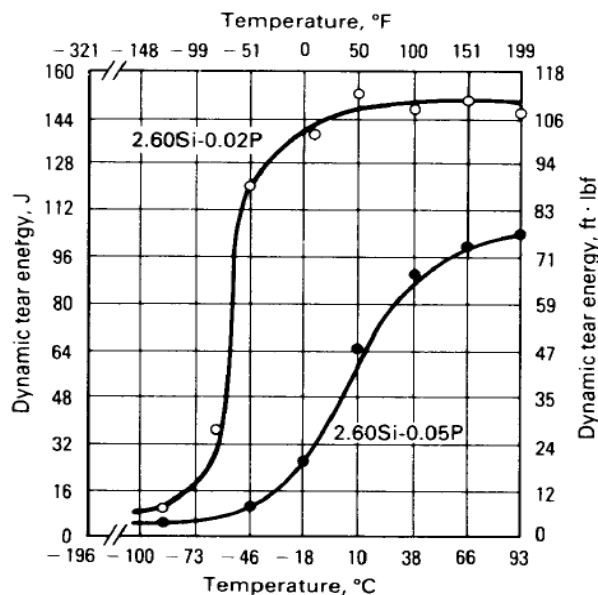


Figura-42. Influência do teor de fósforo no teste de impacto com entalhe em V, para o ferro fundido nodular ferrítico, SORELMETAL, 1990.



2.7 Elaboração de Metal Líquido

Na etapa de elaboração de metal líquido é extremamente importante fazer uma boa preparação da carga fria, já levando em consideração a composição química desejada.

Em se tratando de ferro fundido nodular ferrítico os requerimentos de Mn, S, P e demais elementos químicos são fundamentais para se atingir a composição química requerida e esta, será definida a partir da carga metálica na etapa de carregamento.

Basicamente o processo de elaboração é dividido em quatro etapas: carregamento, carburação, fusão e refino.

Na etapa de refino, uma das variáveis mais importantes durante a elaboração do metal líquido é o controle da temperatura. Recomenda-se não ultrapassar 1550°C, para evitar a perda excessiva de núcleos de sílica que serão extremamente importantes para o processo de inoculação.

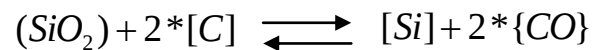
Observa-se no gráfico da figura-43 que para uma determinada composição de 3,5%C e 2,0% de Si, a temperatura para início da formação do

CO é de 1470°C, a partir desta temperatura inicia a redução do óxido de silício (DÖTSCH, 2009).

Redução do óxido de silício, equação 12.

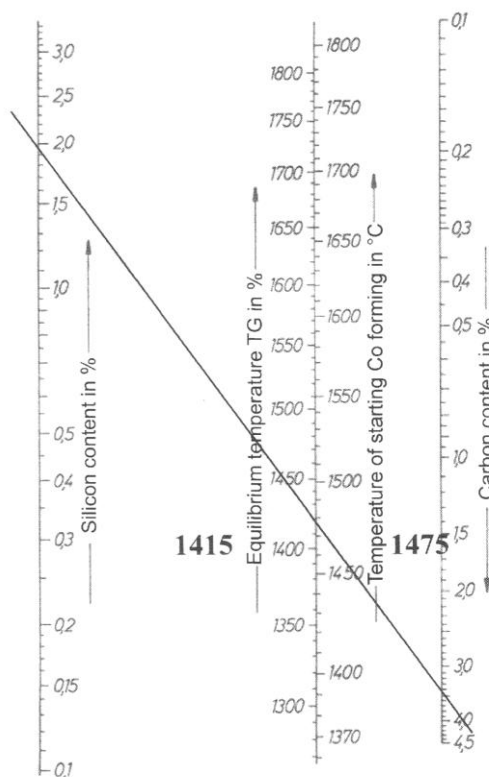
(12)

Início da transformação com o
aumento da temperatura



Por outro lado também se recomenda um superaquecimento do banho entre 1460 e 1510°C, durante 5 a 15 minutos, sendo esta temperatura melhor definida em função do %C e %Si (figura-43), o objetivo deste superaquecimento é de destruir os núcleos de sílica instáveis do metal líquido, tornando-o mais homogêneo. (SANTOS et al, 2005)

Figura-43. Temperatura de equilíbrio TG e temperatura de formação do CO em função do Carbono e Silício, E.Dötsch, 2009.



2.8 Nodulização

Como já discutido no item 2.1.1, o processo de nodulização tem como objetivo a obtenção da grafita na forma esferoidal, em nódulos, na realidade o elemento mais comum que promove a esferoidização da grafita é o magnésio (KARSAY et al, 1975).

Outros elementos, além do magnésio e cério também desenvolvem a mesma função, são eles: cálcio, lítio, bismuto, sódio, potássio, selênio, bário, estrôncio, zinco, escândio, samário, neodímio, lantânio, alumínio, silício, ítrio e telúrio (SANTOS et al, 1977).

De acordo com LUX (apud SANTOS, 1977), os elementos nodulizantes mais eficientes em ligas comerciais, possuem as seguintes características em comum:

- Grande afinidade com o enxofre e oxigênio para formar produtos de reações estáveis.
- Baixa solubilidade no ferro fundido.
- Marcante tendência para segregação durante a solidificação.
- Certa afinidade com o carbono e uma baixa solubilidade na grafita.

É importante ressaltar que é possível obter nódulos de grafite em ligas de Ferro-Carbono-Silício sem a adição de elementos nodulizantes, os trabalhos de MERCHANT, SANTOS (1977), obteve grafita nodular, utilizando fundição sob vácuo e THOMAS e GRULESKI, SANTOS (1977) obteve grafita nodular submetida a elevadas velocidades de resfriamento.

Vários são os processos de nodulização, na realidade a escolha do processo deverá ser realizada em função da viabilidade financeira do investimento, infraestrutura da planta, custo operacional, custo de manutenção, condições de processo, tamanho da peça, definição da liga produzida, exigências quanto ao requerimento de qualidade do produto e condições ambientais.

A tabela-9, mostra os tipos de processos de nodulização em função do agente nodulizante, segundo SANTOS, ANGELO JUNIOR(2003).

Tabela-9. Tipos de processos de nodulização, Santos et al,1977.

Processos de nodulização utilizados	
Agente Nodulizante:	Processo de Nodulização:
Magnésio Puro	Conversor
	Pont-a-Mousson
	Cored Wire
	Panela de Pressão
Coque Impregnado de Magnésio	Panela Rotativa
	Panela dotada de Grelha
Ligas Nodulizantes Fe-Si-Mg	TIP ; Vortex ; Flotret
	In Mold; T-Knoch; Sanduíche
	Plug-Poroso; Tundish Cover
	Imersão por Sino; Simples Transferência

O processo *tundish cover* e o *sanduíche* são os métodos mais largamente utilizados em função de serem: simples, confiáveis e não necessitar de alto investimento em maquinários.

O processo *in mold*(no molde) é um dos melhores métodos para produzir ferros fundidos de alta integridade, necessitando mais controle de qualidade do que os outros métodos.

Os processos de *conversor* e *cored wire*(arame com alma de inoculante) são baseados na adição de magnésio puro, as vantagens desses métodos originam-se do fato de que a dessulfuração e a nodulização simultânea podem ser alcançadas com um único passo.

O processo de *plugue poroso* tem a vantagem de utilizar a mesma panela para dessulfuração, nodulização ou inoculação (MOHLA e DAVID, 1998).

Abaixo, pode ser observado na tabela-10 um comparativo entre os principais processos de nodulização (SKALAND, 1999).

Tabela-10. Comparativo entre os principais processos de nodulização, Skaland,1999.

	Vazamento por cima ou Sanduíche		Tundish Cover	No Molde	Conversor	Cored wire
Tipo de Liga	NiMg	FeSiMg	FeSiMg	FeSiMg	Mg	Mg ou SiMg
Teor de Mg (%)	4-15	3-10	3-10	5-10	100	10-45
Rendimento do Mg (%)	45-90	35-70	40-75	70-80	40-50	35-50
Flexibilidade (melhor=6)	6	6	5	2	1	3
Geração de Fumos	Média	Média-Alta	Baixa	Zero	Alta	Média
Restrição de S no metal base(%)	0,04	0,03	0,03	0,01	0,15	Não tem
Restrição de peso do metal	Não tem	Não tem	Não tem	<500kg	>500kg	>500kg
Efeito do inoculante	Não tem	Baixo-Médio	Médio-Alto	Muito Alto	Não tem	Não tem-Baixo
Violência da reação	Baixo-Médio	Médio-Alto	Baixo-Médio	Muito Baixo	Muito Alto	Alto
Unidade de produção (tamanho)	Pequena	Pequena –Grande	Pequena-Grande	Medio-Grande	Grande	Medio-Grande
Licença/Royalty	Não	Não	Não	Não	Sim	Não

2.8.1 Processo de Nodulização Sanduíche

Neste processo, o nome sanduíche é dado devido ao fato de que uma camada de material de cobertura é adicionada por cima da liga, como um sanduíche, conforme figura-44.

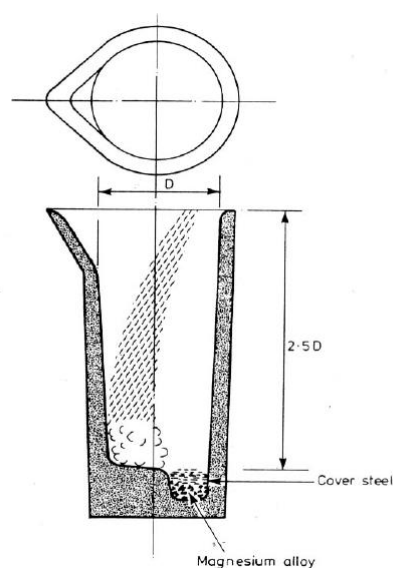
Neste processo a liga nodulizante, a qual contém o elemento magnésio, é adiciona em uma cavidade no fundo da panela em seguida normalmente adiciona-se um composto inoculante e finalmente é realizada a cobertura deste

material com uma camada de pequenas chapas de aço, cujo objetivo além da proteção é de diminuir o impacto da reação exotérmica entre o magnésio e o ferro. Este processo é importante, pois o rendimento do magnésio aumenta com a diminuição da temperatura, este rendimento pode chegar a 50 ou 60% neste processo. O metal líquido é transferido para a panela de tratamento, adicionado o metal pelo lado oposto a cavidade que contém o material de nodulização e sua cobertura, para retardar o início da reação.

As principais vantagens deste processo são tempos curtos de tratamento, simplicidade, flexibilidade, bom rendimento do magnésio com menos escória e fumos.

As desvantagens deste processo é uma maior perda de temperatura devido ao calor adicional necessário para derreter as pequenas chapas de aço de cobertura.

Figura-44. Processo de Nodulização Sanduíche, Skaland, 1999.



2.8.2 Processo de Nodulização Tundish Cover

Neste processo, a panela possui uma cavidade no fundo para a adição da liga nodulizante e uma tampa (tundish cover) que cobre a parte superior da panela, onde o metal será adicionado e através de um furo na parte inferior da tampa o metal será vazado para dentro da panela. A tampa aumenta a pressão

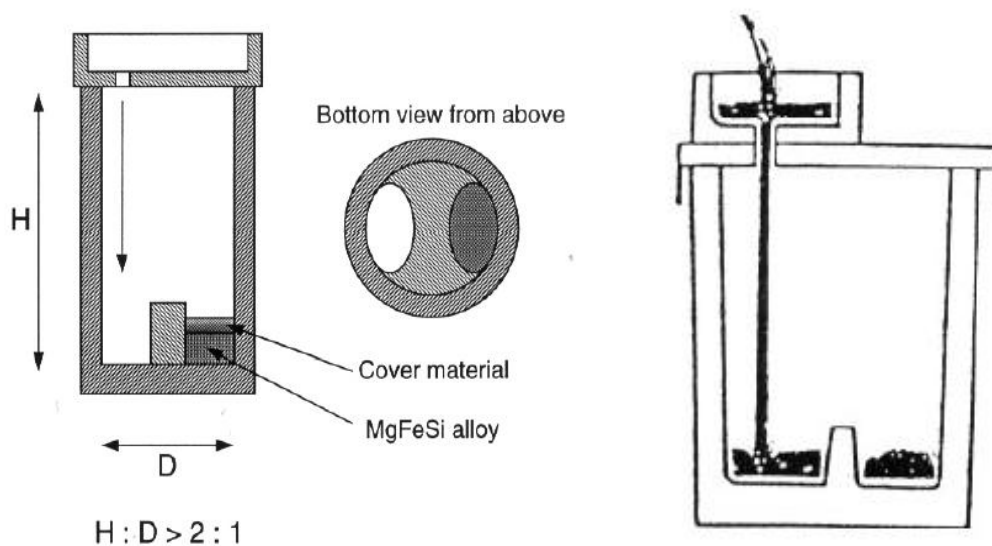
do sistema aumentando o rendimento do magnésio, conforme figura-45 (KARSAY, 1975).

A grande vantagem deste processo é o rendimento do magnésio, visto que com a utilização da tampa as perdas de magnésio (MgO) serão muito reduzidas, uma vez que enquanto o metal estiver passando pelo furo na parte inferior da tampa (canal de descida), todo o canal é coberto com metal, não existindo entrada de oxigênio dentro da panela, além da redução de fumos.

Neste processo o rendimento do magnésio chega a 70-75%, que é uma melhoria considerável em relação ao método sanduíche simples (SKALAND, 1999).

Existem diversos tipos de tampa (tundish cover) de tamanhos que variam para tratamentos de 100 kg a 10 toneladas. A tampa pode ser projetada para atender uma gama de diferentes condições de fundição. Porém a quantidade de metal na tampa e o canal de descida devem ser dimensionados de acordo com a quantidade de ferro a ser tratada.

Figura-45. Processo de Nodulização Tundish Cover, Skaland, 1999.



Neste processo, a liga nodulizante é injetada diretamente no molde, na realidade existe uma câmara de reação, montada imediatamente antes que o metal entre no molde, onde a liga nodulizante é colocada e ao metal passar ocorre a nodulização já dentro do molde, conforme figuras-46 e 47.

O rendimento do magnésio neste processo chega até 80%, porém é essencial que os teores de enxofre sejam menores do que 0,01% para minimizar a formação de escória, uma outra restrição, esta relacionada a liga nodulizante, uma vez que este processo exige uma liga com granulometria de 1 a 4 mm com baixos teores de óxidos devido a impossibilidade da retirada de escória gerada pelos teores de MgO e CaO presentes na liga nodulizante, fato que não é observado nos dois processos anteriores uma vez que é possível retirar a escória formada da nodulização (SKALAND,1999).

Figura-46. Processo de Nodulização realizado No Molde, Skaland, 1999.

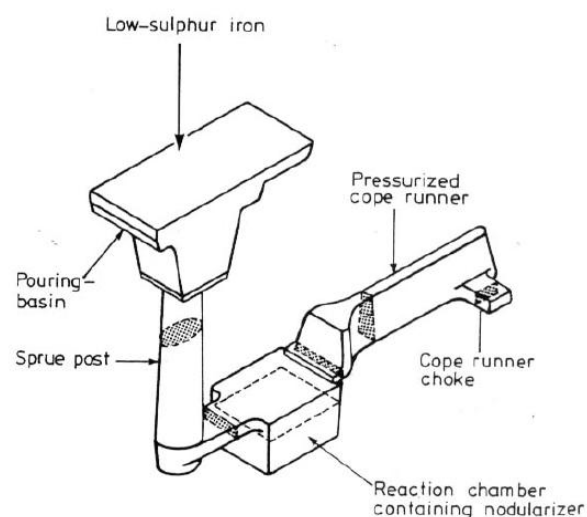
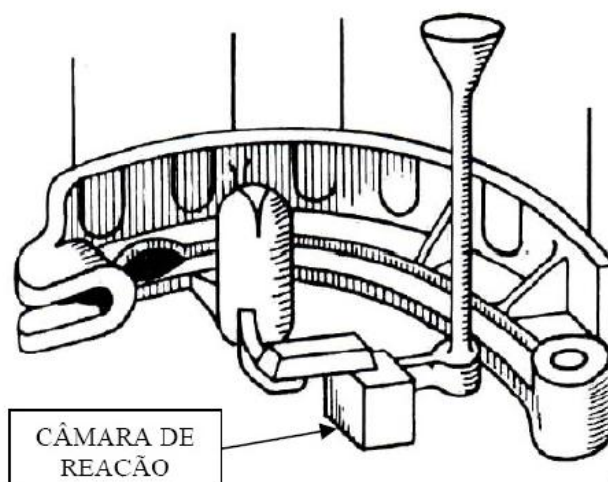


Figura-47. Processo de Nodulização No Molde, Vilela, 2010.



Levando em consideração todos os processos de nodulização, as variáveis mais importantes podem ser definidas como:

1. Composição Química.

O teor de enxofre deve ser controlado a níveis residuais, menores do que 0,020%, visto que o magnésio é um excelente dessulfurante. Da mesma forma para o nível de oxigênio, visto que o magnésio é um forte desoxidante, no caso de fornos a arco elétrico e a indução recomenda-se trabalhar com níveis 10 a 30 ppm. Sendo por esta razão, que não se deve deixar escória no processo de nodulização (SANTOS et al, 2005).

Estes dois elementos, S e O, comprometeram o rendimento do magnésio se não forem controlados.

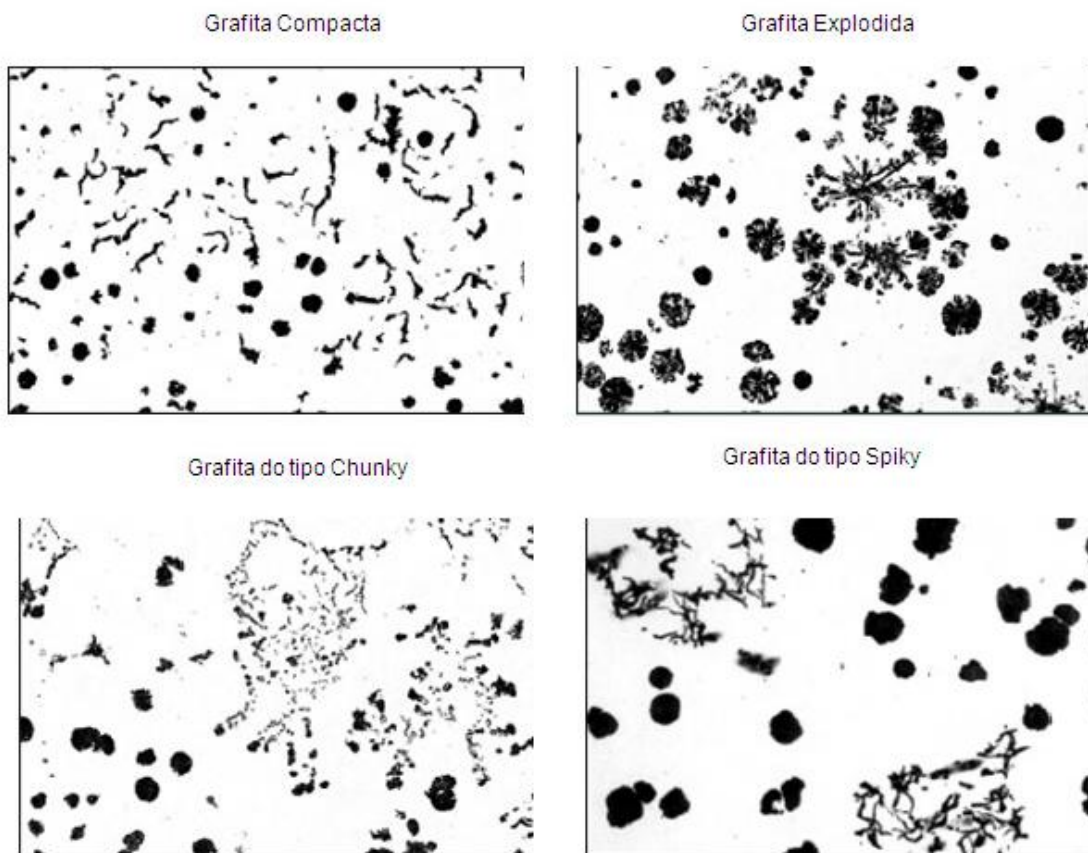
Como já citado anteriormente, na seção 2.4, os níveis de magnésio recomendados são de 0,04 a 0,08%, embora existam casos em que valores residuais de 0,02% ou até menos sejam suficientes, desde que o teor de enxofre esteja baixo.

Valores superiores a 0,10%Mg, formaram grafita degenerada tipo *Spiky*, e muito baixo da ordem de 0,02%Mg tendem a formar nódulos degenerados.

No caso de utilizar o elemento cério como agente nodulizante, teores da ordem de 0,02 a 0,04% seriam suficientes (SANTOS , 1977).

Elementos como cério e terras raras podem ser utilizados como complemento no processo de nodulização ou na neutralização do efeito de alguns elementos de liga como Pb, Bi, As, Sb e Ti na degeneração da grafita nodular.

Figura-48. Formas degeneradas de grafita no ferro fundido nodular, Vilela,2010.



A grafita tipo *Chunk*, figura-48, é provocada pela influência do níquel, cobre e cério, por isso recomenda-se utilizar ligas mestras isentas de cério, para tratamento com magnésio. A grafita *Chunk*, cresce sobre forte ramificação e é caracterizada por uma forma de grafita especialmente fina dispersa com uma superfície ramificada (HASSE, 2010).

2. Tipo do Nodulizante.

O elemento nodulizante mais utilizado é o magnésio e na forma de liga FeSiMg, onde o teor de magnésio pode variar nas ligas na faixa de 3 a 12% em massa e as quantidades de ligas nodulizantes variam de acordo com o tipo de processo e tipo de liga, sendo que estas quantidades variam de 0,9 a 2,5% (VILELA, 2010).

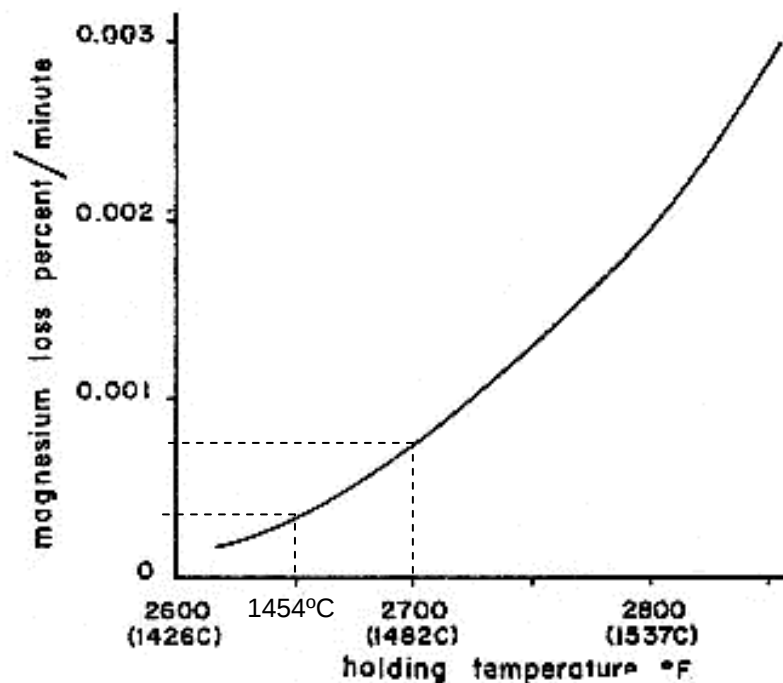
O magnésio e suas ligas possuem baixas temperaturas de vaporização e conseqüentemente sua adição no ferro fundido deve ser feita com muito cuidado (SKALAND, 1999).

Muitas teorias têm sido desenvolvidas no passado para explicar a nucleação dos nódulos de grafita no ferro fundido nodular, incluindo a teoria da bolha de gás, Karsay-1976, teoria da grafita, Kayama-1979, teoria do carbeto de silício, Wang-1981, Fredriksson-1984, teoria do sal como carbeto, Lux-1964, teoria dos óxidos e sulfetos, Jacobs-1974 e por último a teoria do silicato, Skaland-1993, todas essas teorias são baseadas principalmente, no pressuposto de que a grafita é formada como resultado de uma nucleação heterogênea que ocorre durante a solidificação, esta última teoria, Skaland-1993, propõe que os átomos de magnésio adicionados através da liga FeSiMg formam sulfetos estáveis que resultam em pequenas inclusões finamente dispersas pelo banho e que estas inclusões serviram como base para receber uma camada de silicatos e servir de local para o crescimento da grafita (SKALAND, 2005).

3. Temperatura do Banho Metálico

A temperatura do banho metálico deve ser controlada uma vez que temperaturas de tratamento muito altas tem-se um menor rendimento do magnésio em função das perdas de oxidação e volatilização, conforme mostrado na figura 49, de outra forma, temperaturas muito baixas promovem a formação de cementita livre na microestrutura.

Figura-49. Influência da temperatura de espera na perda do magnésio, Karsay,1975



4. Quantidade de metal a ser tratada

A quantidade de metal tratada deve ser analisada com cuidado para evitar perdas de temperatura durante a nodulização e consequentemente redução da temperatura no vazamento, é importante analisar: a temperatura de nodulização, o processo utilizado, as panelas e a temperaturas de vazamento tudo em relação á quantidade de metal a ser tratada, para que evitar descontroles ao longo do processo.

2.9 Inoculação

Segundo, OLSEN, SKALAND e HARTUNG(2004), inoculação é um meio para controlar e melhorar a microestrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido. O processo de inoculação proporcionará regiões de nucleação suficientes para que o carbono dissolvido precipite como grafita ao invés de carboneto (cementita).

Conforme, SANTOS (1977), a inoculação é a adição de compostos grafitizantes no banho metálico, geralmente rico em silício, os quais são adicionados momentos antes do vazamento.

A inoculação provoca um aumento no número de células eutéticas e uma diminuição do super-resfriamento necessário á solidificação, reduzindo então a velocidade de resfriamento, minimizando a tendência á formação do ferro branco.

O principal objetivo deste tratamento é de promover a formação de grafita durante a solidificação dos ferros fundidos.

A adição desse composto servirá como substrato para a formação de núcleos (inoculação exógena) ou ocorrerá uma reação com os elementos presentes no banho para em seguida serem utilizados como substrato para o crescimento dos núcleos (inoculação endógena), muitas são as partículas que atuam como centros efetivos de nucleação da grafita, entre as quais temos: a própria grafita, óxidos, sulfetos, carbetos, silicatos, bolhas de gás e nitretos (SANTOS, 1977, SKALAND, 2005, ANGELO JUNIOR, 2003).

Os inoculantes mais comuns são baseados em ligas de FeSi75%, contendo pequenas e específicas quantidades de elementos como cálcio, bário, estrôncio, zircônio, terras raras e alumínio.

Alguns inoculantes podem ser utilizados tanto para o ferro cinzento quanto para o nodular, isto em função dos elementos acima citados, os quais são fortes formadores de óxidos, sulfetos e silicatos em ambos os ferros (OLSEN, SKALAND e HARTUNG,2004).

A dissolução do FeSi no banho metálico resulta na formação de regiões de super-resfriamento, localizado ao redor da partícula e é por esta razão que o ferro nodular, para uma dada composição química base e velocidade de

resfriamento, necessita de uma inoculação mais eficiente em relação ao cinzento.

Os ferros fundidos cinzentos e nodulares possuem mecanismos de inoculação diferentes.

No caso dos ferros cinzentos, os elementos ativos no inoculante, cálcio, bário, estrôncio e alumínio, formam primeiramente óxidos estáveis que então passaram a agir como núcleos para a precipitação de compostos do tipo $Mn(X)S$, onde o "X" é o óxido do elemento inoculante, agora esta partícula de sulfeto, servirá como núcleo durante a solidificação (SKALAND, 2001, VILELA, 2010).

No caso do ferro fundido nodular, o grau de nucleação é medido pela quantidade de nódulos de grafita, uma vez que cada núcleo em crescimento da origem a uma grafita, logo, o processo de inoculação é feito com o intuito de aumentar o número de nódulos de nucleação da grafita para que se tenha uma maior precipitação de carbono na forma de grafita, no banho líquido e conseqüentemente uma menor formação de carbonetos de ferro.

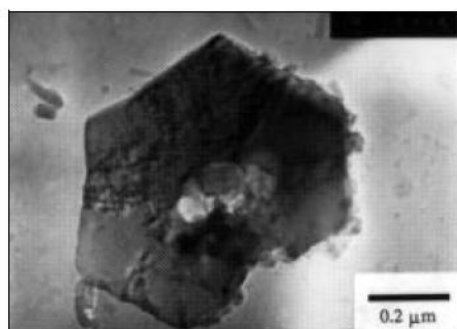
Como já visto anteriormente, na seção 2.8 referente á nodulização, os núcleos iniciam sua formação na nodulização, onde uma grande quantidade de inclusões são formadas, com seus núcleos de sulfeto e um invólucro exterior.

Estas inclusões, que contém complexos de silicatos de magnésio ainda não atuam como locais de nucleação uma vez que a sua estrutura cristalina é diferente da estrutura da grafita. Após a inoculação as superfícies dessas partículas mudam e outros complexos de camadas de silicatos são formados com os óxidos dos elementos inoculantes adicionados.

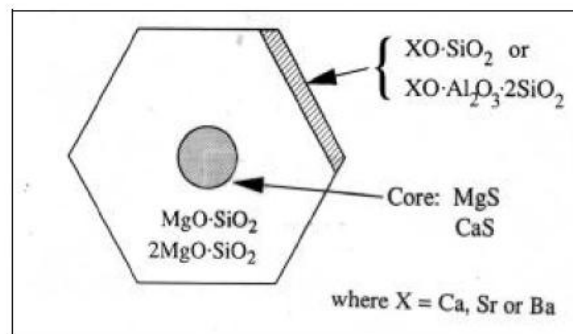
Agora estes silicatos, figura-50, possuem a mesma estrutura cristalina hexagonal da grafita e poderão atuar de forma eficaz como regiões de nucleação para o crescimento do nódulo de grafita durante a solidificação (SANTOS, 1977, SKALAND, 2005).

Figura-50. A figura (a) Mostra o núcleo da partícula de um complexo de sulfetos e óxidos, no ferro fundido nodular com escala de magnitude de 70.000X, através de um microscópio eletrônico de transmissão.

A figura (b) Mostra uma representação esquemática do núcleo da partícula de um complexo de sulfetos e óxidos após a nodulização e inoculação do ferro, Skaland,2001.



(a)



(b)

A determinação do inoculante que será utilizado na fabricação de ferros fundidos nodulares depende de: tipo e granulometria do inoculante, composição química do metal base, temperatura de inoculação, tamanho da seção da peça, tempo após inoculação e início de solidificação (Fading), entre outros.

A tabela-11 abaixo mostra as principais variáveis de processo de inoculação.

Tabela-11. Variáveis do processo de inoculação, Angelo Junior,2003.

Variáveis da Inoculação:	Fatores:
Composição Química Base	Teores de carbono equivalente
	Teores de silício
	Oxigênio dissolvido
	Elementos formadores de carboneto
Velocidade de Resfriamento	Espessura da seção transversal da peça
	Temperatura de vazamento
	Velocidade de extração de calor pelo molde
Estado da Superfície do Banho	Presença de óxidos
	Presença de escória

Técnica de Inoculação Adotada	Tempo entre a inoculação e a solidificação
Temperatura de Super-aquecimento	Grau de nucleação
Inoculante Utilizado	Composição
	Percentagem
	Granulometria

A definição dos teores de carbono, silício e carbono equivalente estão relacionadas à classe de ferro nodular que é especificada, para uma determinada peça, como regra geral, ferros fundidos nodulares com baixo carbono equivalente, isto valores baixos de carbono equivalente e silício, necessitam de uma quantidade maior de inoculante.

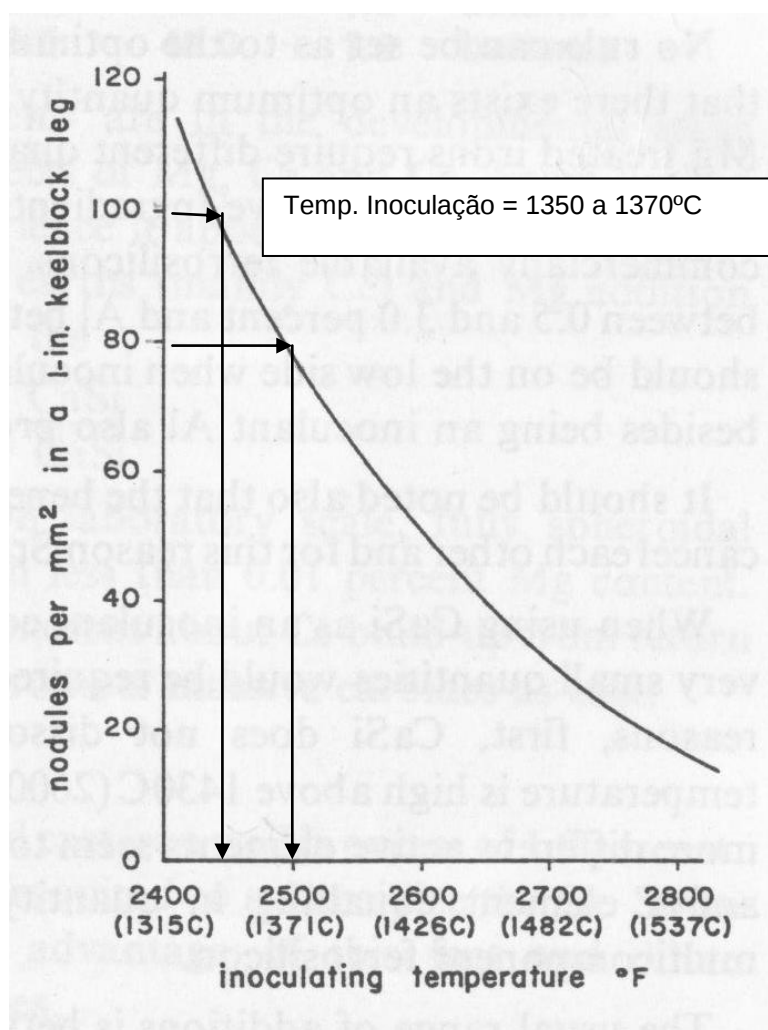
O valores de oxigênio devem ser controlados entre 10 e 30 ppm, como já citado anteriormente, uma vez que influenciam diretamente no rendimento do inoculante uma vez que eles são excelentes desoxidantes.

Os elementos formadores de carboneto, também já citados anteriormente na seção 2.4 referente à composição química, devem ser controlados uma vez que contribuem para a reação metaestável e em se tratando de ferro fundido nodular ferrítico devem ser evitados.

A espessura da seção transversal da peça influencia na temperatura de vazamento, na velocidade de extração de calor no molde e na velocidade de resfriamento, como já citado na seção 2.3, que se refere a velocidade de resfriamento, visto que uma elevada taxa de extração de calor no molde não favorece a difusão do carbono promovendo a reação na forma eutético metaestável.

A temperatura de inoculação não deve ser muito elevada, pois pode destruir os centros efetivos para a nucleação da grafita e nem muito baixa, pois a dissolução das partículas de inoculante pode ser incompleta.

Figura-51. Influência da temperatura de inoculação no número de nódulos, Karsay,1975



O rendimento do inoculante está diretamente associado a quantidades de óxidos contidos na escória, uma vez que eles consomem o inoculante, por esta razão recomenda-se remover a escória antes da inoculação assim como da nodulização.

A perda gradual do efeito da inoculação ao longo do tempo, imediatamente após a inoculação e antes do início da solidificação, chama-se de *fading*, as consequências são: aumento do super-resfriamento para a solidificação, diminuição da quantidade de centros efetivos para a nucleação, da quantidade de nódulos perfeitos de grafita e maior tendência a formação de carbonetos eutéticos, figura-51. O tempo de *fading* para os principais inoculantes variam de 5 a 12 minutos, dependendo das variáveis de processo,

a perda de eficiência em função do *fading* se deve ao aumento do tamanho dos núcleos, este fenômeno é mais rápido depois da inoculação quando a distância entre as micro partículas diminui e são mais pronunciadas com menores níveis residuais de magnésio.

Para compensar as perdas por *fading* , muitas fundições fazem uso de uma pós-inoculação no jato de metal durante o vazamento, apesar das quantidades serem em até 10 vezes menores, possuem bons resultados.

Com relação a temperatura de super aquecimento, assim como já comentado na seção 2.7, referente a elaboração do metal líquido, recomenda-se não ultrapassar nem o tempo e nem a temperatura de super aquecimento uma vez que estes patamares de processo destroem as células eutéticas, principalmente em temperaturas superiores a 1550°C onde este efeito é mais pronunciado.

Com relação ao inoculante, os elementos Si, Ca, Ba e Zr possuem ação grafitizante, Cr, W e V promovem a formação de carbonetos, Mn, Ni, Sb e V apresentam ação perlitizante, Ti > 0,15% promove a formação de “*pin holes*”(porosidades) em conjunto com o alumínio, Sn>0,15% é um forte formador de perlita, B>0,01% promove a formação de carbonetos e reduz as propriedades mecânicas.

Quanto a granulometria, é relacionada com o tipo de inoculação, para inoculação em placas de tratamento utiliza-se normalmente granulometria de 2 a 6 mm, já em placa de transferência, o mais comum é utilizar 0,5 a 2 mm, para inoculação direta no jato 0,2 a 0,5 mm. Deve-se ter atenção com relação ao excesso, pois pode provocar porosidades.

Quanto à quantidade, o usual recomenda: para inoculantes a base de FeSi recomenda-se de 0,1 a 0,5%, variando com a composição química, inoculantes especiais, a base de Sr e Ce, recomenda-se 0,1 a 0,25%, no caso de FeSi75% com teores de Ca e Al recomenda-se em torno de 1%.

Os inoculantes que contém elementos oxidáveis como Ca, Sr e Mg devem ser armazenados sob cuidados especiais pois a oxidação destes elementos prejudica a inoculação.

Os principais benefícios de uma inoculação são:

- Evitar a formação de carbonetos (cementita).
- Promover a formação de grafita e ferrita.
- Reduzir a tendência de segregação de elementos de liga.
- Reduzir a contração metálica, minimizando a chupagem.
- Melhorar a usinagem de peças fundidas.
- Reduzir a dureza.
- Aumentar a ductilidade.
- Promover estruturas e propriedades mais homogêneas em diferentes seções de peças complexas.

(SANTOS,1977, SKALAND,2005)

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS**3.1. Descrição do Procedimento Experimental**

A Liga do procedimento experimental é a GGG 40.3, trata-se de uma liga bastante utilizada no setor de energia eólica, sendo solicitada para fabricação de componentes fundidos de aerogeradores, os parâmetros requeridos para esta liga estão descritos na norma EN-GJS-400-18 LT, que é compatível com a DIN 1693 GGG-40.3.

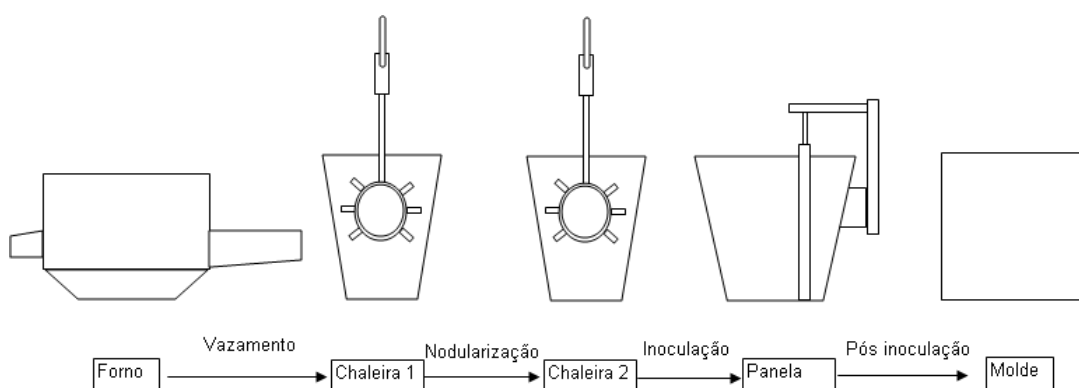
O trabalho experimental foi realizado em 04 etapas, isto é, 04 corridas, em que foram fabricadas 04 peças fundidas, utilizadas para consumo da Aciaria.

Nestas peças foram fundidos corpos de prova em formato Y, nos quais foram retiradas amostras e a usinagem do corpo de prova foi realizada conforme norma ASTM A 536-84(2009).

Estas peças foram fabricadas em forno elétrico a arco SSKD-240, de 7 toneladas de capacidade e um transformador de 3,0/3,6MVA de potência.

O processo do experimento foi realizado em 04 etapas, conforme fluxo mostrado na figuras-10, 52, 53 e 54.

Fig.-10. Fluxo de fabricação do ferro fundido, Simisa, 2013.



Etapa-1 - Elaboração do Metal Líquido e Vazamento

Etapa-2 – Nodulização

Etapa-3 – Inoculação

Etapa-4 – Pós-inoculação e Fundição

Etapa-1 - Elaboração do Metal Líquido e Vazamento

Fig.-52. Vazamento do metal líquido, Simisa 2013.



Etapa-2 – Nodulização

Fig.-53. Nodulização, Simisa 2013.



Etapa-3 – Inoculação

Fig.-54. Inoculação, Simisa 2013.



O processo de nodulização utilizado foi o sanduíche e as placas utilizadas no repanelamento foram tipo chaleira, o objetivo de cada experimento foi:

- **Corrida-1**, A partir de uma liga base foram definidos os parâmetros de tempo e temperatura para cada etapa do processo, Vazamento, Nodulização, Inoculação e Fundição, com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas de tração e impacto em relação à estrutura obtida e os parâmetros de processo utilizados.

Para definição da composição química preliminar foram consideradas as seguintes informações:

1. Os limites dos percentuais, de silício de 2,50%, e de carbono de 3,4%, foram definidos para melhor formação de uma matriz predominantemente ferrítica, para peças acima de 4" de espessura e número de nódulos acima de 100 nódulos por mm^2 (Seção 2.4).
2. O carbono equivalente deve ficar na faixa de 4,3 a 4,6 para obtenção de nódulos mais perfeitos e com menor tendência de formação de carbonetos (Seção 2.4).
3. É recomendada a utilização do percentual de manganês abaixo de 0,20%, para que se obtenha estrutura predominantemente ferrítica para fundidos acima de 4" de espessura (Seção 2.4).
4. Definição da faixa de Magnésio de 0,04 a 0,08%, recomendada para não degenerar os nódulos. (Seção 2.8)
5. É recomendável trabalhar com níveis de fósforo (%P) abaixo de 0,08%, devido à solicitação ao impacto em temperaturas extremamente baixas (Seção 2.6).

As temperaturas de processo, descritas na tabela-12, foram definidas em função de:

- i. A temperatura de vazamento levou em consideração a necessidade do superaquecimento e o cuidado com as perdas dos núcleos de Sílica (Seção 2.7).

- ii. A temperatura de nodulização foi definida em função da minimização da perda de magnésio em função do processo de espera (Seção 2.9).
- iii. A temperatura de inoculação foi definida em função da otimização do número de nódulos por mm^2 (Seção 2.8).

Tabela-12. Temperaturas de Processo.

Descrição	Proposto
Vazamento do forno	$1500 \pm 20^\circ\text{C}$
Temperatura para Nodularização	$1450 \pm 20^\circ\text{C}$
Temperatura para Inoculação	$1355 \pm 15^\circ\text{C}$
Temperatura de Fundição	$1320 \pm 10^\circ\text{C}$

As temperaturas do metal líquido foram medidas com pirômetro por imersão e sensores descartáveis da ECIL.

O tempo de *fading*, após inoculação e início de solidificação foi medido a partir da adição da última porção de inoculante e finalizado com a abertura da válvula da panela no momento da fundição.

- **Corrida-2**, A partir dos resultados da Corrida-1, o processo foi repetido para validação da reprodutibilidade dos resultados.
- **Corrida-3**, Uma vez definido o processo, foi realizada melhoria a partir dos parâmetros já definidos levando em consideração as propriedades mecânicas e de impacto.
- **Corrida-4**, Validação do processo atendendo os itens da norma.

3.2. Análise Química

Os dados de composição química das ligas foram medidos no equipamento ARL 3460, espectrômetro de absorção óptica, capaz de realizar leitura em 20 elementos, calibrado com padrões secundários fornecidos pelo fabricante ARL suíça. As medições foram efetuadas conforme procedimento interno da Simisa, CON 012.

Figura-55. Espectrômetro 3460 da ARL, da Fundação Simisa, 2013



3.3. Análise das Propriedades Mecânicas de Tração

O corpo de prova utilizado para caracterização mecânica foi usinado dentro das instalações da Simisa, conforme norma ASTM A 536-84(2004), o equipamento utilizado foi da marca LOSENHANSEN, nº de fabricação 8602, faixa nominal 60 t, devidamente aferido, os ensaios de tração foram realizados no laboratório das instalações da Simisa, conforme procedimento interno da Simisa, CON 026.

Fig.-56. (a) Dimensões do corpo de prova em Y, (b) Dimensões do corpo de prova para usinagem, conforme norma ASTM A 536-84(2009).

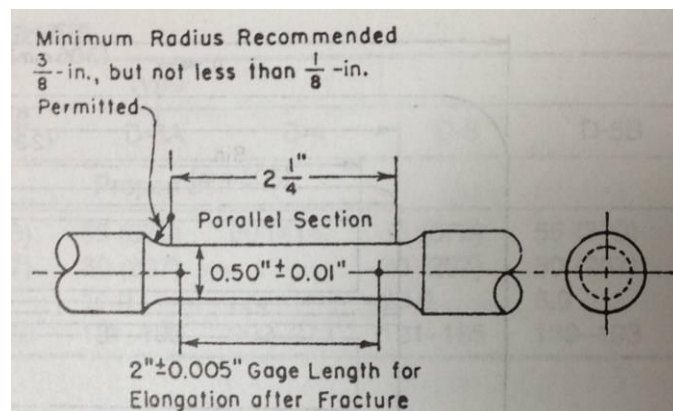
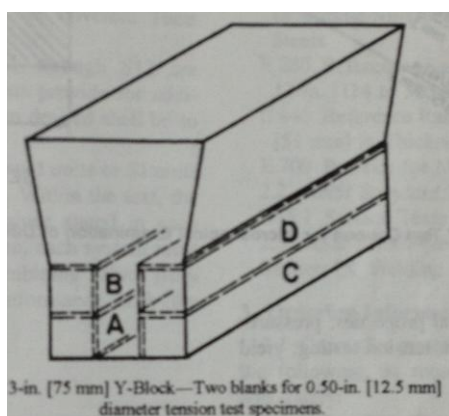


Figura-57. Fotos do Laboratório Metalúrgico da Simisa, máquina de ensaio de tração ,2013.



3.4. Análise das Propriedades Mecânicas de Impacto

As propriedades mecânicas de impacto foram realizadas nos laboratórios da Tork, SP e do LAMAT, Itaúna-MG, com uma máquina de ensaio de impacto cuja a faixa de trabalho: até 294 J, este ensaio foi realizado externo em virtude da exigência da temperatura do ensaio ser de -20°C . Os corpos para ensaios foram usinados conforme norma ASTM A 370, sendo o corpo de prova ensaiado conforme norma DIN EN 10045 e ABNT NBR NM 281-1.

Figura-58. Dimensões do corpo de prova para usinagem, conforme norma ASTM A 370 – 12a.

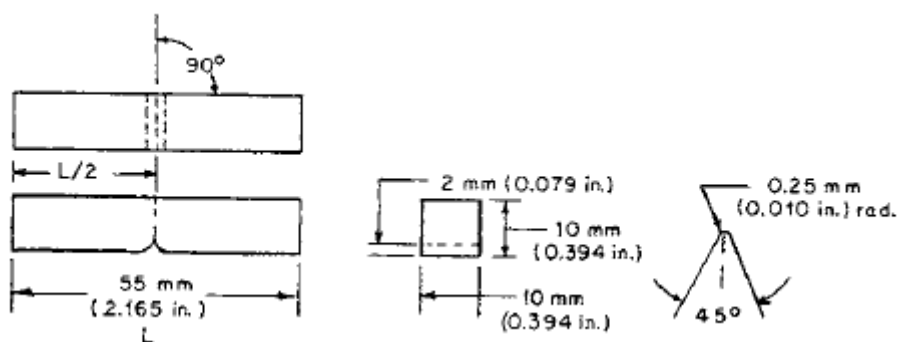


Figura-59. Foto da máquina de impacto do Laboratório da Simisa ,2013



3.5. Análise Microestrutural

A análise microestrutural, por microscopia óptica, foi realizada, nas instalações da Simisa Fundição, conforme procedimento CON.022 e foram utilizados os seguintes equipamentos de microscopia:

Microscópio óptico – OLYMPUS, modelo PME3, lente MDPlan 50/0,75, aumento de 100x e Microscópio óptico – OLYMPUS, modelo CX-31, lente PlanC N 100X10,25, aumento de 100x, as análises foram feitas conforme norma ASTM A 247-67(1998).

As análises de nódulos e análises de microestrutura foram realizadas baseadas em fotomicrografia do quadro DUCTILE IRON MICROSTRUCTURES RATING CHART(AFS) e contagem conforme Guia Micrográfico dos Ferros Fundidos – SENAI – CEFET- MG.

Figura-60. Fotos do Laboratório Metalúrgico da Simisa, microscópios, embutidora e lixadeira politriz ,2013



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**4.1. Corrida#1**

Levando em consideração que se trata de um ferro fundido nodular ferrítico de alto impacto a baixa temperatura o qual deve ter como condições ideais os seguintes parâmetros:

1. Uma matriz 100% ferrítica, isenta de carbonetos, perlita, inclusões não metálicas e outros constituintes.
2. Número de Nódulos de aproximadamente 100 nódulos/mm².
3. Nodularidade acima de 90%.
4. Isentos de microrechupes.

Definição da Composição Química da Liga

A tabela-13 abaixo resume a composição química do metal base definida no procedimento experimental.

Tabela-13. Especificação química da liga de ferro fundido nodular ferrítico.

Especificações Químicas											
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg	CE
MÍNIMO	3,40	2,40	0,10	-	-	-	-	-	-	0,04	4,20
MÁXIMO	3,60	2,60	0,20	0,080	0,020	-	-	-	-	0,06	4,36

Carga Metálica

Para atender as especificações da composição química foi utilizada uma carga metálica com a seguinte composição: 70% de gusa nodular, este ferro gusa é especial com nível de enxofre baixo (<0,020) e 30% de sucata especialmente selecionada com manganês abaixo de 0,35%, conforme tabela-14.

Tabela-14. Especificação química do gusa e da sucata utilizados na carga fria.

Composição do Gusa										
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg
Real	4,0	0,35	0,089	0,063	0,012	-	-	-	-	-
Composição da Sucata Especial										
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg
Real	0,10	0,10	0,32	0,030	0,030	-	-	-	-	-

- Especificação da composição do inoculante utilizado:
 - 1- %Ca = 1,0 a 2,0% ; %Si= 63,0 a 82,0% ; %Al= 3,0% máx.
e %Ba= 2,0% máx.
 - 2- Granulometria de 2 a 7 mm.(Seção 2.8)
- Especificação da composição do nodulizante, no qual foi utilizada uma liga de FeSiMg.
 - 1- %Mg = 8,0 a 10,0% ; %Si= 43,0 a 48,0% ; %Ca= 0,8 a 1,3% ; %Terras Raras= 0,8 a 1,2% ; %Mn= 0,5% máx. e %Al= 1,0% máx.
 - 2- Granulometria de 18 a 40 mm.(Seção 2.9)

Elaboração do Metal Líquido

O material foi processado na corrida 427-1, a etapa de elaboração do metal líquido transcorreu sem anormalidades significativas, assim como o controle da temperatura de superaquecimento, da temperatura de vazamento, nodulização e inoculação onde as mesmas se mantiveram estáveis, inclusive as perdas de temperatura previstas não tiveram grande divergência dos valores obtidos.

- Temperatura de vazamento – 1534°C
- Temperatura de nodulização – 1439°C
- Temperatura de inoculação – 1340°C
- Tempo após inoculação e início de solidificação – 8 min
- Temperatura de fundição – 1312°C

O mesmo pode ser comentado com relação aos tempos para execução de cada etapa do processo, nodulização, inoculação e vazamento.

Foi recomendado para a Corrida#2 aumentar a temperatura de nodulização, com o intuito de trabalhar no máximo da faixa, uma vez que as perdas de temperatura inerentes do processo fizeram com que a temperatura de fundição atingisse o valor mínimo da faixa especificada.

Caracterização Química da Corrida#1

Tabela-15. Composição química da Corrida#1.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Mo	%Mg	%Ni
3,65	2,41	0,21	0,077	0,006	0,03	0,02	0,00	0,099	0,007
%V	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe	CE		
0,004	0,004	0,014	0,003	0,017	0,000	93,46	4,476		

Na análise da composição química, conforme tabela-15, foi possível observar que o percentual de carbono ficou ligeiramente acima do especificado, o que não é significativo para comprometer os resultados, uma vez que quanto maior o carbono maior o número de nódulos e consequentemente menor a temperatura de transição, melhor resultado no impacto.

Os níveis de manganês, silício, fósforo se mantiveram dentro do esperado, ou seja, é previsto que a matriz seja 100% ferrítica, uma vez que os elementos perlitizantes estão sob controle e que a taxa de resfriamento foi extremamente lenta.

Os elementos de liga residuais foram bem controlados, sem nenhum valor significativo a ponto de comprometer os resultados.

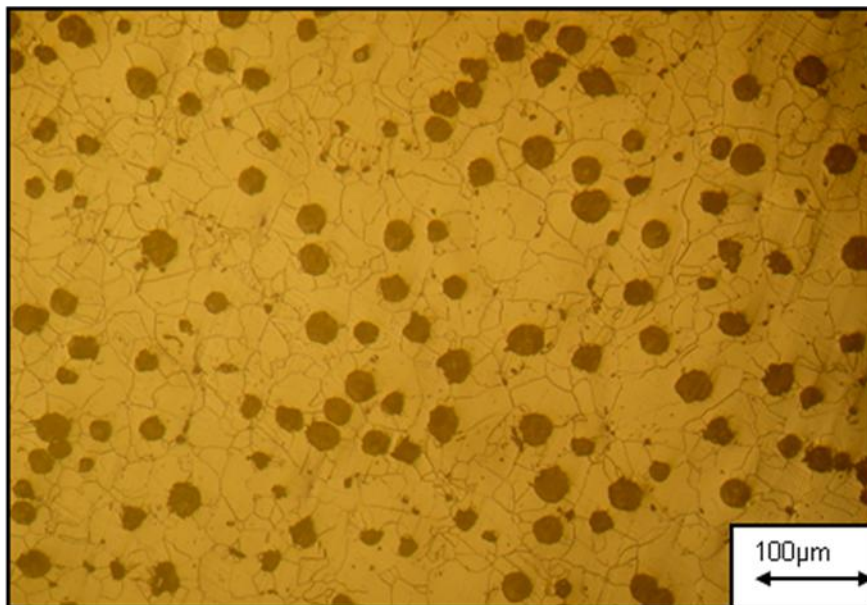
A única observação a ser feita esta relacionada ao nível de magnésio residual, visto que ficou acima do previsto, isto pode comprometer a nodularidade da grafita, tornado-a degenerada ou promovendo grafita tipo “Spike”.

Os elementos deletérios como alumínio e titânio ficaram com suas concentrações nas faixas residuais evitando a degeneração do nódulo de

grafita. O carbono equivalente de 4,48 ficou próximo do eutético, assim como esperado. O valor do enxofre, 0,006%S, ficou bem próximo do residual, muito importante para a eficiência da nodulização.

Caracterização Microestrutural da Corrida#1

Fig.-61. Metalografia, ferro fundido nodular ferrítico da Corrida#1, ampliação 100X, reagente nital(2%).



Nódulos :

- Como pode ser observado na figura-61, o tamanho dos nódulos são 06 e 07, maior nódulo possui 4mm com uma ampliação de 100X, conforme norma ASTM A 247.

- Tipo I, predominante, conforme ASTM A395/A395M – 99 (2009)

- Números de nódulos/mm²

- Pelo método ABNT MB 1512 => 139 Nódulos/mm².

$$N^{\circ} \text{ de Nódulos/mm}^2 = \frac{130}{0,936} = 139 \text{ nódulos / mm}^2$$

- Pelo método comparativo AFS-1993 = Distribuição de nódulos próxima de 150 Nódulos/mm².
- Pelo padrão de comparação, segundo Karsay, 1975, 150 Nódulos/mm².

- Nodularidade > 90% pelo método comparativo AFS-1993.

Matriz:

Matriz 100% ferrítica e pelo comparativo AFS-1993 , é considerado 90% ferrita e 10% grafita.

No que se refere á caracterização microestrutural, observou-se que a matriz estava 100% ferrítica, o número de nódulos superou a expectativa, a nodularidade apresentou um ótimo resultado, mesmo com o teor residual de magnésio ficando acima do especificado, máximo 0,080% e obtido 0,099%, isto se deve ao baixo teor de enxofre(0,006%S), porém não houve alteração na nodularidade.

Os processos de nodulização, inoculação, o controle do tempo de *fading* e a pós-inoculação, foram eficientes.

Caracterização Mecânica da Corrida#1**Tabela-16. Resultados do ensaio de tração da Corrida#1.**

	Resistência a Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
Exigido	370	220	12,0	-
Obtido	414	301	18,8	135
Resultado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Tabela-17. Resultados do ensaio de impacto da Corrida#1.

Impacto (Entalhe em V) Temperatura : -20°C	1ª Medição (J)	2ª Medição (J)	3ª Medição (J)	Média (J)
Exigido Valor médio =10min; Valor individual= 7min;	6	5	4	5
Reprovado				

Os resultados de tração e escoamento, mostrados na tabela-16, atenderam o especificado, no caso específico do escoamento o resultado foi muito satisfatório 37,0% acima do especificado, com relação ao alongamento, o resultado também foi muito satisfatório, 57% acima do especificado, ambos os resultados estão coerentes com os valores de: nodularidade, número de nódulos, percentual de ferrita na matriz e composição química.

Porém, no ensaio de impacto a -20°C os resultados não foram satisfatórios, conforme tabela-17, nem em relação aos valores individuais e nem em relação aos valores médios, não foi possível evidenciar a influência do carbono mais alto na diminuição da temperatura de transição.

Como o objetivo do trabalho é obter as propriedades na condição de bruto de fundição as possibilidades de tratamento térmico, como ferritização, recozimento sub-crítico e estabilização estão descartadas.

Como visto anteriormente, existe uma margem nos valores de resistência a tração e escoamento em relação ao especificado, logo o próximo experimento será repetido com o objetivo de validar os parâmetros da Corrida#1 e em seguida será melhorado os valores de impacto ajustando o processo.

4.2. Corrida#2

Na Corrida#1 as condições de matriz 100% ferrítica, número de nódulos de aproximadamente 100 a 200 nódulos/mm², nodularidade acima de 90% e isentos de microrechupes, foram atendidas, porém os valores de Impacto ainda estão fora do especificado.

Logo, como definido anteriormente, serão utilizados os mesmos parâmetros para validação do processo em termos de se reproduzir os mesmos resultados de tração, neste primeiro momento.

Definição da Composição Química da Liga

Conforme tabela-13 da Corrida#1.

Carga Metálica

A atenção com a preparação da carga metálica será a mesma: 70% de gusa nodular, que é um ferro gusa especial com nível de %S baixo e 30% de sucata especialmente selecionada com %Mn abaixo de 0,35%. Neste experimento foi utilizada a mesma carga de gusa e sucata especial da Corrida#1.

Tabela-18. Especificação química do gusa e da sucata utilizados na carga fria na Corrida#2.

Composição do Gusa										
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg
Real	4,0	0,35	0,089	0,063	0,012					
Composição da Sucata Especial										
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg
Real	0,10	0,10	0,32	0,030	0,030					

- Especificação da composição do inoculante utilizado:
 - %Ca = 1,0 a 2,0% ; %Si= 63,0 a 82,0% ; %Al= 3,0% máx.
e %Ba= 2,0% máx.
 - Granulometria de 2 a 7 mm.
- Especificação da composição do nodulizante, no qual foi utilizada uma liga de FeSiMg.
 - 1- %Mg = 8,0 a 10,0% ; %Si= 43,0 a 48,0% ; %Ca= 0,8 a 1,3% ;
%Terras Raras= 0,8 a 1,2% ; %Mn= 0,5% máx. e %Al= 1,0% máx.
 - 2- Granulometria de 18 a 40 mm.

As faixas de temperaturas de processo também serão mantidas, conforme tabela-12 da Corrida#1.

Elaboração do Metal Líquido

O material foi processado na corrida 491-1, a etapa de elaboração do metal líquido transcorreu sem anormalidades significativas, em relação ao controle da temperatura de superaquecimento, temperatura de vazamento e temperatura de fundição.

A temperatura de nodulização ficou 9°C acima da faixa máxima recomendada e a temperatura de inoculação ficou 10°C acima da faixa, as perdas de temperatura previstas não tiveram grande divergência dos valores obtidos.

- Temperatura de vazamento – 1507°C
- Temperatura de nodulização – 1479°C
- Temperatura de inoculação – 1380°C
- Tempo após inoculação e início de solidificação – 12 min
- Temperatura de fundição – 1330°C

Com relação ao tempo imediatamente após a inoculação e antes do início da solidificação, *fading*, este foi relativamente alto, 12 min.

Caracterização Química da Corrida#2

Tabela-19. Composição química da Corrida#2.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Mo	%Mg	%Ni
3,51	2,45	0,19	0,061	0,005	0,03	0,04	0,00	0,048	0,007
%V	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe	CE		
0,004	0,00	0,012	0,002	0,015	0,00	93,63	4,345		

Na análise da composição química, conforme tabela-19, foi possível observar que todos os valores atenderam as faixas de composição química especificada, logo é esperado um resultado satisfatório em termos de propriedade mecânica e de impacto.

Os níveis de magnésio, manganês, silício, fósforo se mantiveram dentro do esperado, isto é, é previsto que a matriz seja 100% ferrítica, uma vez que os elementos perlitizantes estão na concentração mínima.

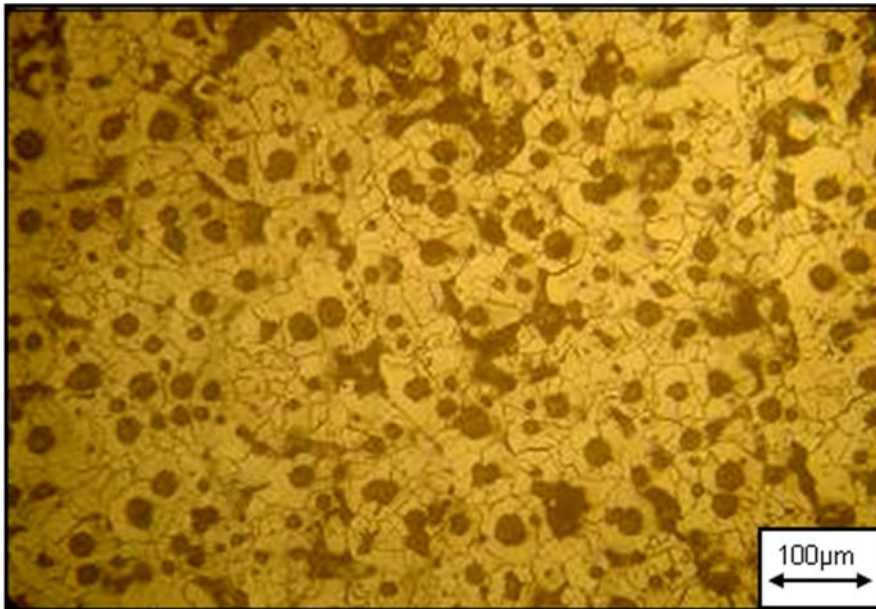
Os elementos deletérios como alumínio e titânio ficaram com suas concentrações nas faixas residuais evitando a degeneração do nódulo de grafita.

O carbono equivalente de 4,35 ficou próximo do eutético.

Os valores de fósforo, 0,061%P, e enxofre, 0,005%S, se mantiveram bem próximo do valor residual, sendo muito importante tanto para nodulização no caso do enxofre como para o impacto no caso do fósforo.

Caracterização Microestrutural da Corrida#2

Fig.-62. Metalografia, ferro fundido nodular ferrítico da Corrida#2, ampliação 100X, reagente nital(2%).



Nódulos :

- Como pode ser observado na figura-62, o tamanho dos nódulos são 06 e 07, maior nódulo possui 4mm com uma ampliação de 100X, conforme norma ASTM A 247.
- Tipo I, predominante, conforme ASTM A395/A395M – 99 (2009)
- Números de nódulos/mm²
 - Pelo método ABNT MB 1512 => 173 Nódulos/mm².

$$\text{N}^{\circ} \text{ de Nódulos/mm}^2 = \frac{162}{0,936} = 173 \text{ nódulos / mm}^2$$

- Pelo método comparativo AFS-1993 = Distribuição de nódulos próxima de 200 Nódulos/mm².
- Pelo padrão de comparação, segundo Karsay, 1975, 175 Nódulos/mm².

- Nodularidade > 90% pelo método comparativo AFS-1993.

Matriz:

Matriz 90% ferrítica e 10% de perlita e pelo comparativo AFS-1993, é considerado 81% ferrita, 9% perlita e 10% grafita

No que se refere à caracterização microestrutural, observou-se a presença de 10% de perlita na matriz, provavelmente estes percentuais de perlita influenciaram nos resultados de impacto, nas propriedades da resistência e na dureza da liga. Esta perlita pode ser atribuída em função de uma alteração na velocidade de resfriamento, uma vez que mesmo com valores pequenos, o manganês que é um forte perlitizante, dependendo da velocidade, é possível obter perlita na estrutura.

Como visto na seção 2.3, taxas de resfriamento mais elevadas favorecem a formação da perlita e grafita, dificultando a formação da ferrita.

No que se refere ao número de nódulos e nodularidade os resultados foram satisfatórios.

O elevado número de nódulos aumenta a nodularidade, isto é, aumenta a quantidade de grafitas esferoidais, que por consequência, melhora os valores de tensão de ruptura e alongamento.

Caracterização Mecânica da Corrida#2

Tabela-20. Resultados do ensaio de tração da Corrida#2.

	Resistência a Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
Exigido	370	220	12,0	-
Obtido	452	318	17,2	140
Resultado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Tabela-21. Resultados do ensaio de impacto da Corrida#2.

Impacto (Entalhe em V)	1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	Média
Temperatura : -20°C	(J)	(J)	(J)	(J)
Exigido				
Valor médio =10min;	2	2	2	2
Valor individual= 7min;				
Reprovado				

O resultado de resistência à tração, conforme tabela-20, ficou 22,2% acima do especificado, escoamento 44,6% acima do requerido e alongamento 43,3% acima e a dureza 4% maior do que a Corrida#1, todos estes resultados estão coerentes com a perlita encontrada na matriz, o elevado número de nódulos e a boa nodularidade, sendo que estes altos valores de resistência influenciaram negativamente, no ensaio de impacto a -20°C, onde os resultados não foram satisfatórios, na realidade o resultado foi muito inferior a Corrida#1, 60% menor, ver tabela-21.

Com o objetivo de assegurar a matriz ferrítica para melhorar os resultados de impacto, será aumentado o teor de silício para a Corrida#3, visto que os resultados de tração e dureza estão todos validados e aprovados. Neste experimento será realizado um melhor acompanhamento da velocidade de resfriamento para evitar taxas mais elevadas uma vez que este parâmetro é de suma importância para quem deseja obter uma estrutura 100%ferrítica que por sua vez vai influenciar diretamente nos resultados de impacto.

4.3. Corrida#3

Na Corrida#2 a condição para obtenção de matriz 100% ferrítica não foi atendida embora o número de nódulos tenha sido satisfatório, porém o resultado de impacto foi comprometido. Como resultados de tração foram bem sucedidos e bem reproduzidos o ajuste do processo será focado para melhorar

o resultado de impacto. Como premissa será necessário assegurar uma matriz 100% ferrítica para obtenção de bons resultados de impacto.

Definição da Composição Química da Liga

As faixas do elemento manganês serão reduzidas, em relação a Corrida#2, para evitar o efeito perlitizante, o silício será aumentado para assegurar a matriz ferrítica e por último, será feito o acompanhamento da desmoldagem para evitar altas velocidade de resfriamento.

Desta forma estaremos trabalhando com o carbono equivalente na faixa de 4,23 a 4,53, conforme tabela-22, o que esta dentro da faixa recomendada de 4,3 a 4,6, para fabricação de ferros nodulares, o carbono se encontra entre 3,4 e 3,6, o que atende a faixa recomendada de 3,4 a 3,7 para o carbono e o silício se encontra na faixa de 2,5 a 2,7 que atende a recomendação de 2,1 a 2,8, tanto o carbono quanto o silício nestas faixas, formaram nódulos de grafita mais perfeitos e com menor tendência de formação de carbonetos.

Tabela-22. Especificação química da liga de ferro fundido nodular ferrítico para a Corrida#3.

Especificações Químicas											
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg	CE
MÍNIMO	3,40	2,50	0,10	-	-	-	-	-	-	0,04	4,23
MÁXIMO	3,60	2,70	0,20	0,080	0,020	-	-	-	-	0,06	4,53

Carga Metálica

A atenção com a preparação da carga metálica será a mesma: 70% de gusa nodular, que é um ferro gusa especial com nível de %S baixo e 30% de sucata especialmente selecionada com %Mn abaixo de 0,15%, conforme tabela-23. Neste experimento também foi utilizada a mesma carga de gusa da Corrida#1.

Tabela-23. Especificação química do gusa e da sucata utilizados na carga fria na Corrida#3.

Composição do Gusa										
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg
Real	4,0	0,35	0,089	0,063	0,012					
Composição da Sucata Especial										
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg
Real	0,14	0,85	0,08	0,014	0,015	0,09	0,07	0,03	0,17	

- Especificação da composição do inoculante utilizado:
 - %Ca = 1,0 a 2,0% ; %Si= 63,0 a 82,0% ; %Al= 3,0% máx.
e %Ba= 2,0% máx.
 - Granulometria de 2 a 7 mm.
- Especificação da composição do nodulizante, no qual foi utilizada uma liga de FeSiMg.
 - 1- %Mg = 8,0 a 10,0% ; %Si= 43,0 a 48,0% ; %Ca= 0,8 a 1,3% ; %Terras Raras= 0,8 a 1,2% ; %Mn= 0,5% máx. e %Al= 1,0% máx.
 - 2- Granulometria de 18 a 40 mm.

As faixas de temperaturas de processo também serão mantidas, conforme tabela-12 da Corrida#1.

Elaboração do Metal Líquido

O material foi processado na corrida 606-1, onde a etapa de elaboração do metal líquido transcorreu sem maiores problemas, em relação ao controle da temperatura de superaquecimento, temperatura de vazamento e temperatura de fundição.

A temperatura de nodulização e inoculação atenderam o especificado, as perdas de temperatura previstas não tiveram grande divergência dos valores obtidos.

- Temperatura de vazamento – 1518°C
- Temperatura de nodulização – 1453°C
- Temperatura de inoculação – 1362°C
- Tempo após inoculação e início de solidificação – 13 min
- Temperatura de fundição – 1312°C

Com relação ao tempo imediatamente após a inoculação e antes do início da solidificação, *fading*, este foi relativamente alto, 13 min. Porém o teste prático da cunha não mostrou tendência a formação de ferro branco.

Caracterização Química da Corrida#3

Tabela-24. Composição química da Corrida#3.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Mo	%Mg	%Ni
3,47	2,68	0,15	0,063	0,007	0,03	0,04	0,00	0,049	0,018
%V	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe	CE		
0,003	0,00	0,011	0,003	0,019	0,00	93,46	4,388		

Na análise da composição química, conforme tabela-24, foi possível observar que todos os valores atenderam as faixas de composição química especificada, logo é esperado um resultado satisfatório em termos de propriedades mecânicas de tração e impacto.

Os níveis de magnésio, manganês, silício, fósforo se mantiveram dentro do esperado, ou seja, é previsto que a matriz seja 100% ferrítica, uma vez que os elementos perlitizantes estão na concentração mínima e que a taxa de resfriamento foi mantida como na Corrida#1.

Os elementos deletérios como alumínio e titânio mantiveram suas concentrações nas faixas residuais evitando a degeneração do nódulo.

O carbono equivalente de 4,39 ficou próximo do eutético.

Os valores de fósforo, 0,063%P, e enxofre, 0,007%S, se mantiveram bem próximo do valor residual, sendo muito importante tanto para nodulização no caso do enxofre como para o impacto no caso do fósforo.

Caracterização Microestrutural da Corrida#3

Fig.-63. Metalografia, ferro fundido nodular ferrítico da Corrida#3, ampliação 100X, reagente nital(2%).



Nódulos :

- Como pode ser observado na figura-63, o tamanho dos nódulos são 06 e 07, maior nódulo possui 4mm com uma ampliação de 100X, conforme norma ASTM A 247.

- Tipo I, predominante, conforme ASTM A395/A395M – 99 (2009)

- Números de nódulos/mm²

- Pelo método ABNT MB 1512 => 213 Nódulos/mm².

$$\text{Nº de Nódulos/mm}^2 = \frac{199,5}{0,936} = 213 \text{ nódulos / mm}^2$$

- Pelo método comparativo AFS-1993 = Distribuição de nódulos próxima de 200 Nódulos/mm², uma vez que o próximo padrão é 300 Nódulos/mm²
- Pelo padrão de comparação, segundo Karsay,1975, 225 Nódulos/mm².

- Nodularidade > 90% pelo método comparativo AFS-1993.

Matriz:

Matriz 100% ferrítica e pelo comparativo AFS-1993 , é considerado 90% ferrita e 10% grafita.

No que se refere á caracterização microestrutural, o objetivo foi atendido, 100% da matriz está ferrítica, portanto é esperado melhores resultados de impacto.

No que se refere ao número de nódulos e nodularidade os resultados foram satisfatórios.

O elevado número de nódulos aumenta a nodularidade, isto é, aumenta a quantidade de grafitas esferoidais, que por consequência, melhora os valores de tensão de ruptura e alongamento.

Caracterização Mecânica da Corrida#3**Tabela-25. Resultados do ensaio de tração da Corrida#3.**

	Resistência a Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
Exigido	370	220	12,0	-
Obtido	465	283	16,6	131
Resultado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Tabela-26. Resultados do ensaio de impacto da Corrida#3.

Impacto (Entalhe em V) Temperatura : -20°C	1ª Medição (J)	2ª Medição (J)	3ª Medição (J)	Média (J)
Exigido Valor médio =10min; Valor individual= 7min;	2	2	2	2
Reprovado				

O resultado de resistência à tração ficou 25,7% acima do especificado, conforme tabela-25, escoamento 28,6% acima do requerido e alongamento 38,3% acima e a dureza compatível com a Corrida#1, para uma matriz 100% ferrítica era esperado valores menores de resistência a tração, este aumento pode esta associado a o aumento do número de nódulos, 213 nódulos / mm².

Mais uma vez os resultados de impacto não foram atendidos, conforme tabela-26, uma vez que a velocidade de resfriamento foi acompanhada, a matriz está 100% ferrítica, a nodularidade e o número de nódulos estão compatíveis com os resultados e percentual do elemento fósforo está controlado, 0,06%P, que é o recomendado para ferros nodulares com alto desempenho ao impacto, falta analisar apenas a influência do elemento silício.

Já foi discutido na seção 2.4, que a elevação do percentual de silício em nodulares com matriz essencialmente ferrítica, mantendo-se as concentrações e mesma velocidade de resfriamento, promove um aumento de dureza, da resistência a tração, da resistência ao escoamento, diminuição do alongamento e diminuição da temperatura de transição dúctil-frágil e do valor máximo da energia absorvida no ensaio de impacto na região dúctil, se observarmos os resultados mecânicos realmente houve uma redução no alongamento em relação aos resultados anteriores, a única dúvida está relacionada à dureza, pois não houve alteração, então para validar o valor da dureza e resultados de tração, foi retirado um segundo corpo de prova para confirmação dos resultados.

Tabela-27. Resultados do segundo ensaio de tração da Corrida#3.

	Resistência a Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
Exigido	370	220	12,0	-
1º CP	465	283	16,6	131
2º CP	458	314	18,6	140
Resultado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Apesar de ambos os resultados estarem aprovados, como mostra a tabela-27, fica validado que houve uma alteração no valor da resistência a tração, escoamento e dureza, uma vez que a medição do 1º corpo de prova não foi representativa com o que se esperava em termos de resultado e o valor de dureza do segundo corpo aumentou proporcionalmente ao aumento das resistências a tração e escoamento, já o alongamento, se comparado com uma matriz ferrítica, houve uma pequena redução em relação a Corrida#1.

Logo, baseado no princípio de que o alto valor de silício pode estar fragilizando a matriz ferrítica por solução sólida, será realizado um quarto experimento com valores de silício reduzidos.

4.4. Corrida#4

Como discutido anteriormente, este experimento tem por objetivo corrigir a faixa de silício, mantendo todos os parâmetros de processo já estabelecidos de forma que se obtenha uma matriz ferrítica, com níveis de nodularidade e quantidade de nódulos dentro do requerido com resultados de propriedades mecânicas de tração e impacto aprovadas.

Definição da Composição Química da Liga

As faixas de fósforo serão reduzidas, em relação a Corrida#2, para evitar a temperatura de transição dúctil-frágil não seja elevada.

Como citado anteriormente a faixa de silício será ajustada para valores inferiores aos últimos experimentos. A faixa de trabalho do carbono será mantida entre 3,4 e 3,6, o que atende a faixa recomendada de 3,4 a 3,7 para o carbono e o silício se encontra na faixa de 2,0 a 2,3, conforme tabela-28, que atende em parte a recomendação de 2,1 a 2,8.

Tanto o carbono quanto o silício nestas faixas, formaram nódulos de grafita mais perfeitos e com menor tendência de formação de carbonetos.

Tabela-28. Especificação química da liga de ferro fundido nodular ferrítico do Corrida#4.

Especificações Químicas											
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg	CE
MÍNIMO	3,40	2,00	0,10	-	-	-	-	-	-	0,04	4,07
MÁXIMO	3,60	2,30	0,20	0,030	0,020	-	-	-	-	0,06	4,38

Carga Metálica

A atenção com a preparação da carga metálica será ainda mais importante, serão selecionados todos os materiais; 70% de gusa nodular especial, que é um ferro gusa especial com níveis de %Mn<0,20 e %P<0,030, além de 20% de sucata especial com %Mn<0,20 e 10% de retorno com %Mn <0,10, como mostra a tabela-29.

Tabela-29. Especificação química do gusa e da sucata utilizados na carga fria do Corrida#4.

Composição do Gusa										
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg
Real	4,218	0,006	0,007	0,013	0,009					
Composição da Sucata Especial										
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	%Mg
Real	0,14	0,85	0,08	0,014	0,015	0,09	0,07	0,03	0,17	

- Especificação da composição do inoculante utilizado:
 - %Ca = 1,0 a 2,0% ; %Si= 63,0 a 82,0% ; %Al= 3,0% máx.
 - e %Ba= 2,0% máx.
 - Granulometria de 2 a 7 mm.
- Especificação da composição do nodulizante, no qual foi utilizada uma liga de FeSiMg.

1- %Mg = 8,0 a 10,0% ; %Si= 43,0 a 48,0% ; %Ca= 0,8 a 1,3% ; %Terras Raras= 0,8 a 1,2% ; %Mn= 0,5% máx. e %Al= 1,0% máx.

2- Granulometria de 18 a 40 mm.

As faixas de temperaturas de processo também serão mantidas, conforme tabela-12 da Corrida#1.

Elaboração do Metal Líquido

O material foi processado na corrida 715, onde a etapa de elaboração do metal líquido transcorreu sem maiores problemas, em relação ao controle da temperatura de superaquecimento, temperatura de vazamento e temperatura de fundição.

A temperatura de nodulização e inoculação atenderam o especificado, as perdas de temperatura previstas não tiveram grande divergência dos valores obtidos.

- Temperatura de vazamento – 1506°C
- Temperatura de nodulização – 1440°C
- Temperatura de inoculação – 1359°C
- Tempo após inoculação e início de solidificação – 10 min
- Temperatura de fundição – 1312°C

Caracterização Química da Corrida#4

Tabela-30. Composição química da Corrida#4.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Mo	%Mg	%Ni
3,60	2,10	0,09	0,024	0,004	0,02	0,02	0,00	0,049	0,008
%V	%W	%Ti	%Sn	%Al	%Nb	%Fe	CE		
0,001	0,00	0,005	0,002	0,021	0,001	94,06	4,309		

Na análise da composição química, tabela-30, foi possível observar que todos os valores atenderam as faixas de composição química especificada. Logo, é esperado, um resultado satisfatório em termos de propriedade mecânica e de impacto. Os níveis de magnésio, manganês, silício, fósforo se

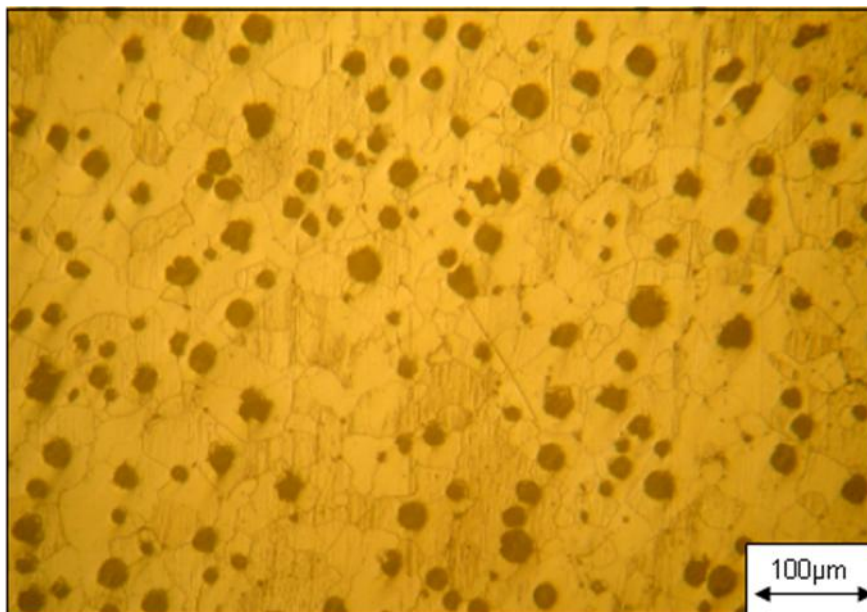
mantiveram dentro do esperado, ou seja, é previsto que a matriz seja 100% ferrítica, o percentual de silício foi atendido.

Os elementos deletérios como alumínio e titânio mantiveram suas concentrações nas faixas residuais evitando a degeneração do nódulo de grafita.

O carbono equivalente de 4,31 ficou próximo do eutético. Os valores de fósforo, 0,024%P, e enxofre, 0,004%S, se mantiveram bem próximo do valor residual, sendo muito importante tanto para nodulização no caso do enxofre como para o impacto no caso do fósforo. Logo espera-se que as propriedades sejam atendidas.

Caracterização Microestrutural da Corrida#4

Fig.-64. Metalografia, ferro fundido nodular ferrítico da Corrida#4, ampliação 100X, reagente nital(2%).



Nódulos :

- Como pode ser observado na figura-64, os tamanhos predominantes são 06 e 07, maior nódulo possui 5mm com uma ampliação de 100X, conforme norma ASTM A 247.
- Tipo I, predominante, conforme ASTM A395/A395M – 99 (2009)
- Números de nódulos/mm²

- Pelo método ABNT MB 1512 => 158 Nódulos/mm².

$$\text{Nº de Nódulos/mm}^2 = \frac{148}{0,936} = 158 \text{ nódulos / mm}^2$$

- Pelo método comparativo AFS-1993 = Distribuição de nódulos próxima de 150 Nódulos/mm².
- Pelo padrão de comparação, segundo Karsay, 1975, 150 Nódulos/mm².

- Nodularidade > 90% pelo método comparativo AFS-1993.

Matriz:

Matriz 100% ferrítica e pelo comparativo AFS-1993 , é considerado 90% ferrita e 10% grafita.

No que se refere á caracterização microestrutural, o objetivo foi atendido, 100% da matriz esta ferrítica, portanto é esperado melhores resultados de impacto. No que se refere ao número de nódulos e nodularidade os resultados foram satisfatórios.

O elevado número de nódulos aumenta a nodularidade, isto é, aumenta a quantidade de grafitas esferoidais, que por consequência, melhora os valores de tensão de ruptura e alongamento.

Caracterização Mecânica da Corrida#4

Tabela-31. Resultados do ensaio de tração da Corrida#4.

	Resistência a Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
Exigido	370	220	12,0	-
Obtido	384	261	23,6	120
Resultado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado

Tabela-32. Resultados do ensaio de impacto da Corrida#4.

Impacto (Entalhe em V) Temperatura : -20°C	1ª Medição (J)	2ª Medição (J)	3ª Medição (J)	Média (J)
Exigido Valor médio =10min; Valor individual= 7min;	10	14	10	11
Aprovado				

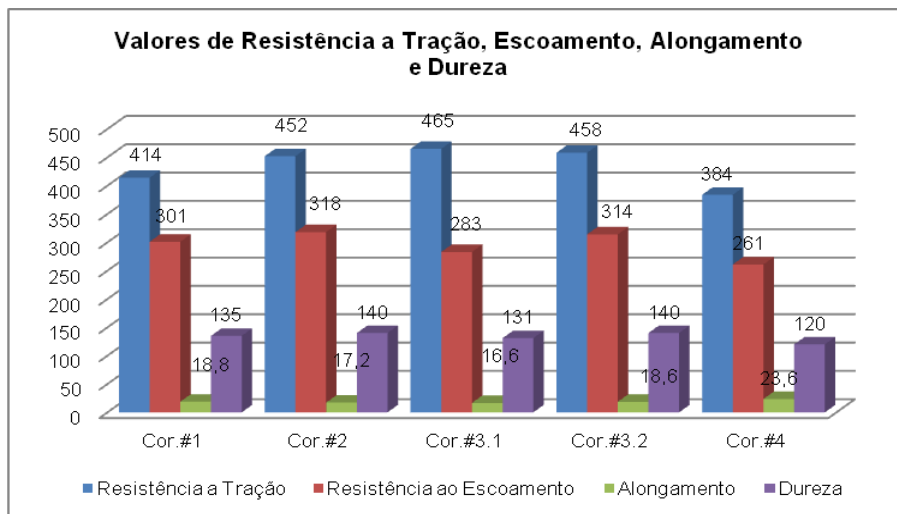
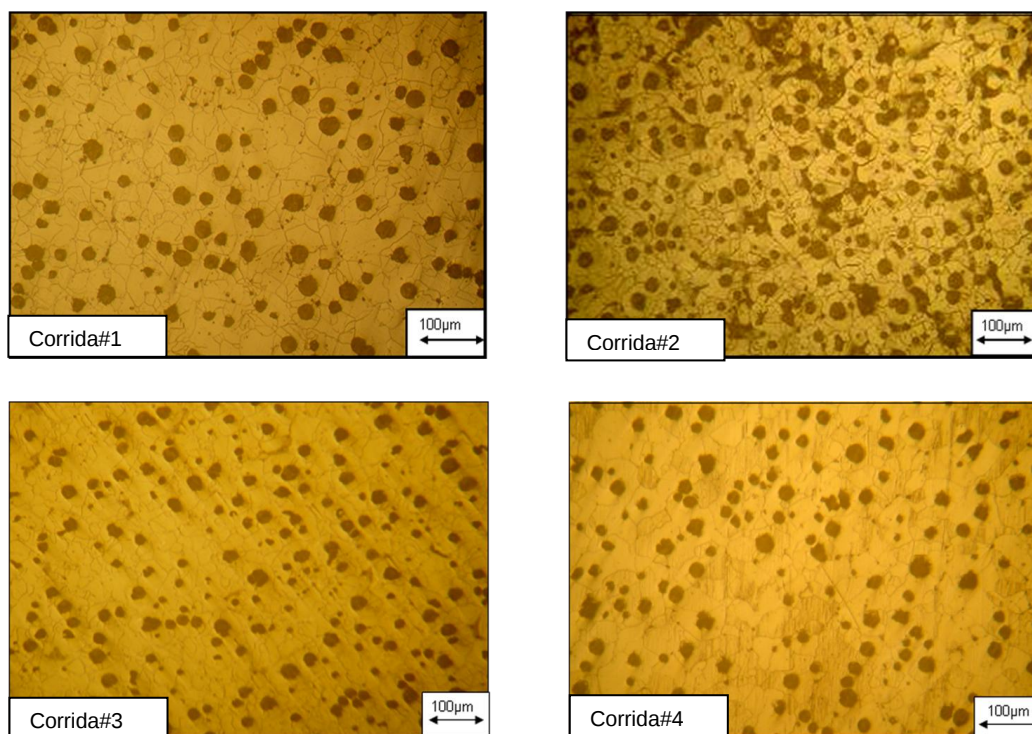
O resultado de resistência à tração ficou de acordo com o especificado, como mostra a tabela-31, o escoamento 18,6% acima do requerido, alongamento 96,7% acima, a dureza compatível com o alongamento e impacto aprovado, conforme tabela-32.

Fica evidenciado que é importante o controle não só da temperatura e tempos de processo como também dos níveis de silício e fósforo, visto que estas foram as únicas alterações da Corrida#4, uma vez que tanto a nodularidade como o número de nódulos se mantiveram constantes, e neste ultimo experimento todos os requerimentos foram atendidos.

Analizando todos os resultados, podemos concluir que:

Tabela-33. Resultados das Corridas.

Corrida	Resistência a Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)	Impacto (J)	Número De Nódulos (nód./mm ²)
Cor.#1	414	301	18,8	135	5	139
Cor.#2	452	318	17,2	140	2	173
Cor.#3.1	465	283	16,6	131	2	213
Cor.#3.2	458	314	18,6	140	-	-
Cor.#4	384	261	23,6	120	11	158

Fig.-65. Valores de Resistência a Tração e Impacto das Corridas.**Fig.-66. Análises metalográficas das corridas# 1,2,3 e 4.**

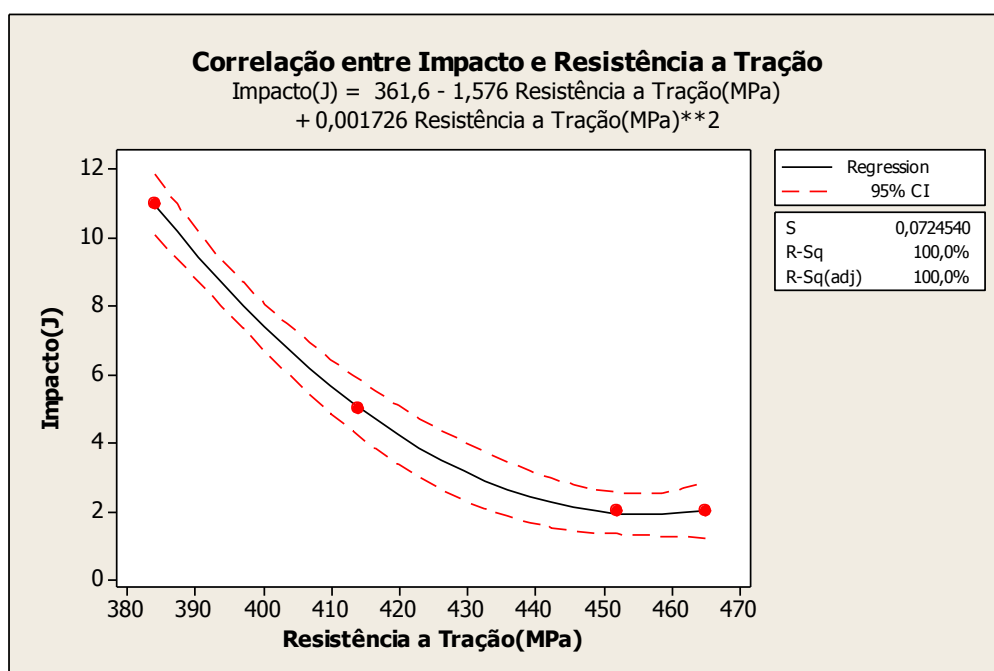
1- Existe uma relação entre a resistência à tração e os valores de impacto, o que é possível observar na tabela-33, desde que considerados a mesma matriz, que neste caso, foi uma matriz ferrítica na sua totalidade.

A Correlação entre resistência a tração e impacto pode ser explicada em função de que ao aumentar o percentual de perlita na Corrida#2, aumentamos a dureza e conseqüentemente aumenta à resistência a tração e diminui o alongamento que por sua vez influi na redução do impacto.

No caso da Corrida#3, o fato foi similar sendo que a causa foi a influência do elevado %silício, fragilizando a matriz ferrítica por solução sólida, a dureza do 1º corpo de prova não refletiu a fragilidade, 131HB, porém o 2º corpo de prova evidenciou o aumento da resistência e dureza, 140HB, conforme tabela-33 e figura-65.

Na figura 67, é possível observar na análise de regressão polinomial, entre o impacto e a resistência a tração, que o coeficiente de correlação (r) é 1,00 e que o coeficiente de determinação (r^2) também é 1,00, isto é existe um alto relacionamento entre as duas variáveis, impacto e resistência a tração.

Fig.-67. Gráfico de correlação entre o impacto e a resistência a tração.



A equação 13, mostra a correlação entre o Impacto e a Resistência a Tração.

(13)

$$\text{Impacto} = 361,6 - 1,576 * RT + 0,001726 * RT^2$$

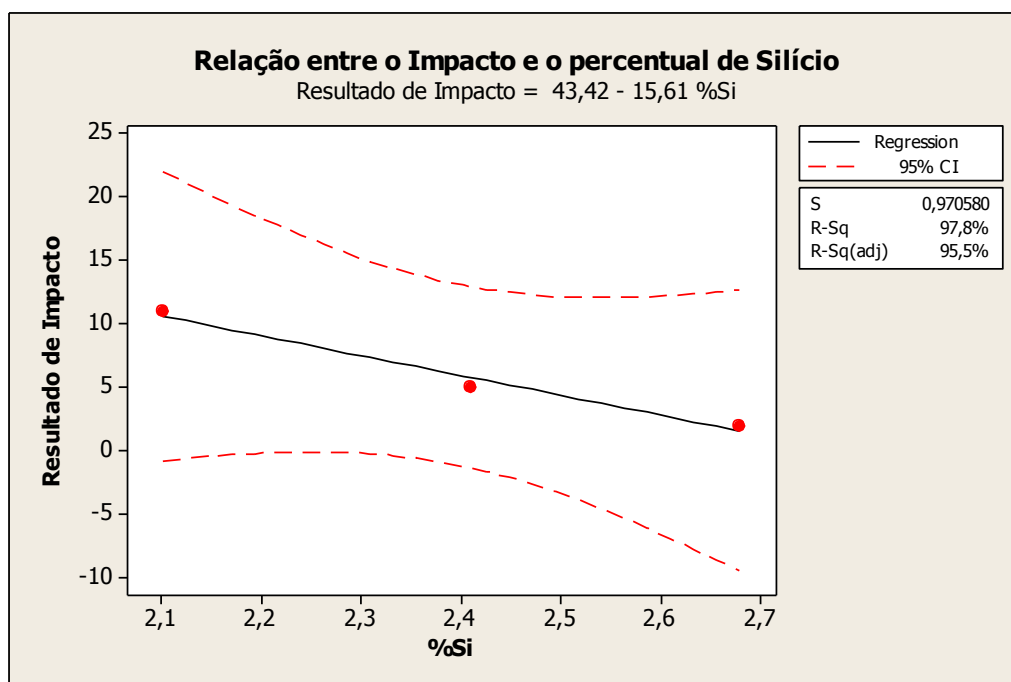
2. Ainda em relação a análise de todos os experimentos, é possível observar uma correlação entre o percentual de silício e o impacto.

Na análise da relação entre o percentual de silício e o impacto, conforme tabela-34, considerando apenas as matrizes 100% ferríticas, figura-66, experimentos 1,3 e 4, conforme figura-68, é possível verificar que na regressão linear existe um alto nível de dependência entre as variáveis, já que coeficiente de correlação(r) é 0,98 e que o coeficiente de determinação(r^2) é 0,96.

Tabela-34. Resultados dos percentuais de silício e impacto.

Silício (%)	Resultado de impacto (J)
2,41	5,0
2,68	2,0
2,10	10,0

Fig.-68. Gráfico de correlação entre o impacto e o percentual de silício.



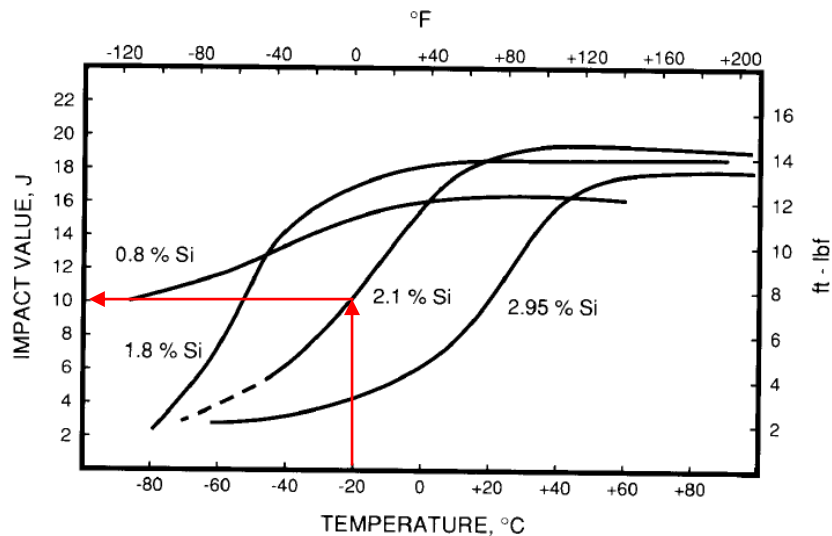
A equação 14, mostra a correlação entre o Impacto e o percentual de silício.

(14)

$$\text{Impacto} = 43,42 - 15,61 * \%Si$$

Simulando os resultados da figura 40, na equação, é possível alongamento validar a equação da regressão linear entre o impacto e o percentual de silício.

Fig.-69. Validação da equação de regressão entre impacto e silício com as curvas de influência do teor de silício no teste de impacto com entalhe em V.



De acordo com o gráfico da figura 69, o valor de 2,1% de Silício corresponde a 10 Joules respectivamente, aplicando estes valores de % de silício na equação 14 obtém-se:

$$\text{Impacto} = 43,42 - 15,61 * 2,1 = 10,639$$

Valor teórico foi 10,639 J e o valor real obtido foi de 10 J, isto é 94% do valor teórico.

3. Analisando os dados é possível verificar uma relação entre o alongamento e o impacto, conforme mostrado na figura-70, considerando matrizes ferríticas, número de nódulos e nodularidade similares. Será desconsiderado o resultado da corrida#2, em virtude de sua matriz possuir regiões de perlita.

Comparando os dados da tabela-35, podemos concluir que quanto maior o alongamento maior será o valor de impacto, isto pode ser validado através de uma regressão entre o impacto e o resultado do alongamento, figura-71.

No gráfico é possível verificar que na análise de regressão linear existe um alto nível de dependência entre as variáveis, já que coeficiente de correlação(r) é 0,995 e que o coeficiente de determinação(r^2) também é 0,991.

Fig.-70. Gráfico de tendência de Alongamento e Impacto.

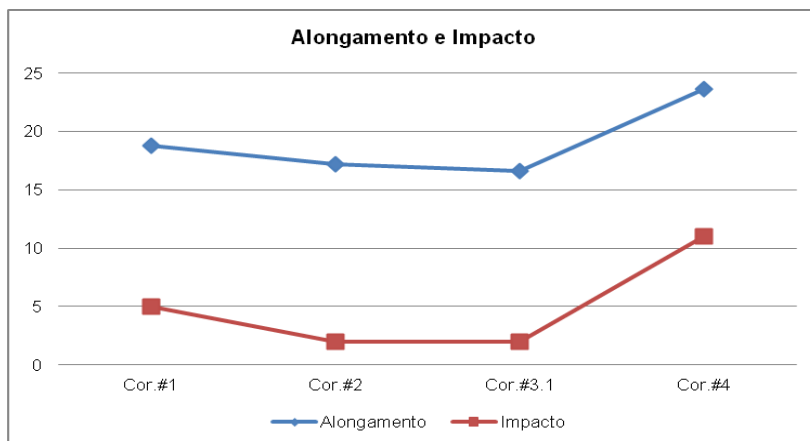
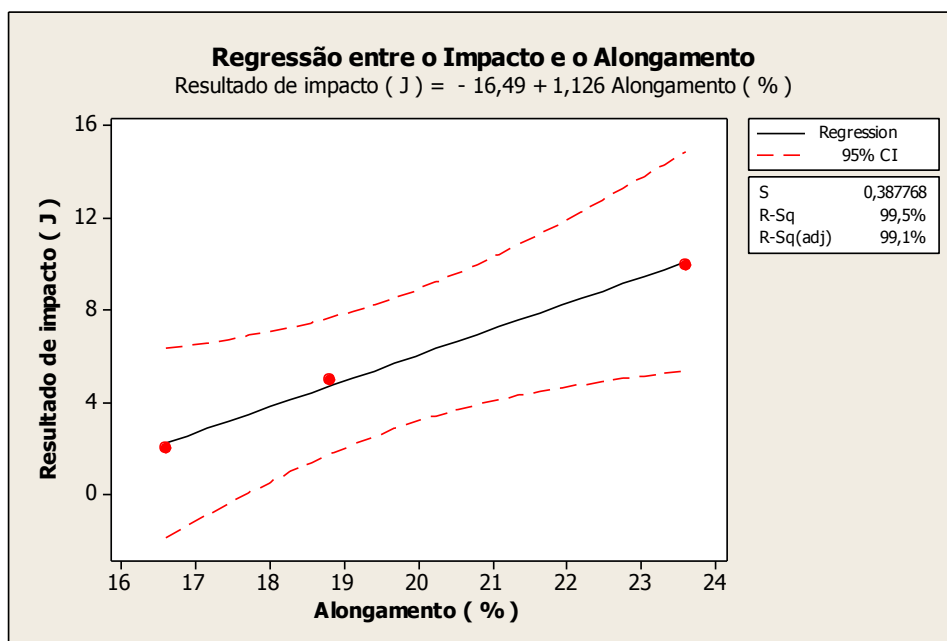


Tabela-35. Resultados dos percentuais de alongamento e impacto.

Alongamento (%)	Resultado de impacto (J)
18,8	5,0
16,6	2,0
23,6	10,0

Fig.-71. Gráfico de correlação entre o impacto e o alongamento.



A equação 15 mostra a correlação entre o Impacto e o Alongamento.

$$(15) \quad \text{Impacto} = -16,49 + 1,126 * \text{Alongamento}(\%)$$

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

1. Foi verificado durante as análises que a matriz 100% ferrítica é a primeira condição para que seja possível atender os requerimentos da norma DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT. Os resultados da Corrida#2, evidenciaram a influência da perlita nos resultados de Impacto, reduzindo os valores.
2. O efeito do número de nódulos na melhoria da nodularidade pôde ser comprovado em todas as quatro corridas, uma vez que os números de nódulos se mantiveram entre 140 e 213 nódulos/mm², isto fez com que além de contribuir para a matriz ferrítica, contribuiu significativamente para manter a nodularidade acima de 90%, mesmo variando em alguns momentos o tempo de *fading*, a temperatura de vazamento e a composição do magnésio residual.
3. É extremamente importante controlar os níveis de magnésio, para evitar a degeneração do nódulo e a grafita tipo *Spiky*, mas não foi evidenciado no trabalho que a corrida que possui o magnésio acima de 0,08%Mg será degenerada, no caso da Corrida#1, o resultado do residual de magnésio foi de 0,099% porém as grafitas mantiveram a nodularidade acima de 90%, isto pode ser atribuído ao baixo nível de enxofre do metal e ao controle dos tempos e temperaturas do processo.
4. A velocidade de resfriamento é tão importante quanto a temperatura e composição química, principalmente quando se trata de um ferro fundido nodular ferrítico, na Corrida#2 pôde ser evidenciado o quanto um percentual de perlita, 10%, por menor que seja pode impactar e reduzir o resultado do ensaio de impacto com entalhe a baixas temperaturas.

5. Foi evidenciado nas Corrida#3 e #4, a influência do percentual de silício no resultado de impacto, uma vez que foi constatado que com percentuais de 2,1% de silício foram suficientes para obter os valores de impacto requeridos, obtidos na Corrida#4, e que ao mesmo tempo resultados na ordem de 2,7% de silício foram suficientes para alterar as propriedades mecânicas, elevando a resistência e reduzindo os valores de impacto, que ocorreram na Corrida#3.

6. Durante as análises dos resultados foram evidenciadas correlações entre:

- Impacto e a Resistência a Tração.

$$\text{Impacto} = 361,6 - 1,576 * RT + 0,001726 * RT^2$$

- Impacto e o percentual de Silício.

$$\text{Impacto} = 43,42 - 15,61 * \%Si$$

- Impacto e o Alongamento.

$$\text{Impacto} = -16,49 + 1,126 * \text{Alongamento}(\%)$$

Todas estas correlações mostram que para se obter as propriedades desejadas deve-se objetivar alto alongamento e redução do silício, isto é matriz ferrítica e sem fragilidade por solução sólida do silício e uma resistência a tração próxima da faixa nominal que é obtida evitando a perlita na matriz, objetivando silício na faixa mínima, 2,1% e não excedendo o número de nódulos.

CAPÍTULO VI

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi possível verificar os principais parâmetros de processo que influenciam nas propriedades mecânicas de tração e impacto, como sugestão seria oportuno pesquisar sobre:

1. Mecanismo de fragilização do silício por solução sólida na matriz de um ferro fundido nodular ferrítico de alto impacto a baixa temperatura.
2. Avaliação da velocidade de resfriamento numa matriz 100% ferrítica e a influência nos resultados de impacto.
3. Determinação do número de nódulos ideal para obtenção das propriedades de impacto da liga DIN EN 1563-1998, EN-GJS-400-18 LT, considerando o resfriamento lento.
4. Realizar caracterização microestrutural via MEV(microscópio eletrônico de varredura).
5. Uso de análise de imagem para quantificação de fases e determinação da nodularidade e número de nódulos.
6. Avaliação da superfície de fratura do corpo de prova no teste de impacto, Charpy.
7. Utilização do software Thermocalc para:
 - 7.1 Definição da temperatura de transformação e formação das fases.
 - 7.2 Partição de soluto entre as fases presentes.
 - 7.3 Estudo da cinética de formação da grafita e da cementita.

CAPÍTULO VII

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELO JUNIOR, E. C. **Caracterização de Ferro Fundido Nodular obtido por Fundição Contínua**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-PR , 2003.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. **Iron and Steel Products**. Section-1, Vol.01.02, ASTM, 1989.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. **Iron and Steel Products**. Section-1, Vol.01.02, ASTM, 2007.

ASM HANDBOOK. **Metallography and Microstructures**. Vol.09, ASM, 2004.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia dos Materiais Uma Introdução**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. cap. 9 e 11.

CAMPBELL, J. **The New Metallurgy of Cast Metals**. Elsevier ,2º Edition, 2003.

CASTRO, C. Y. e ANTONIALLI, L. M. **A competitividade do setor de fundição a luz da tipologia de Poder**. Revista de Administração da FEAD-Minas, vol.-2, nº2, p.60-63, dezembro-2005.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ª Edição, ABM , 1988.

DÖTSCH, E. **Inductive Melting and Holding, Fundamentals Plants and Furnaces Process Engineering**. Vulkan-Verlag Germany ,2009.

FORREST, R. D. **The answer is blowing in the wind**. Suggest for Ductile Iron Production, Rio Tinto & Titanium Inc., 2006.

FORREST, R. D. **Melting Low Temperature Property Specifications in Ductile Iron.** Suggest for Ductile Iron Production, Rio Tinto & Titanium Inc., 2006.

FORREST, R. D. e MULLINS, J. D. **Achieving and Maintaining Optimum Ductile Iron Metal Quality.** Revista FOUNDRY (Indiana), Vol. XV, No. 4, July/August, 2003.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos.** São Paulo, 2009.

HASSE, S. **Observações sobre os ferros fundidos nodulares austeníticos.** Revista Fundição e Serviços, ano 20, nº208, Outubro de 2010.

HIRATSUKA, S., HORIE, H., KOWATA, T., KOIKE, K. and SHIMIZU, K. **Influence of steel scrap on microstructure and mechanical properties of spheroidal graphite cast iron.** Materials Transactions, vol.44,nº7(2003)pp.1419 to 1424.

HUERTA, E. and POPOVSKY, V. **A study of hold time, Fade effects and microstructure in ductile iron.** AFS Cast Iron Inoculation Conference September, 29-30, Schaumburg, Illinois. American Foundry Society, 2005.

HUPALO, M. F., BALZER, M. E. e WARMLING, G. **Avaliação da austemperabilidade de um ferro fundido nodular de classe perlítica (fe-70002) em corpos de prova com 50 mm de espessura.** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

ISRAEL, C. L. **Estudo Comparativo de Resistência ao Desgaste e ao Impacto de Ferros Fundidos de Alto Desempenho.** Dissertação de Mestrado, UFRGS, Brasil. 2005.

KARSAY, S. I. **Ductile Iron production practices.** American Foundrymen's Society, 1975.

MARTINS, F. R., GUARNIERI, R. A. e PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol.30, nº1, 1304, 2008.

MODERN CASTING (2012). **46th Census of World Casting Production.** Modern Casting Magazine, Modern Casting Staff Report, American Foundry Society, 25-28 census, p-26-28, december-2012.

MOHLA, P. e DAVID, E. **Métodos de nodularização para produção de ferro fundido nodular.** Revista Fundição e Serviços, ano 9, nº70, Outubro de 1998.

MULLINS, J. D. **The most important part of ductile iron production – Inoculation.** Suggest for Ductile Iron Production, Rio Tinto & Titanium Inc., 2006.

MULLINS, J. D. **Controlling the Chemistry and the charge Makeup based on the type of iron and the section size is very important.** Suggest for Ductile Iron Production, Rio Tinto & Titanium Inc., 2006.

OLSEN, S. O. O. **Inoculation of gray and ductile iron a comparison of nucleation sites and some practical advises.** Elkem ASA, Foundry Products Division, Norway. 66th World Foundry Congress, 2004.

OLSEN, S. O. and HARTUNG, C. **Recovery of magnesium in a ductile iron process.** Elkem ASA, Foundry Products, Kristiansand, Norway, 2003.

PEREIRA, M. D. A. A. **Comportamento à fadiga térmica de materiais para coquilhas destinadas ao fabrico de ferros fundidos.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Portugal. 1992.

POZZI, R.J. **Estudo Comparativo de Dois Inoculantes em Ferro Nodular Ferrítico.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Tupy. 2009.

RIBEIRO, C. A. S. **Ferros fundidos nodulares de matriz ferrítica em bruto, vazados em coquilhas de ferro fundido.** Dissertação de Doutorado, Departamento de Eng. Metalúrgica, Universidade do Porto, Portugal. 1989.

RIPOSAN, I., CHISAMERA, M. and STAN, S. **Performance of heavy ductile iron castings for windmills.** Revista Overseas Foundry, China Foundry, vol.7, nº2, 2010.

ROEDTER, H. e GAGNÉ, M. **Ductile Iron for Heavy Section Wind Mill Castings: A European Experience.** Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, Rio Tinto & Titanium Inc., Frankfurt, Germany, Montreal, Canada, 2003.

ROEDTER, H. and GAGNÉ, M. **Ductile Iron for Heavy Section Wind Mill Castings: A European Experience.** Rio Tinto & Titanium Inc., Frankfurt, Germany, Montreal, Canadá, 2003.

SANTOS, A. B. S. e BRANCO, C. H. C. **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Publicação nº1100, 1977.

SANTOS, A. B. S. **Alguns efeitos da composição química em ferros fundidos nodulares.** 12º CONAF - Congresso de Fundição - 27 a 30 de setembro de 2005 - São Paulo – Brasil.

SENAI,CEFET. **Guia Micrográfico dos Ferros Fundidos**. 1ª Edição, Itaúna, MG , 1995.

SENAI-MG. **Particularidades da Contração dos Ferros Fundidos de Grafitas Lamelar e Esferoidal**,6. 2ª Edição, Itaúna, MG , 1987.

SENAI-MG. **Ferros Fundidos de Grafita Esferoidal**,5. 2ª Edição, Itaúna, MG , 1987.

SENAI-MG. **Ferros Fundidos de Grafita Lamelar**,4. 2ª Edição,Vol-I, Itaúna, MG , 1987.

SENAI-MG. **Ferros Fundidos de Grafita Lamelar**,4. 2ª Edição,Vol-II, Itaúna, MG , 1987.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. cap. 9 a 11.

SUÁREZ-SANABRIA, A. e FERNÁNDEZ-CARRASQUILLA, J. **Microestructura y propiedades mecánicas de una fundición esferoidal ferrítica en bruto de colada para su uso en piezas de grandes dimensiones**. Revista de Metalurgia, 42 (1) enero-febrero, 18-31, 2006

SKALAND, T. **Nucleation mechanisms in ductile iron**. Elkem ASA, Foundry Products, Kristiansand, Norway. AFS Cast Iron Inoculation Conference September, 29-30, Schaumburg, Illinois. American Foundry Society, 2005.

SKALAND, T. **A Comparison of Alternative Treatment Methods**. Elkem ASA, Research, Kristiansand, Norway. 1999.

SKALAND, T. **A New Approach to Ductile Iron Inoculation**. Elkem ASA,

Research, Kristiansand, Norway. American Foundry Society, 2001.

SORELMETAL, **Ductile Iron Data for design engineers**. Rio Tinto & Titanium Inc., Montreal, Quebec, Canada, 1990.

TEIXEIRA, R. P. O. **Inoculação de Banhos de Ferros Fundidos na FUNFRAP – Grupo Teksid**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Portugal. 2012.

TESTIN, R. A. **A review of the mechanical properties of nodular cast iron with special reference to fatigue**. FCP Report nº2, Department of theoretical applied mechanics, Urbana, University of Illinois, March, 1972

VILELA, F. J. **Efeito de algumas variáveis de processo na obtenção do ferro fundido nodular ferrítico no estado bruto de fundição**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul-SP, 2010.

CAPÍTULO VIII

8. ANEXOS

1- Análise de regressão polinomial entre Impacto e Resistência a Tração realizada no Software, Minitab com intervalo de confiança de 95%.

The regression equation is : $\text{Impacto(J)} = 361,6 - 1,576 \text{ Resistência a Tração(MPa)} + 0,001726 \text{ Resistência a Tração(MPa)}^2$

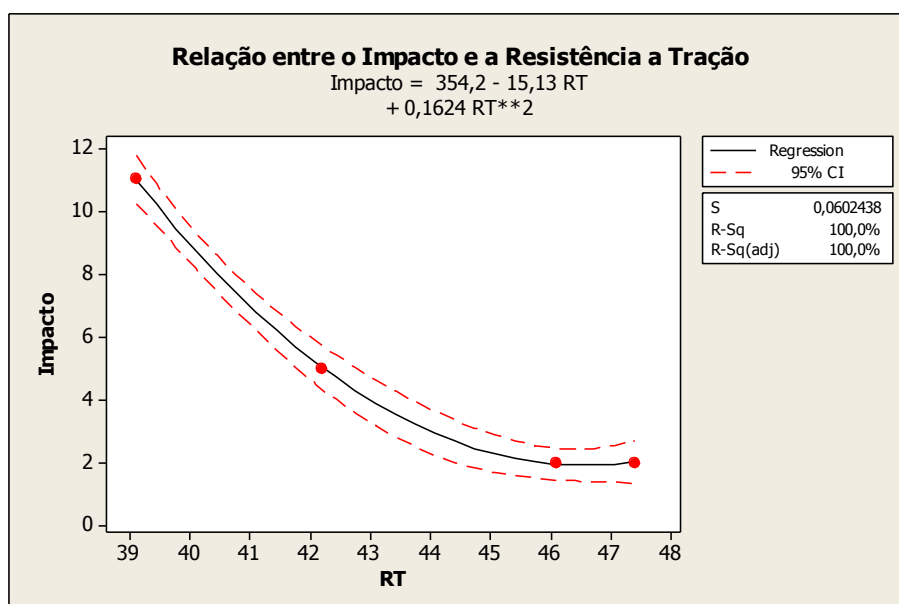
S = 0,0724540 R-Sq = 100,0% R-Sq(adj) = 100,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	53,9948	26,9974	5142,77	0,010
Error	1	0,0052	0,0052		
Total	3	54,0000			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	49,0359	19,76	0,047
Quadratic	1	4,9589	944,62	0,021



2- Análise de regressão linear entre o Impacto e o percentual de Silício realizada no Software, Minitab com intervalo de confiança de 95%.

Regression Analysis: Resultado de Impacto versus %Si

The regression equation is :

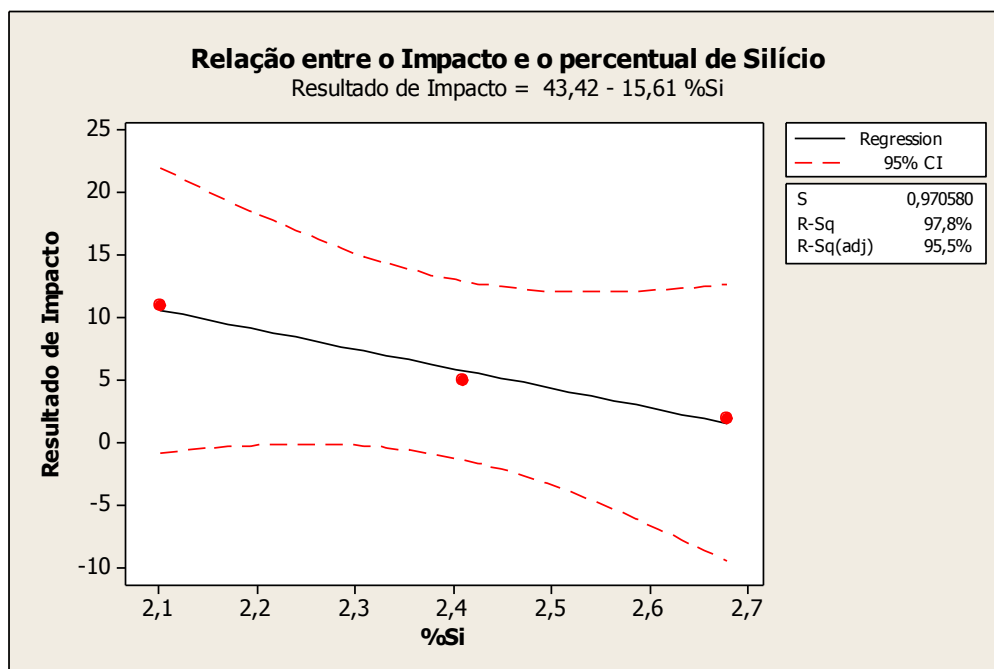
Resultado de Impacto = 43,42 - 15,61 %Si

S = 0,970580 R-Sq = 97,8% R-Sq(adj) = 95,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	41,0580	41,0580	43,58	0,096
Error	1	0,9420	0,9420		
Total	2	42,0000			

Fitted Line: Resultado de Impacto versus %Si



3- Análise de regressão linear entre o Impacto e o Alongamento
realizada no Software, Minitab com intervalo de confiança de 95%.

Regression Analysis: Resultado Impacto (J) versus Alongamento (%)

The regression equation is : Resultado de impacto (J) = - 16,49 +
 1,126*Alongamento (%)

S = 0,387768 R-Sq = 99,5% R-Sq(adj) = 99,1%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	32,5163	32,5163	216,25	0,043
Error	1	0,1504	0,1504		
Total	2	32,6667			

Fitted Line: Resultado de impacto (J) versus Alongamento (%)

