



FACULDADE HORIZONTINA

THIARLES CORACINI

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO FERRO
FUNDIDO NODULAR ATRAVÉS DE ENSAIOS ESPECÍFICOS: UM
ESTUDO DE CASO**

HORIZONTINA

2016

FACULDADE HORIZONTINA
Curso de Engenharia Mecânica

THIARLES CORACINI

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO FERRO
FUNDIDO NODULAR ATRAVÉS DE ENSAIOS ESPECÍFICOS: UM
ESTUDO DE CASO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Sirnei César Kach, Mestre.

HORIZONTINA-RS

2016



**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Análise das Características Estruturais do Ferro Fundido Nodular Através de Ensaios
Específicos: Um Estudo de Caso”**

Elaborada por:

Thiarles Coracini

**Aprovado em: 11/11/2016
Pela Comissão Examinadora**

**Mestre. Sirnei César Kach
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Mestre. Rafael Luciano Dalcin
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Especialista. Jackson Luis Bartz
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**HORIZONTALINA- RS
2016**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que buscam o conhecimento e que de alguma forma ele seja útil para a comunidade acadêmica.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar a vida, aos meus pais Terezinha e Alberi Coracini por terem me criado com todo o amor do mundo e pelo apoio em todos os momentos difíceis. Também agradeço aos meus irmãos que me incentivaram a estudar e buscar o melhor, aos professores que me ajudaram nessa trajetória e a todos os amigos e colegas que contribuíram direta e indiretamente para minha formação.

“Nossas virtudes e nossos defeitos são inseparáveis,
assim como a força e a matéria. Quando separados, o
homem deixa de existir.”

(Nikola Tesla).

RESUMO

Para adaptar-se às exigências de um mercado industrial cada vez mais concorrente a indústria moderna se obriga a desenvolver novas técnicas e conceitos de produção, bem como investir em tecnologia para a produção de novos materiais, ou substituir os existentes por outros mais convenientes. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as características estruturais do ferro fundido nodular GGG40 e GGG50, ambos vazados em temperaturas diferentes, através de ensaios e realizar a comparação entre as duas estruturas conforme os dados obtidos. A revisão bibliográfica foi realizada de modo a se obter informações relevantes ao desenvolvimento do estudo, tais como: materiais, processamentos, tratamentos, caracterizações e aplicações. A metodologia vai seguir o procedimento estudo de caso. A partir das amostras fundidas, foram produzidos corpos de prova para sua caracterização e estudos. Sua proposta consistiu na caracterização da estrutura, permitindo a identificação das fases e microconstituintes presentes no ferro fundido nodular, de modo a associá-las às alterações das propriedades mecânicas de limite de resistência a tração e alongamento, observados para as diferentes matérias e temperaturas de vazamento. Os ferros fundidos nodulares estudados foram produzidos pela empresa Metalúrgica Candeia, situada na cidade de Santa Rosa - RS. Para a análise do material foram empregadas as técnicas de análise de composição química, metalografia e ensaios de tração. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a temperatura após os tratamentos de inoculação e nodularização conduzem a alterações estruturais das fases presentes (grafita nodular, ferrita, e perlita). Observou-se a formação de grafita nodular regular (tipo VI), o limite de resistência à tração se mostrou influenciado pela forma da grafita (pequenos nódulos de carbono do tipo VI), além de outros fatores como a variação no percentual de ferrita e perlita entre os dois tipos de materiais. O alongamento por sua vez, se mostrou bastante dependente da forma da grafita (tipos VI), bem como da influência de seu tamanho e área média para todas as temperaturas de vazamento.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular. GGG40. GGG50.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação dos ferros fundidos.....	19
Figura 2 - Representação da tensão mecânica aplicada sobre barras com diferentes áreas de seção transversal.....	22
Figura 3 - Partes de um corpo de prova de seção circular.....	23
Figura 4 - Propriedades mecânicas em dependência do teor de perlita.....	25
Figura 5 - Classificação quanto as formas da grafita conforme norma ISO 945.....	27
Figura 6 - Classificação do tamanho da grafita para ferros fundidos nodulares conforme norma NBR 6593/80.....	28
Figura 7 - Indicação das dimensões referentes ao bloco Y conforme norma ASTM A536....	32
Figura 8 - Molde em areia branca confeccionado sob pressão para obtenção de blocos Y	33
Figura 9 - Características visuais dos materiais que formaram a carga base	34
Figura 10 - Pirômetro de contato do tipo "S"	36
Figura 11 - Molde em areia branca e bloco Y	37
Figura 12 - Ferramentas para obtenção de amostras para análise química	38
Figura 13 - Corpo de prova pronto para o ensaio químico.....	38
Figura 14 - Três amostras obtidas através de um bloco Y.....	39
Figura 15 - Identificação das amostras	40
Figura 16 - Aparência do corpo de prova pronto para ensaio de tração	41
Figura 17 - Região aproveitada para os testes metalográficos circulada em vermelho.....	41
Figura 18 - Ilustração do processo de obtenção dos corpos de prova metalográficos para as análises no microscópico	42
Figura 19 - Desenho esquemático para ensaio com espectrômetro.....	43
Figura 20 - Aparência de um dos corpos de prova após o ensaio químico	44
Figura 21 - Microscópico ótico utilizado para obtenção das imagens metalográficas.....	45
Figura 22 - Determinação da distância entre dois pontos para análise de deformação	46
Figura 23 - Aparência do corpo de prova após o ensaio de tração.....	47
Figura 24 - Dimensões do corpo de prova padrão para ensaio de tração	49
Figura 25 - Corpos de prova utilizados para realizar os ensaios	49
Figura 26 - Gráfico comparativo entre os materiais GGG40 e GGG50, conforme os dados apresentados nas Tabelas 4 e 5	51
Figura 27 - Demonstração gráfica conforme dados obtidos pela Tabela 6	53

Figura 28 - Variação do percentual de microconstituintes presentes, como ferrita, grafita e perlita, em função do tipo de material e da temperatura de vazamento	55
Figura 29 - Comparativo entre um corpo de prova sem falhas e outro apresentando imperfeições.....	56
Figura 30 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 8.....	57
Figura 31 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 9.....	58
Figura 32 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 10.....	59
Figura 33 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 11.....	60
Figura 34 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 12.....	61
Figura 35 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 13.....	62
Figura 36 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 14.....	63
Figura 37 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 15.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de orientação para as classes gerais dos ferros fundidos nodulares conforme norma DIN 1693	29
Tabela 2 – Propriedades mecânicas para os ferros fundidos nodulares conforme norma DIN 1693	29
Tabela 3 – Faixa percentual dos materiais utilizados para a formação da carga base.....	34
Tabela 4 – Composição química encontrada para o ferro fundido nodular GGG40.....	50
Tabela 5 – Composição química encontrada para o ferro fundido nodular GGG50.....	50
Tabela 6 – Contagem e determinação da quantidade de nódulos por mm ²	52
Tabela 7 – Avaliação quantitativa dos microconstituintes presentes	54
Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG40 vazado em baixa temperatura obtidas através do corpo de prova "Y-01"	57
Tabela 9 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG40 vazado em baixa temperatura obtidas através do corpo de prova "Y-02"	68
Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG40 vazado em alta temperatura obtidas através do corpo de prova "Y-01"	59
Tabela 11 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG40 vazado em alta temperatura obtidas através do corpo de prova "Y-02"	60
Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG50 vazado em baixa temperatura obtidas através do corpo de prova "Y-01"	61
Tabela 13 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG50 vazado em baixa temperatura obtidas através do corpo de prova "Y-02"	62
Tabela 14 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG50 vazado em alta temperatura obtidas através do corpo de prova "Y-01"	63
Tabela 15 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG50 vazado em alta temperatura obtidas através do corpo de prova "Y-02"	64

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas
ASTM – *American society for testing and materials*
DIN – *Deutsche industrie norm*
IPT – Instituto de pesquisas tecnológicas
ISO – *International organization for standardization*
NBR – Normas brasileiras
TFC – Trabalho final de curso
CCC – Cúbico de corpo centrado
CFC – Cúbico de face centrada
Al – Alumínio
C – Carbono
Cu – Cobre
Cr – Cromo
Mg – Magnésio
Mn – Manganês
Ni – Níquel
P – Fósforo
S - Enxofre
Si – Silício
A – Área
F – Força
LE – Tensão de escoamento
LR – Tensão máxima
MPA – Mega pascal
HB – Dureza brinell
CP – Corpo de prova
 α – Alfa
 γ – Gama
 σ – Tensão mecânica
 ε – Deformação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA.....	13
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.4 JUSTIFICATIVA	14
1.5 OBJETIVO GERAL.....	14
1.6 OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 GENERALIDADES SOBRE FERROS FUNDIDOS	15
2.2 DIAGRAMA DE FASES	16
2.3 OS PRINCIPAIS TIPOS DE FERROS FUNDIDOS.....	17
2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS.....	18
2.5 TIPOS DE ENSAIOS E TESTES APLICADOS AOS FERROS FUNDIDOS	20
2.5.1 Ensaio químico através de um espectrômetro	20
2.5.2 Ensaio metalográfico	21
2.5.3 Ensaio de tração.....	22
2.6 FERROS FUNDIDOS NODULARES	24
2.6.1 Propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares.....	24
2.6.2 Morfologia da grafita	26
2.6.3 Normas técnicas para ferros fundidos nodulares	28
2.6.4 Aplicações para ferros fundidos nodulares	30
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	31
3.1.1 Preparação dos moldes.....	32
3.1.2 Obtenção dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50	33
3.1.3 Preparação das amostras para os ensaios	36
3.1.4 Ensaio químico.....	43
3.1.5 Ensaio metalográfico	44
3.1.6 Ensaio de tração.....	46
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	47
3.3 DESCRIÇÃO DA AMOSTRA.....	48

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
4.1 ENSAIO QUÍMICO	50
4.2 ENSAIO METALOGRAFICO.....	52
4.2.1 Análise metalográfica dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 no estado quimicamente não atacado	52
4.2.1.1 Análise quantitativa da grafita nodular.....	52
4.2.2 Análise metalográfica dos ferros fundido nodulares GGG40 e GGG50 no estado quimicamente atacado.....	53
4.2.2.1 Análise quantitativa dos microconstituintes presentes nos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 no estado quimicamente atacado	54
4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO	55
4.4 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS.....	65
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXO A	70
ANEXO B	71
APÊNDICE A	72
APÊNDICE B	73
APÊNDICE C	74

1 INTRODUÇÃO

O presente TFC (Trabalho Final de Curso) tem como tema principal a análise das características estruturais de duas classes de materiais, tendo como ponto de partida, o desenvolvimento dos corpos de prova para a realização dos ensaios, estendendo-se até a análise dos resultados. O problema de pesquisa gira em torno das principais diferenças estruturais encontradas em cada material estudado e como se comportam ao serem comparados. Com o alto nível de complexidade envolvido nos processos de fundição o estudo desenvolvido nesse trabalho servirá de grande valia para o conhecimento acadêmico, tendo como foco os resultados obtidos através de três tipos diferentes de ensaios realizados conforme os objetivos específicos. Na primeira parte deste trabalho, apresenta-se o referencial teórico, abordando temas relacionados com o ferro fundido nodular e as duas estruturas em foco. Na segunda parte é descrita a metodologia com todos os procedimentos utilizados no decorrer do estudo de caso, bem como a análise dos resultados e conclusões.

1.1 TEMA

Analisar as características estruturais dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50, conforme os dados obtidos pela execução de diferentes tipos de ensaios.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esse trabalho iniciou-se a partir do desenvolvimento dos corpos de prova adquiridos através dos materiais ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 fornecidos pela empresa de fundição Metalúrgica Candeia. Ambos os materiais foram vazados em alta e baixa temperatura, os procedimentos estenderam-se até a análise dos resultados, na qual, foram obtidos mediante a realização dos ensaios químico, metalográfico e de tração.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

O aumento na demanda pela busca de novos materiais, na indústria, está relacionado com o custo e a eficiência. No esforço de alcançar estas exigências empregam-se novos materiais com resistência similar, mas com baixa densidade ou aumenta-se a resistência de materiais tradicionais através da adição de elementos de liga ou por tratamento térmico.

O ferro fundido nodular é uma liga composta, basicamente, de C (Carbono) e Si (Silício), com o carbono (grafite) livre na matriz metálica, porém em forma esferoidal. Passou a ser empregado industrialmente ampliando o campo de aplicação dos ferros fundidos, devido à combinação de propriedades como elevada tenacidade, resistência à tração, ductilidade, resistência ao desgaste e à fadiga, tornando-se um material de engenharia muito competitivo, combinando propriedades antes encontradas somente nos aços.

Este material apresenta boa resistência a tração e é muito utilizado na indústria, cujo objetivo é a melhoria da produtividade com redução de custo nas operações. Portanto, existem diferentes estruturas de ferro fundido nodular, nas quais destacam-se nesta pesquisa os ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50.

Diante do que foi exposto, será possível realizar o levantamento de dados das características estruturais com confiabilidade, para a realização da análise comparativa entre as duas classes de materiais?

1.4 JUSTIFICATIVA

O estudo sobre o ferro fundido nodular, terá grande relevância para a área acadêmica e profissional, pois possibilita um maior aprendizado sobre a complexidade que envolve os processos de fundição e a variedade de aplicações para cada uma das estruturas. Espera-se identificar, após a análise e discussão dos resultados, as principais diferenças encontradas nas duas classes de materiais.

1.5 OBJETIVO GERAL

O trabalho em questão tem como objetivo geral analisar as características estruturais dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50, ambos vazados em temperaturas diferentes, através de ensaios e realizar a comparação entre as duas estruturas conforme os dados obtidos.

1.6 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Alinhados ao objetivo geral, os objetivos específicos desse estudo são:

- Realizar ensaio para evidenciar a composição química de cada classe;
- Verificar a estrutura cristalina de cada material através do ensaio metalográfico;
- Executar ensaio de tração para determinar a capacidade de alongamento;
- Organizar as principais diferenças de cada material estudado e compará-las.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste tópico são abordados os principais temas relacionados ao objeto do trabalho a ser estudado, ou seja, algumas informações gerais sobre os ferros fundidos, seus principais tipos e classes, processos envolvidos para a fabricação e algumas informações mais específicas sobre o ferro fundido nodular com suas particularidades e normas.

2.1 GENERALIDADES SOBRE FERROS FUNDIDOS

Os ferros fundidos são constituídos basicamente de ferro, carbono e silício. Para caracterizá-los é necessário considerar o diagrama metaestável Fe-Fe₃C, que apresenta equilíbrio entre o ferro e a cementita, e o diagrama estável Fe-C, que mostra o equilíbrio entre o ferro e a grafita, ambos os diagramas estão representados no anexo A. Com base no diagrama metaestável, os ferros fundidos são definidos como ligas de ferro e carbono, em que a concentração de carbono está normalmente acima de 2% (CHIAVERINI, 2002).

Conforme Chiaverini (1987), para se ter um melhor entendimento sobre as diferentes microestruturas que podem ser encontradas em um ferro fundido, segue um breve significado para cada uma das fases:

- Ferrita

Uma solução sólida de carbono e ferro no estado puro, contém em solução traços de carbono, estável abaixo de 910°C e se cristaliza no sistema CCC (cúbico de corpo centrado). Também chamada de ferro alfa, é o exemplo clássico de um material ferromagnético. Comparada com outros constituintes, a ferrita é pouco dura, com dureza brinell igual a 80.

- Austenita

Uma solução sólida de carbono e ferro gama, possui estrutura cristalina CFC (cúbico de face centrada), existindo entre as temperaturas de 727°C e 1495°C, e com solubilidade máxima de carbono no ferro de 2,11% a 1148°C. Apresenta uma boa resistência mecânica e apreciável tenacidade e não é magnético.

- Perlita

Apresenta-se na forma de lâminas finas dispostas alternadamente. É uma mistura mecânica de 11,5% de cementita e 88,5% de ferrita, na forma de lamina finas disposta alternadamente. As propriedades mecânicas da perlita são intermediárias entre as da ferrita e da cementita.

- Cementita

É conhecida como carboneto de ferro, Fe_3C (contendo 6,67% de C), constituinte extremamente duro e quebradiço e que aparece no ferro fundido isoladamente ou em camadas alternadas com ferrita, formando a perlita, no primeiro caso, em quantidade predominante, da origem ao ferro fundido branco.

- Grafita

Ao contrário dos constituintes anteriormente citados, também encontrados nos aços comuns, este é tipicamente característico dos ferros fundidos. É formada, praticamente, por carbono puro disposto em camadas, podendo assumir diferentes formas, disposições e tamanhos. Apresenta baixa resistência mecânica e dureza entre 1 e 2 mohs.

2.2 DIAGRAMA DE FASES

Segundo Mello (1983), de forma a entender a solidificação dos ferros fundidos, faz-se necessário recorrer ao auxílio do diagrama de fases. O processo de solidificação de ferros fundidos ocorre de duas maneiras distintas: solidificação conforme diagrama metaestável, e solidificação conforme diagrama estável. No anexo A, está representado o diagrama metaestável e estável.

De acordo com a figura 1, as linhas pontilhadas correspondem aos limites de solubilidade para a modificação grafita, já as linhas diretas correspondem aos limites de solubilidade para a modificação cementita, Fe_3C . Nas linhas diretas pode-se identificar os limites de existência de aços, ferro gusa branco e ferro fundido duro (todas as fases metaestáveis; formadas durante um resfriamento não muito lento). Nas linhas pontilhadas, por outro lado, identifica-se as existências do ferro gusa temperado e do ferro fundido cinzento (a coloração escura destas duas fases tem sua origem na grafita; fases termodinamicamente estáveis, formadas por um resfriamento extremamente lento). Para o estudo da solidificação do ferro fundido nodular utiliza-se o diagrama estável, enquanto que para os ferro fundidos brancos utiliza-se o diagrama metaestável (KARSAY, 1985).

O ponto de fusão do ferro puro ocorre na temperatura de 1536°C , já na parte superior esquerda do diagrama ocorre uma reação especial chamada peritética, na passagem do estado líquido para o sólido, em torno de 1493°C , que não apresenta importância sob o ponto de vista prático. Nesse trecho, ao solidificar, o ferro adquire a estrutura cúbica centrada, chamada de δ (delta), passando pouco depois para a estrutura CFC, γ (gama), que caracteriza o ferro a alta

temperatura. A 911°C ocorre a passagem da forma CFC para CCC até a temperatura ambiente (MELLO, 1983).

2.3 OS PRINCIPAIS TIPOS DE FERROS FUNDIDOS

Atualmente, os ferros fundidos, em função de sua composição e microestrutura são classificados em 6 tipos distintos, a saber: ferro fundido branco, ferro fundido cinzento, ferro fundido mesclado, ferro fundido maleável, ferro fundido nodular e ferro fundido vermicular (CHIAVERINI, 2002):

a) Ferro fundido branco

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, seu nome é devido a sua superfície de fratura a qual possui aparência esbranquiçada.

b) Ferro fundido cinzento

São ferros cujo teor de carbono varia normalmente de 2,5 a 4,0% e silício de 1,0 a 3,0%. Sua principal característica são suas grafitas na forma de veios e sua matriz pode ser ferrita (ferro- α) ou perlita (ferro- α + cementita). O nome é dado em função da superfície fraturada desta liga, que possui uma aparência acinzentada, isto em função dos flocos de grafita. Possuem elevada resistência ao desgaste, resistência à compressão, boa eficiência na absorção de vibração, alta fluidez e baixo custo de fabricação.

c) Ferro fundido mesclado

Quando a solidificação resulta na formação de áreas de ferro fundido branco e de ferro fundido cinzento. O ponto de fratura apresenta a coloração cinza-claro, também em função da mistura das características dos ferros fundidos branco e cinzento. Suas propriedades são intermediárias entre os ferros fundidos brancos e cinzentos.

d) Ferro fundido maleável

É obtido a partir do ferro fundido branco através de tratamento térmico de maleabilização, onde a cementita se decompõe em grafita e austenita. Desta forma, dando origem aos chamados ferros maleáveis de núcleo preto (ou americano), ou é removida parcialmente por oxidação, com a formação de alguma grafita, sendo então

chamado ferro maleável de núcleo branco (ou europeu). Possuem como características de destaque a melhor usinabilidade comparada entre os ferros fundidos branco e cinzento. Sua ductilidade também chama a atenção por ser superior à dos ferros fundidos cinzentos, apresentando alongamentos que ultrapassam os 10%. São aplicados na produção conexões para tubulações hidráulicas, conexões para linhas de transmissão elétrica, sapatas de freios entre outros.

e) Ferro fundido nodular

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, devido aos nódulos. Esta característica 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 este tem maior resistência e ductilidade.

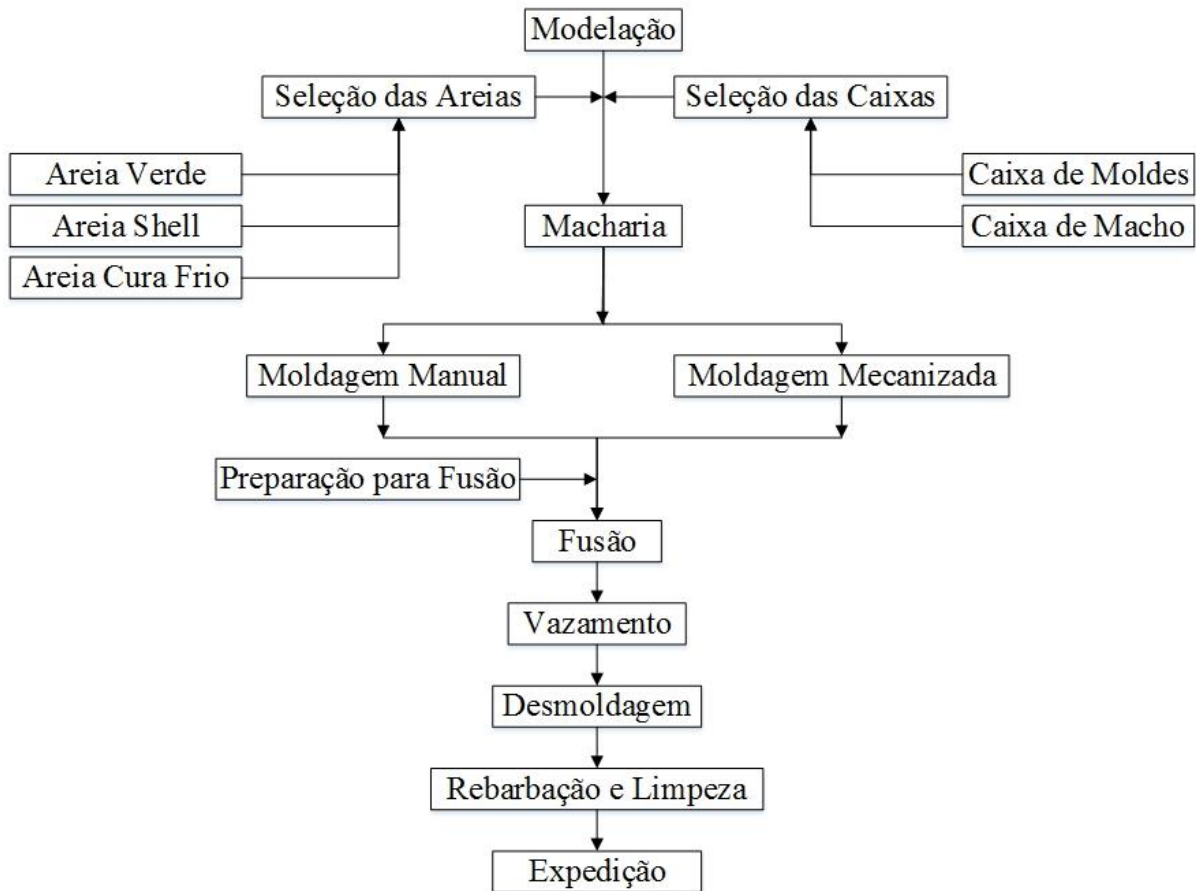
f) Ferro fundido vermicular

São ferros que possuem resistência a tração compatíveis com os ferros dúcteis e maleáveis, a sua ductilidade é intermediária entre o cinzento e nodular. A 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.

2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS

De acordo com Chegatti (2004), o processo de fabricação dos ferros fundidos tem como objetivo a fusão de metais, que em estado líquido, são vazados ou despejados em um molde contendo uma cavidade na geometria desejada para a peça final. Os processos podem se constituir de dois tipos de operações, as que tem por finalidade produzir o molde e as que tem o objetivo de fundir o metal. Na Figura 1, é possível visualizar um fluxograma dos principais processos que podem envolver o sistema para obtenção dos ferros fundidos.

Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação dos ferros fundidos



Fonte: Adaptado de Oliveira, 1998.

Conforme a Figura 1, a modelação tem a função de confeccionar o modelo com a forma final da peça, já a moldagem é o desenvolvimento do molde baseando-se no modelo. Na macharia é realizado a confecção dos machos, que tem por finalidade proporcionar os espaços vazios que possuem contra saídas na peça. Ao contrário do molde, que dá forma as partes externas de uma peça fundida, o macho é responsável em dar forma normalmente as partes internas (ocas) de uma peça fundida. A fusão é de forma simplificada, a passagem do estado sólido da sucata e demais materiais envolvidos na mistura para o estado líquido, ou seja, é a obtenção do metal líquido proveniente de um forno. Depois da fusão e adição das ligas, o metal líquido passa pela operação de vazamento, na qual consiste em encher o molde com o mesmo. Assim que o molde é vazado e o material solidificado dentro dele, ocorre a desmoldagem, que consiste na retirada da peça e remoção dos resíduos do molde. Depois ocorre a rebarbação e limpeza, refere-se a retirada dos canais de alimentação, massalotes e rebarbas que se formam durante a fundição. Para melhor entender, o canais de alimentação são as vias, ou condutos, por onde o metal líquido passe para chegar ao molde e o massalote é uma espécie de reserva de metal que preenche os espaços que vão se formando à medida que

a peça vai solidificando e se contraindo. Por fim, a peças são encaminhada ao setor de expedição de modo a serem deslocadas ao cliente (OLIVEIRA, 1998).

2.5 TIPOS DE ENSAIOS E TESTES APLICADOS AOS FERROS FUNDIDOS

Segundo Saad (2012), para se obter boa qualidade na produção de ferros fundidos, é necessário submetê-los por variados testes e assim eliminar possíveis danos futuros ao segmento do produto. Seguindo essa linha de pensamento, segue abaixo alguns exemplos de testes e ensaios aplicados ao ferros fundidos:

- Ensaio químico;
- Ensaio metalográfico;
- Ensaio de tração;
- Radiografia;
- Teste de som por leve impacto;
- Teste de impacto;
- Teste de pressão;
- Teste de penetração;
- Teste de ultrassom.

Geralmente as empresas em que trabalham nesse ramo não utilizam todos os testes citados anteriormente, apenas fazem uso daqueles que realmente são necessários em seus métodos de análises, como por exemplo, os ensaios químico, metalográfico e de tração (SAAD, 2012).

2.5.1 Ensaio químico através de um espectrômetro

Para Filho e Saraiva (2015), a luz é uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo. O chamado espectro nada mais é do que a intensidade da luz em diferentes comprimentos de onda. Através do espectroscópio ou espectrômetro pode-se identificar as linhas refletidas pelo prisma com os elementos químicos. Assim, cada elemento gera uma série de linhas diferentes.

Os elétrons permanecem em órbitas bem definidas e, quando excitados, emitem ou absorvem energia para transitar entre elas. Quando um elemento é aquecido, fornece-se energia em forma de calor absorvida pelos elétrons, isso faz com que os elétrons saltem a uma

outra órbita. Quando retornam à órbita original, eles emitem a energia recebida em forma de radiação seguindo um comprimento de onda específico. Justamente por isso cada elemento gera uma série de linhas diferentes (FILHO; SARAIVA, 2015).

De acordo com o IPT 2015 (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), o ensaio químico é muito importante quando se necessita conhecer a composição de um metal ou liga metálica. Mediante realização de análises através de um espectrômetro pode-se identificar a composição química de ligas ferrosas tais como: aço carbono, aço inoxidável, aço ferramenta, aço rápido, ferro fundido, liga de cobre, zinco, e outros materiais. Depois de identificar cada componente, é possível quantificar os teores dos elementos de uma determinada liga e, com os resultados obtidos, realizar sua classificação quanto à composição química ou verificar se o material atende a uma determinada especificação técnica.

2.5.2 Ensaio metalográfico

Conforme Rohde (2010), o ensaio metalográfico procura estudar a morfologia e a estrutura dos metais. Pode ser classificado como:

a) Ensaio micrográfico ou micrografia

São análises feitas em um microscópio com aumentos que normalmente estão na faixa de 50X a 2500X. Onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material, o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões.

b) Ensaio macrográfico ou macrografia

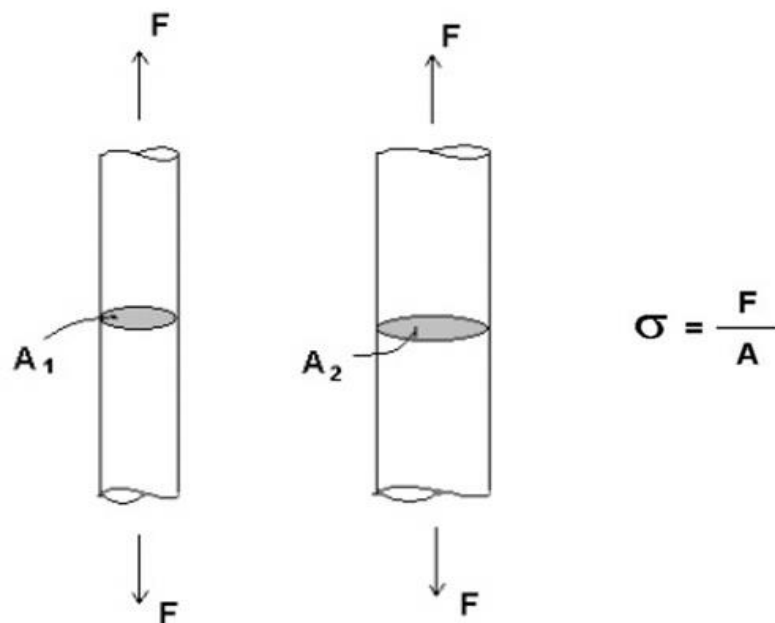
Consiste em análises feitas a olho nu ou com utilização de microscópios que favorecem a profundidade de foco e dão, portanto, visão tridimensional da área observada, com aumentos que podem variar de 5X a 50X. Pode ser verificado o aspecto de uma superfície após devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Assim tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impureza e ao processo de fabricação, qualidade de solda profundidade de tratamentos térmicos entre outras características.

2.5.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração tem como finalidade analisar as propriedades mecânicas de um material através da aplicação de cargas que tendem a alongá-lo até a ruptura. As cargas são medidas na própria máquina de ensaio. Esse tipo de ensaio permite conhecer como os materiais reagem aos esforços de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompem (SOBRAL; OLIVEIRA, 2009).

Conforme Bayer (2013), este ensaio é realizado utilizando-se um corpo de prova com formas e dimensões padronizadas, assim, os resultados adquiridos em um eventual teste podem ser comparados aos padrões especificados, conforme as aplicações desejadas ao material ensaiado. A resistência de um material pode ser medida de acordo com a correlação entre a força aplicada e a área de seção da peça. Esta propriedade tem o nome de tensão mecânica (σ) e está ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Representação da tensão mecânica aplicada sobre barras com diferentes áreas de seção transversal



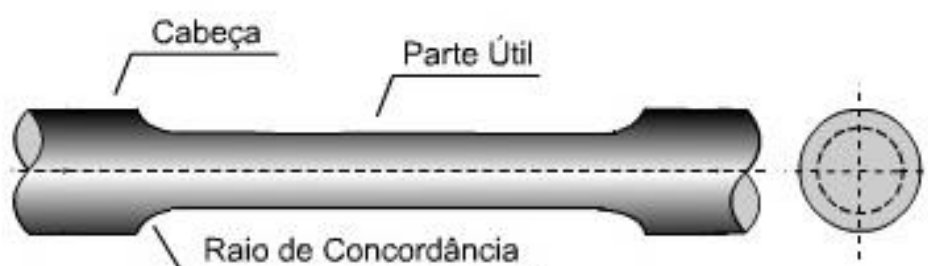
Fonte: Bayer, 2013.

De acordo com o que foi mencionado anteriormente, os corpos de prova devem seguir padrões de forma e dimensões para que as informações adquiridas nos testes possam ser utilizadas para eventuais análises. A norma brasileira utilizada para a padronização dos corpos de prova designados ao ensaio de tração é conhecida como MB-4 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que especifica formatos e dimensões para cada tipo de teste.

A sigla MB é referente ao método de ensaio, já o número 4 é referente a materiais metálicos submetidos aos ensaios de tração para a determinação das propriedades mecânicas (FREDEL; ORTEGA; BASTOS, 2011).

Conforme a norma, a secção transversal do corpo de prova pode ser circular ou retangular, dependendo da forma e das dimensões do produto de onde for extraído. Na Figura 3 é apresentado o desenho esquemático das partes de um corpo de prova circular usado em ensaios de tração.

Figura 3 – Partes de um corpo de prova de seção circular



Fonte: Fredel; Ortega; Bastos, 2011.

De acordo com Fredel, Ortega e Bastos (2011), para analisar as propriedades mecânicas de um metal é preciso ter a noção da precisão com que os corpos de prova são usinados e preparados. O trabalho para obtenção deste tipo de corpo de prova deve passar por um processo de usinagem adequado, que no caso, é essencial para um programa de testes de qualidade.

Para Sobral e Oliveira (2009), o ensaio de tração geralmente é realizado em uma máquina universal, conforme anexo B. Por ela ser universal, sua capacidade para execução de diversos testes a torna muito útil em um laboratório industrial e acadêmico.

O anexo B mostra os componentes básicos de uma máquina universal de ensaios. Inicialmente o corpo de prova é fixado na máquina em uma posição que permite ao equipamento aplicar uma carga axial, tendo como consequência o aumento do seu comprimento. A máquina de tração é hidráulica, movida pela pressão de óleo, e está ligada a um dinamômetro que mede a força aplicada ao corpo de prova. Ela é conectada a um *software* específico ou compatível que recebe as informações registradas durante a execução dos testes e, através de gráficos, é traçado o diagrama de força e deformação (SOBRAL; OLIVEIRA, 2009).

2.6 FERROS FUNDIDOS NODULARES

Com uma quantidade mínima de magnésio e de cério adicionada ao ferro fundido cinzento antes da fusão dos materiais base, resulta no chamado ferro fundido nodular ou dúctil. É um material de engenharia com alta ductilidade, módulo de elasticidade, resistência mecânica e resistência à corrosão. Além disso, tem baixo custo e é fácil de produzir, é amplamente utilizado como um material estrutural. Durante os últimos anos, o uso industrial do ferro fundido nodular tem vindo a aumentar e investiga-se com frequência as melhores formas de caracterizar e melhorar suas propriedades mecânicas. Exemplos de aplicações para os ferros fundidos nodulares são peças automotivas, tais como árvores de cames, virabrequins, carcaças de bombas de água, válvulas e articulações (SERVI, 2013).

Conforme Maluf (2002), os nódulos de grafite esferoidal, distribuídos na matriz de ferrita e/ou perlita, característica dos ferros fundidos nodulares, é obtido através de inoculação de magnésio; outros elementos de liga, tais como o cobre, cromo, níquel, vanádio e molibdénio são também normalmente adicionados aos fundido nodulares, a fim de obter propriedades específicas.

Os inúmeros usos, bem sucedidos de ferro fundido nodular nos componentes críticos em todos os setores da indústria destaca sua versatilidade e sugere muitas aplicações adicionais. Para utilizar o ferro fundido nodular com confiança, o engenheiro de projeto deve ter acesso a dados de engenharia que pode descrever as seguintes propriedades mecânicas: comportamento elástico, resistência, ductilidade, dureza, resistência à fratura e propriedades de fadiga. Propriedades físicas como; expansão térmica, condutividade térmica, capacidade calorífica, densidade e propriedades magnéticas e elétricas, são também de interesse em muitas aplicações (MALUF, 2002).

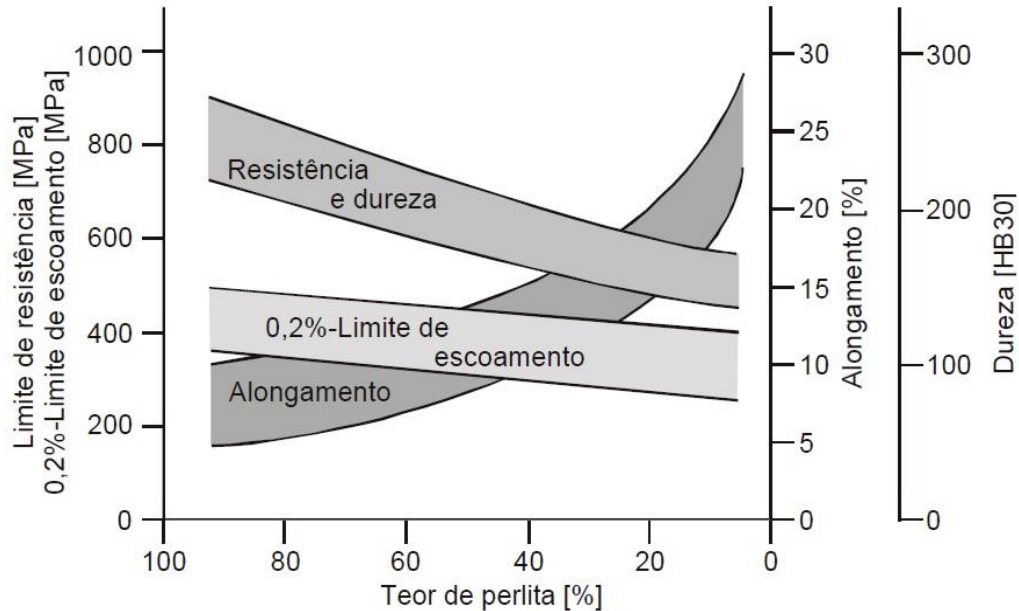
2.6.1 Propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares

Conforme Guesser (2009), para analisar os ferros fundidos nodulares, são de fundamental interesse o estudo das propriedades mecânicas de resistência, deformação elástica e o módulo de elasticidade, e alongamento total.

De acordo com Hasse (1996), a resistência e a dureza dos materiais são influenciadas pelas discordâncias internas dos metais sob tensão. As propriedades mecânicas do ferro fundido nodular estão diretamente ligadas as características estruturais da matriz. Na Figura 4

é possível visualizar o gráfico que demonstra as propriedades mecânicas em dependência do teor de perlita.

Figura 4 – Propriedades mecânicas em dependência do teor de perlita



Fonte: Hasse, 1996.

A Figura 4 mostra que, com o aumento do teor de perlita também aumenta a dureza, o limite de escoamento e o limite de resistência do material, enquanto as propriedades de plasticidade e ductilidade diminuem. A resistência é calculada pela carga máxima atingida no ensaio. Embora o limite de resistência seja uma propriedade de fácil obtenção, seu valor tem pouca significância com relação à resistência dos metais dúcteis. Para esses, o valor do limite de resistência dá a medida da carga máxima que o material pode atingir sob a restrita condição de carregamento uniaxial (SANTOS; SUGIYAMA, 1974).

Para a maioria dos materiais metálicos, o limite de proporcionalidade é o principal parâmetro de resistência utilizado em projeto, já que na maioria dos componentes é inadmissível qualquer deformação plástica (GUESSER, 2009). Entretanto, o limite de resistência serve para especificar o material, do mesmo modo que a análise química identifica o material (SANTOS; SUGIYAMA, 1974).

Na deformação elástica e módulo de elasticidade a intensidade de deformação causada pela aplicação de uma certa tensão é governada pelo módulo de elasticidade (E). O módulo de elasticidade mede a rigidez do material, e quanto maior o seu valor, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão. Para aplicações onde a deformação elástica deve ser baixa, o módulo de elasticidade certamente é uma propriedade importante a ser

considerada na seleção do material. O alongamento até a ruptura, ou alongamento total, é uma medida da ductilidade do material. A ductilidade pode ser definida como sendo a habilidade do material em acomodar deformações não elásticas sem ruptura (SANTOS; SUGIYAMA, 1974).

2.6.2 Morfologia da grafita

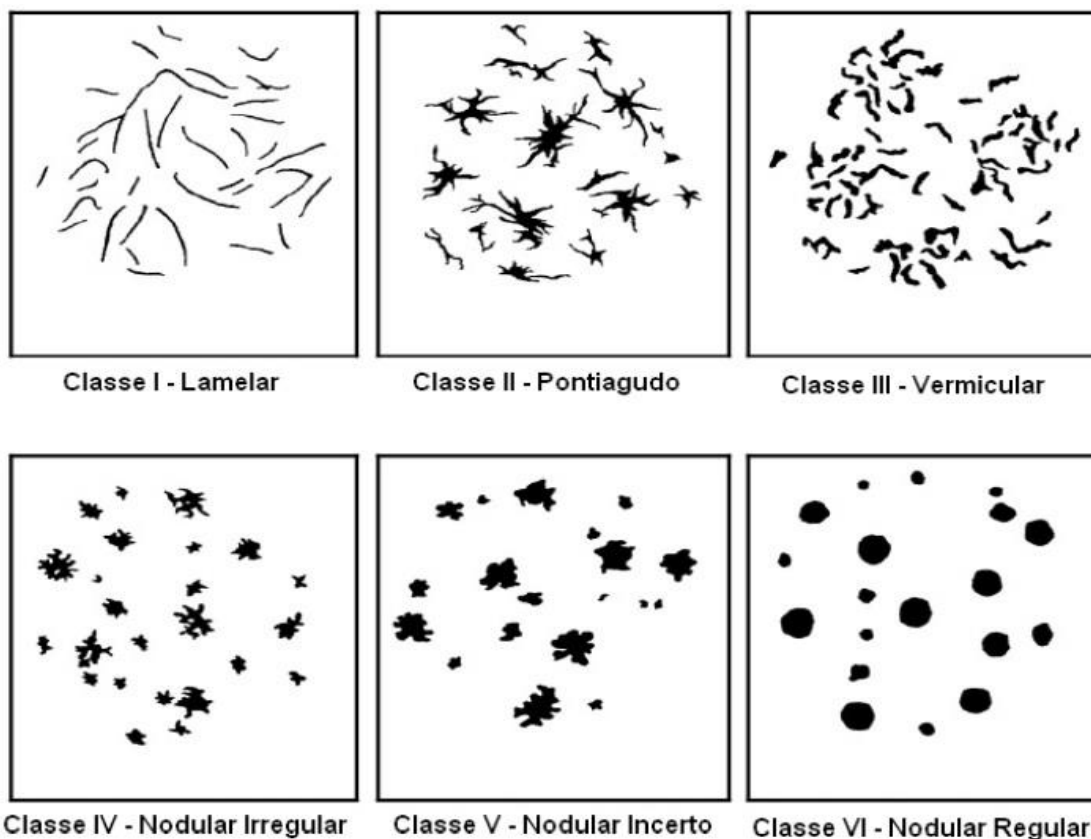
Segundo Silva (2010), na fabricação dos ferros fundidos nodulares são necessários manter certos cuidados para se obter a qualidade final do produto. Como esse tipo de material é caracterizado pelo tamanho e forma dos nódulos de grafita, três tópicos importantes devem ser abordados, em termos de nódulos, que são:

- 1) Tamanho de nódulos: no momento da preparação para a obtenção do fundido nodular, elevados teores de C e Si tendem a formar nódulos maiores, assim como taxas de solidificação mais lentas em peças grossas. Não é uma regra geral mas normalmente um elevado número de nódulos leva a tamanhos menores;
- 2) Grau de nodularidade: o grau de nodularidade representa o quanto os nódulos estão esféricos. Os critérios de qualidade determinam que este valor deve ser o maior possível, sendo aceitável até valores de 85% de nodularidade. No entanto, o valor limite em muitos casos é definido pelos usuários de acordo com as exigências de projeto e solicitações;
- 3) Número de nódulos por unidade de área: na indústria, geralmente os fatores de processo que afetam a quantidade de nódulos são a temperatura de vazamento, taxa de solidificação que altera de acordo com a espessura do fundido e, inoculação.

Se analisar e manter o controle do tamanho de nódulos, do grau de nodularidade e do número de nódulos por unidade de área, as chances de se obter um produto final com mais qualidade são grandes comparado a produtos fabricados sem um criterioso cuidado técnico. A classificação referente aos tópicos abordados está evidenciada na Figura 6 (SILVA, 2010).

Conforme Cavalheiro e Strey (2014), o grau de nodularização é determinado, estatisticamente, por meio da comparação da geometria dos nódulos com uma esfera perfeita o resultado desta análise se dá de forma percentual. Na Figura 5 evidencia-se o padrão de comparação conforme norma ISO 945 (*International organization for standardization*) do ano de 1975, que por sua vez trata da classificação das classes quanto a forma da grafita.

Figura 5 – Classificação quanto as formas da grafita conforme norma ISO 945

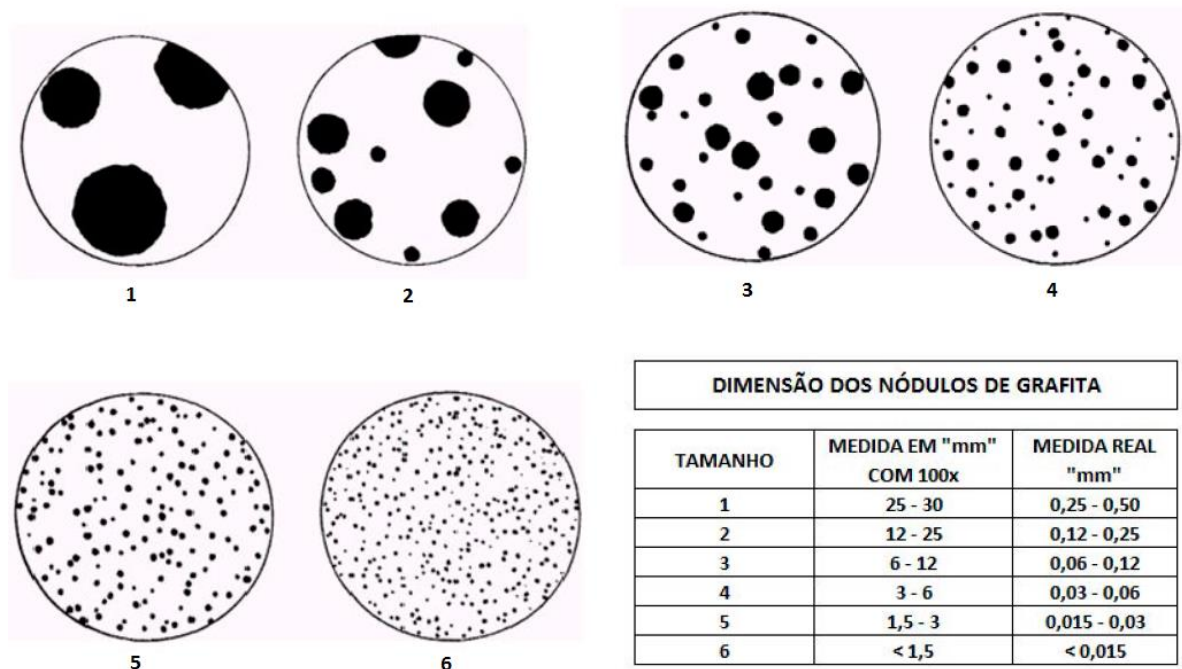


Fonte: Cavalheiro; Strey, 2014.

De acordo com a Figura 5, a norma ISO 945 classifica as ilhas de grafita conforme seu tipo, distribuição e tamanho. Para que possam ser comparadas com a norma, as amostras devem estar preparadas metalograficamente sob a forma de superfície espelhada, não sendo necessário ataque químico da mesma (FARACO, 2005).

Avalia-se também o tamanho dos nódulos onde são classificados por meio de um padrão em 100X de ampliação comparando-o com uma tabela fornecida pela norma NBR (Normas brasileiras) 6593/80. Quanto maior o grau de nodularização mais eficiente será o processo durante a produção do ferro fundido nodular. Pode-se perceber de forma clara conforme norma NBR 6593/80 a distribuição dos nódulos presentes no ferro fundido, baseando-se nas diferentes dimensões que a grafita pode obter e se distribuir em uma matriz observa-se a grande influência que o grau de nodularização tem nas propriedades mecânicas do fundido e, o quão grande pode ser o número de aplicações para esse tipo de material. Na Figura 6 é possível verificar imagens com diferentes tamanhos de nódulos (CAVALHEIRO; STREY, 2014).

Figura 6 – Classificação do tamanho da grafita para ferros fundidos nodulares conforme norma NBR 6593/80



Fonte: Cavalheiro; Strey, 2014.

2.6.3 Normas técnicas para ferros fundidos nodulares

Para Guesser (2009), os produtos fundidos são produzidos segundo padrões estabelecidos em normas técnicas. Para o TFC foram designados os padrões de valores para as propriedades químicas e mecânicas que servirão de apoio no momento da análise dos resultados. Esses padrões, tanto na classificação dos materiais como no valores de suas propriedades, são determinados de acordo com a norma DIN (*Deutsche industrie norm*) 1693, na qual a empresa de fundição, onde foi efetuado a parte prática deste trabalho, usa como padrão interno de produção.

A norma DIN 1693, utilizada como base de informações técnicas, é um padrão técnico para garantia da qualidade de produtos industriais e científicos de origem alemã e instituída em 1997. A norma DIN realiza as mesmas funções que órgãos internacionais como a ISO. Na Tabela 1 é possível visualizar os parâmetros da composição química de cada material utilizado pela empresa (KARSAY, 1985).

Tabela 1 - Composição química de orientação para as classes gerais dos ferros fundidos nodulares conforme norma DIN 1693

Material	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cu	%Al	%Mg	%Cr	%Ni
GGG40	3,5	2,6	0,2	0,08	0,025	0,11	0,025	0,026	0,155	0,1
	3,75	2,9	0,4	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	0,05	Máx.	Máx.
GGG50	3,4	2,6	0,49	0,08	0,025	0,39	0,025	0,025	0,155	0,1
	3,6	2,8	0,52	Máx.	Máx.	0,42	Máx.	0,05	Máx.	Máx.
GGG50 A	3,5	2,6	0,25	0,003	0,003	0,2	0,009	0,03	0,155	0,01
	3,7	3	0,35	0,3	0,025	0,35	0,025	0,05	0,03	0,1
GGG60	3,4	2,6	0,5	0,08	0,025	0,5	0,025	0,025	0,155	0,1
	3,65	2,9	0,55	Máx.	Máx.	0,55	Máx.	0,05	Máx.	Máx.
GGG70	3,4	2,4	0,55	0,08	0,025	0,55	0,025	0,025	0,155	0,1
	3,65	2,9	0,6	Máx.	Máx.	0,6	Máx.	0,05	Máx.	Máx.

Fonte: O autor, 2016.

Conforme Karsay (1985), para a análise das propriedades mecânicas são necessários a utilização dos valores determinados pela Tabela 2, que servem de parâmetro no momento de estabelecer, conforme comparação com os dados obtidos através dos ensaios, a qualidade final do material produzido.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas para os ferros fundidos nodulares conforme norma DIN 1693

Ferro Fundido Nodular	LR Tração (Tensão Máxima)	LE Escoamento (Tensão de Escoamento)	Alongamento	Dureza HB
GGG40	Min. 450 MPA	Min. 275 MPA	Min. 15%	135 à 185
GGG50	Min. 500 MPA	Min. 320 MPA	Min. 6%	187 à 255
GGG60	Min. 600 MPA	Min. 380 MPA	Min. 4%	217 à 269
GGG70	Min. 700 MPA	Min. 483 MPA	Min. 3%	230 à 285
GGG80	Min. 827 MPA	Min. 621 MPA	Min. 2%	255 à 311

Fonte: O autor, 2016.

Para seguir corretamente todas as normas a empresa precisa dar atenção regular as análises executadas antes, durante e após a produção, para manter as propriedades dos ferros fundidos nodulares dentro dos padrões solicitados pelas mesmas (GUESSER, 2009).

2.6.4 Aplicações para ferros fundidos nodulares

De acordo com Chiaverini (2002), o ferro fundido nodular abrange uma vasta área de aplicações, entre algumas delas estão: peças sujeitas a pressão, compressores, válvulas, carcaça de bombas e bielas.

Também englobam esse ramo de aplicações peças que exigem maior resistência ao choque, como virabrequins, matrizes, mancais, polias, rodas dentadas, engrenagens, pinhões, cilindros, componentes de máquinas e automóveis, engates, sapatas, tambores de freio, entre outros (CHIAVERINI, 2002).

Conforme a Fundação Altivo S/A (2011), para comparar as características estruturais do ferro fundido nodular GGG40 e GGG50, é importante salientar algumas aplicações e características básicas referentes a esses dois tipos de materiais:

- Ferro fundido nodular GGG40

É usualmente aplicado em componentes mecânicos submetidos a cargas moderadas e que exijam boa ductibilidade e usinabilidade. É indicado para serviços em altas temperaturas como por exemplo grelhas, cubos de rodas e tambores. O tratamento térmico recomendado para esse tipo de material é o recozimento, a composição química e a dureza podem variar em função da geometria/espessura da peça. No quesito soldagem esse material é considerado inadequado comparado a outros.

- Ferro fundido nodular GGG50

É muito utilizado em construção mecânica. Adequado para elementos de máquinas sujeitos a cargas de choque e a fadiga, como por exemplo polias, mancais, braços, cabeçotes de prensas e tambores. O tratamento térmico recomendado para esse tipo de material é a normalização. A composição química e a dureza podem variar em função da geometria/espessura da peça. No quesito soldagem esse material é considerado inadequado comparado a outros.

3 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como um estudo de caso, uma vez que o pesquisador coletou todas as informações necessárias na Metalúrgica Candeia, bem como a realização de análises indispensáveis para o objetivo da pesquisa. Conforme Gil (1999), um estudo de caso tem por objetivo fazer uma análise de questões, a fim de permitir o seu conhecimento de forma ampla e detalhada.

De acordo com Gil (1999), os estudos de caso podem ser classificados em: exploratórios, descritivos e explicativos. Neste contexto, observa-se que o presente TFC caracteriza-se como exploratório, uma vez que o pesquisador buscou inicialmente entender todo o processo referente às práticas de fundição, fazendo um levantamento bibliográfico e acompanhando os processos de ensaios.

Com base em Mattar (1999), quanto a natureza das variáveis pesquisadas, estas podem ser de ordem qualitativa ou quantitativa. A pesquisa qualitativa identifica a presença ou ausência de algo, enquanto a quantitativa procura avaliar o grau em que algo está presente.

Levando em conta o que foi exposto, observa-se que o presente TFC caracteriza-se como qualitativo, uma vez que o pesquisador realizou a coleta de dados referentes ao estudo em um ambiente real, realizando um registro detalhado das atividades desenvolvidas neste ambiente. Tendo como foco principal a análise metalográfica, análise química e ensaio de tração apenas nos corpos de provas referentes aos materiais ferro fundido nodular GGG40 e GGG50, ambos vazados em alta temperatura e baixa temperatura.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Para que a coleta de dados tenha maior importância, a mesma não pode ser um processo acumulativo e linear, cuja frequência seja controlada/mensurada e sim, deve permitir ao pesquisador estabelecer leis e prever fatos (CHIZZOTTI, 1995).

Conforme as informações descritas, esse trabalho iniciou a realização da pesquisa através das coletas de dados. De acordo com isso, os dados referentes ao presente estudo de caso, foram coletados da seguinte forma:

- Dados primários

Foram coletados pelo pesquisador por meio do acompanhamento de ensaios químicos, metalográficos e de tração, aplicados nos corpos de provas referentes aos materiais ferro fundido nodular GGG40 e ferro fundido nodular GGG50. No grupo de trabalho definiu-se o

parâmetro estimado de amostras. Também foi realizado o acompanhamento dos processos para obtenção dos corpos de provas a ser estudados.

- Dados secundários

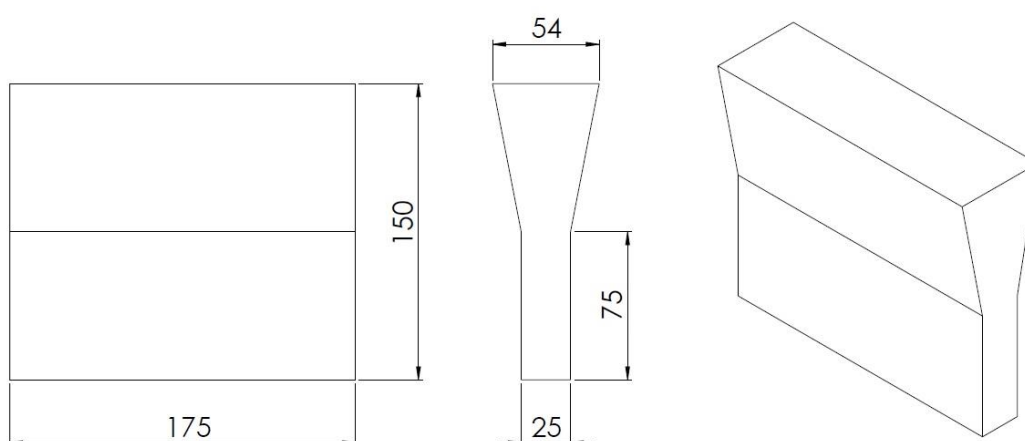
São dados que se encontram disponíveis em documentos e publicações. Os dados secundários são provenientes de materiais informativos disponíveis em diversas fontes, revistas especializadas, periódicos, dissertações, entre outros.

Em função dos aspectos citados anteriormente, destaca-se que primeiramente a pesquisa iniciou através da coleta de dados secundários, por meio de pesquisa bibliográfica, e em um segundo momento fez-se a coleta de dados primários na empresa pesquisada.

3.1.1 Preparação dos moldes

Para o desenvolvimento deste trabalho foi confeccionado modelos de “Bloco Y” em moldes de areia branca, seguindo as dimensões definidas conforme a norma ASTM A536 (*American society for testing and materials*), observadas em destaque por um esboço demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Indicação das dimensões referente ao bloco Y conforme norma ASTM A536



Fonte: O autor, 2016.

Conforme as dimensões estabelecidas, o molde foi preparado através de um misturador manual. Primeiramente, foi adicionado a areia branca junto ao catalisador que ficou em mistura por alguns minutos. Depois foi adicionado a resina e verificado a perfeita homogeneização da mistura. Esse processo diminui o tempo para desmoldagem e vazamento

de metal, é conhecido como processo de cura a frio ou *Cold Box*, processo de alta produtividade. Com a mistura pronta, o molde foi confeccionado através de um dispositivo instalado em uma prensa hidráulica, que tem a função de comprimir a areia branca dando a forma desejada de acordo com o padrão do bloco Y. Na Figura 8 pode-se visualizar uma breve imagem do molde pronto.

Figura 8 – Molde em areia branca confeccionado sob pressão para obtenção de blocos Y



Fonte: O autor, 2016.

Conforme Figura 8, uma das características desse tipo de molde é a sua degradação gradual enquanto o material nele depositado permanece em constante resfriamento até atingir temperatura ambiente. A desintegração do molde se dá pela ação do calor do metal que queima a resina e o catalisador misturados na areia que darão “liga” ao molde. Isso facilita no momento em que ocorre a desmoldagem, pois a maioria da estrutura do molde se desintegrou enquanto o material permanecia em descanso.

3.1.2 Obtenção dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50

A produção dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 seguiu como base as informações presentes na norma DIN 1693. Inicialmente, foi preparado o forno de indução, que tem capacidade para 2000 kg de carga, após os processos iniciais definiu-se as matérias-primas responsáveis pela obtenção da carga de ferro fundido base. Esses materiais são específicos para a fabricação dos ferros fundidos nodulares. Cada material e faixa percentual aplicado no forno pode ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3 – Faixa percentual dos materiais utilizados para a formação da carga base

Matéria- prima	Percentual
Ferro Gusa	4 a 10%
Sucata de Aço	35 a 80%
Canal Retorno	16 a 61%
Grafite	0 a 5%
Ferro Silício	0 a 2%

Fonte: O autor, 2016.

Nos dados observados na Tabela 3, o percentual de matéria-prima utilizado na mistura é um padrão de fabrica utilizado pela empresa de fundição, onde foi aplicado o estudo prático. Os dados foram organizados e através deles estipulados os limites percentuais. Se a quantidade de cada material estiver dentro do que foi exposto pela tabela 3, a qualidade da carga base será mantida.

Para se ter um melhor entendimento das características visuais de cada material que foi aplicado, todos foram separados e organizados antes de serem misturados no forno, com o objetivo de demonstra-los na Figura 9.

Figura 9 – Características visuais dos materiais que formaram a carga base



Fonte: O autor, 2016.

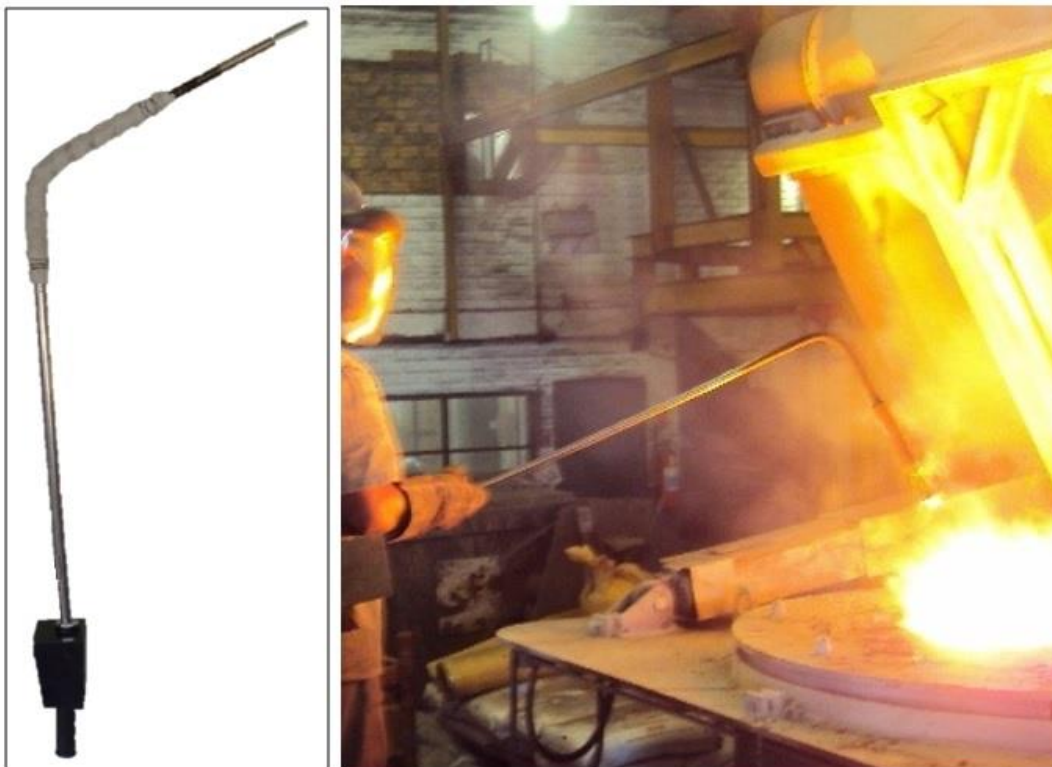
Na Figura 9, os materiais ferro gusa, grafite granulado e ferro silício são obtidos através de fornecedores especializados nesse tipo de matéria-prima, já a sucata de aço é adquirida através de uma empresa especializada no recolhimento de aços rejeitados por indústrias metalúrgicas da região. Essas sucatas são separadas e compactadas em blocos e, dessa forma, são enviadas para as empresas que necessitam. O canal de retorno nada mais é, do que as sobras ou rejeitos de materiais fundidos advindos de processos anteriores, que foram realizados na própria empresa.

Quando a temperatura do metal no forno atingir valor entre 1520°C a 1575°C, que é a temperatura estipulada para esse tipo de material, o metal líquido deve ser vazado.

Antes de transferir o metal líquido do forno para o panelão, foi adicionado liga de magnésio com percentual de 1,6 à 1,9%. Na etapa seguinte, durante a transferência do metal do panelão para a panela de vazamento, ocorre a inoculação e nodularização, o inoculante é colocado sobre o jato do metal, para melhor aproveitamento do mesmo. Nessa etapa, definiu-se a característica final para obtenção dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50. Em seguida, foi separado duas panelas de vazamento e cada uma recebeu percentuais diferentes de inoculante, conforme as quantidades especificadas para cada material, ou seja, a partir daí obteve-se uma panela com metal líquido composto por ferro fundido nodular GGG40 e outra panela com metal líquido de ferro fundido nodular GGG50. Feito isso, encaminhou-se para o vazamento em moldes.

É importante salientar alguns critérios práticos aprendidos: no momento do vazamento em moldes é ideal que a temperatura esteja entre 1330°C à 1410° C. Desse modo, a obtenção de um produto final com maior qualidade é garantida, sem esquecer de salientar que existe um tempo de vazamento para que mantenha-se o padrão de temperatura. De acordo com dados práticos da empresa, para os ferros fundido nodulares, o tempo em que o metal líquido deve levar, desde a transferência do forno para o panelão até o vazamento nos moldes, não pode superar os 9 minutos. Caso ultrapasse esse tempo, a temperatura terá valor inferior a 1330°C, o que poderá acarretar peças com junta fria, vazamento incompleto, rechupes e microestrutura indesejada. O controle da temperatura do metal, do forno até o vazamento nos moldes, também foi monitorada por um pirômetro. Na Figura 10 é possível visualizar o pirômetro utilizado no controle de temperatura.

Figura 10 – Pirômetro de contato do tipo “S”



Fonte: O autor, 2016.

Na Figura 10, o pirômetro de contato é constituído de um indicador de temperatura e um sensor. A energia necessária ao seu funcionamento normalmente é oriunda de pilhas comuns ou baterias recarregáveis. Na prática, para a verificação da temperatura do material líquido, acontece o contato físico do sensor com a superfície do mesmo e, aguarda-se a estabilização da leitura no indicador de temperatura.

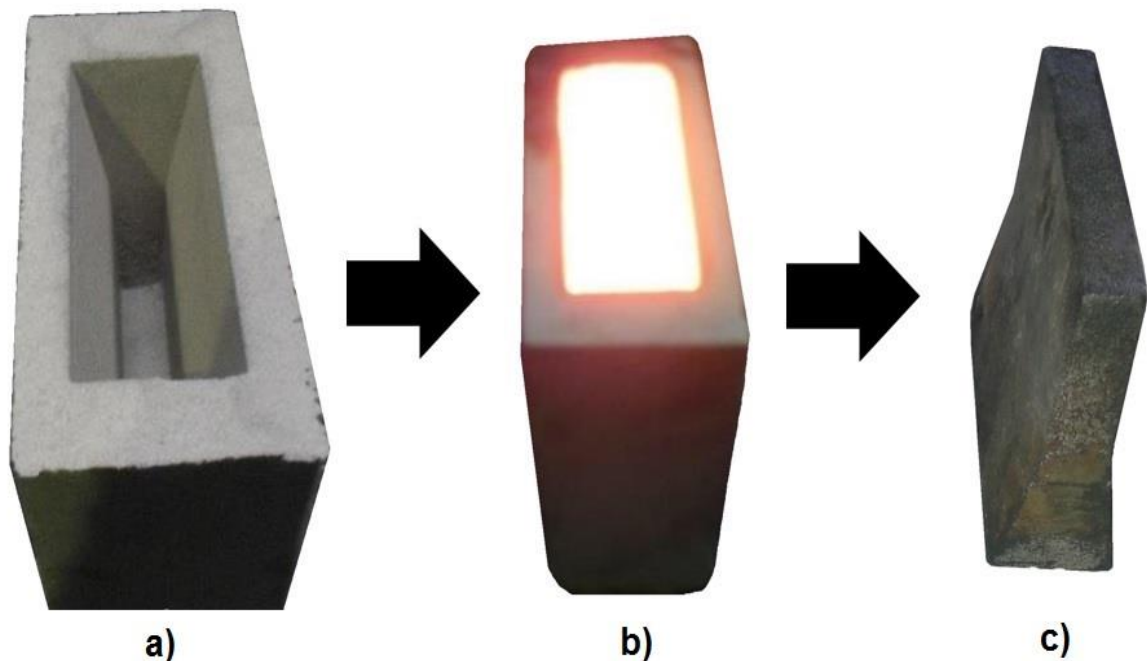
Conforme mencionado anteriormente, um dos objetivos desse trabalho é analisar os ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 ambos vazados em alta e baixa temperatura utilizando como base o padrão de temperatura ideal especificado. Diante disso, os materiais foram vazados com temperatura inferior a 1330°C (baixa temperatura) e temperatura superior a 1410°C (alta temperatura), para determinar as influencias causadas por diferentes temperaturas de vazamento.

3.1.3 Preparação das amostras para os ensaios

Inicialmente, obteve-se dois corpos de prova com ferro fundido nodular GGG40 e dois corpos de prova com ferro fundido nodular GGG50 vazados em alta temperatura, foi adquirido outros dois corpos de prova com GGG40 e dois corpos de prova com GGG50

vazados em baixa temperatura. Assim, obteve-se oito blocos Y para serem preparados. Na Figura 11 pode-se observar o molde em areia branca e o bloco Y confeccionado.

Figura 11 - Molde em areia branca e bloco Y



Fonte: O autor, 2016.

De acordo com a Figura 11, na imagem “a” está representado o molde em areia branca antes do vazamento, a imagem “b” apresenta o molde com o metal líquido já vazado em seu interior, após o metal líquido solidificar e atingir temperatura ambiente pode-se visualizar, conforme imagem “c”, o bloco Y obtido através deste processo.

Depois disso, iniciou-se a preparação para obtenção dos corpos de prova para os ensaios de tração. De modo a agilizar o processo, eles foram enviados a uma empresa do ramo metal-mecânico da cidade de Santa Rosa, com o objetivo de corta-los em uma serra industrial e posterior a isso, serem usinados em um torno mecânico de acordo com o padrão da Figura 24. No período de preparação dos corpos de prova para os ensaios de tração, efetuou-se os processos para obtenção das amostras que serão usadas para o ensaio químico conforme Figura 13. Esse procedimento difere do anterior, porém mais rápido e prático, assim, foi coletado uma amostra do metal líquido característico do ferro fundido nodular GGG40 e uma amostra do metal líquido característico do ferro fundido nodular GGG50 para identificar a composição química, o metal estava com temperatura entre 1450°C e 1500°C. As ferramentas para obtenção desse tipo de amostra pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Ferramentas para obtenção de amostras para análise química



Fonte: O autor, 2016.

Na Figura 12, pode ser visto que é retirado uma amostra de metal líquido com um equipamento próprio e colocado em uma coquilha refrigerada a água, após o material ter resfriado, a amostra é retirada da coquilha para ser preparada e analisada.

As amostras são lixadas em uma retífica para que estejam limpas e lisas, se tornando assim, os corpos de prova responsáveis pelos procedimentos de ensaio químico. Esse acabamento final foi dado com o objetivo de obter uma análise adequada sem desencontro de resultados. Na Figura 13 é possível observar o corpo de prova pronto para o ensaio químico.

Figura 13 - Corpo de prova pronto para o ensaio químico



Fonte: O autor, 2016.

Os corpos de prova que apresentam falhas visíveis ou trincas na superfície lixada devem ser desprezados, sendo solicitada uma nova amostra para os forneiros. Nesse caso não

foi necessário solicitar uma nova amostra pois as características finais dos corpos de prova estavam adequadas. Desta forma, é analisado imediatamente após o lixamento para evitar contaminação com poeira, fuligem e outras substâncias presentes no ambiente de trabalho e, que podem entrar em contato com a superfície a ser analisada.

Concluídos os preparos dos corpos de prova para o ensaio químico, voltou-se o foco para os corpos de prova pertencentes aos ensaios de tração. Para obter um maior número de corpos de prova optou-se em cortar três partes de cada bloco Y. Na Figura 14 pode-se observar como foram cortadas as amostras para obtenção dos corpos de prova.

Figura 14 - Três amostras obtidas através de um bloco Y



Fonte: O autor, 2016.

Como foi vazado oito blocos Y, seria possível obter 24 amostras, mas foi separado 04 delas com o objetivo de serem usadas na confecção dos corpos de prova que atuam nos ensaios metalográficos. Para melhor esclarecimento, foi separado 02 amostras de cada material e cada uma delas proveniente de vazamento em temperaturas diferentes, ou seja, uma foi vazada em alta temperatura e outra em baixa temperatura. Todas as amostras, inclusive as destinadas aos ensaios metalográficos, foram enumeradas para obter maior controle no momento das análises. Conforme Figura 15, se tem ideia do método de identificação usado.

Figura 15 - Identificação das amostras



Fonte: O autor, 2016.

Desse modo, lembrando que foi vazado dois blocos Y em baixa temperatura e dois em alta temperatura para cada material, a identificação ocorreu da seguinte forma: para cada dois blocos Y que passou pelo processo de corte (pertencendo a uma mesma temperatura de vazamento e material), juntou-se as amostras e em seguida enumeradas de 01 a 06, ou seja, as amostras 01, 02 e 03 pertencem a um bloco e as amostras 04, 05 e 06 pertencem a outro bloco, todos os números estão na sequência de corte conforme mostrado anteriormente na Figura 14.

Depois de cortar, separar e enumerar, todas as amostras foram encaminhadas para um torno mecânico junto a um desenho padrão, visto na Figura 24, de modo a efetuar o processo de usinagem para obter as dimensões e acabamentos finais. Na Figura 16 pode-se observar a aparência final que deu origem aos corpos de prova utilizados para os ensaios de tração.

Figura 16 - Aparência do corpo de prova pronto para ensaio de tração



Fonte: O autor, 2016.

Depois de finalizados os preparativos dos corpos de prova para os ensaios de tração, prosseguiu-se com a preparação das amostras para obtenção dos corpos de prova referentes aos ensaios de metalografia. Dando início aos preparativos para esse ensaio, apenas uma pequena parte de cada amostra foi aproveitada para a obtenção dos corpos de prova metalográfico. Na Figura 17 é possível identificar a região aproveitada e a região descartada para os testes.

Figura 17 - Região aproveitada para os testes metalográficos circulado em vermelho



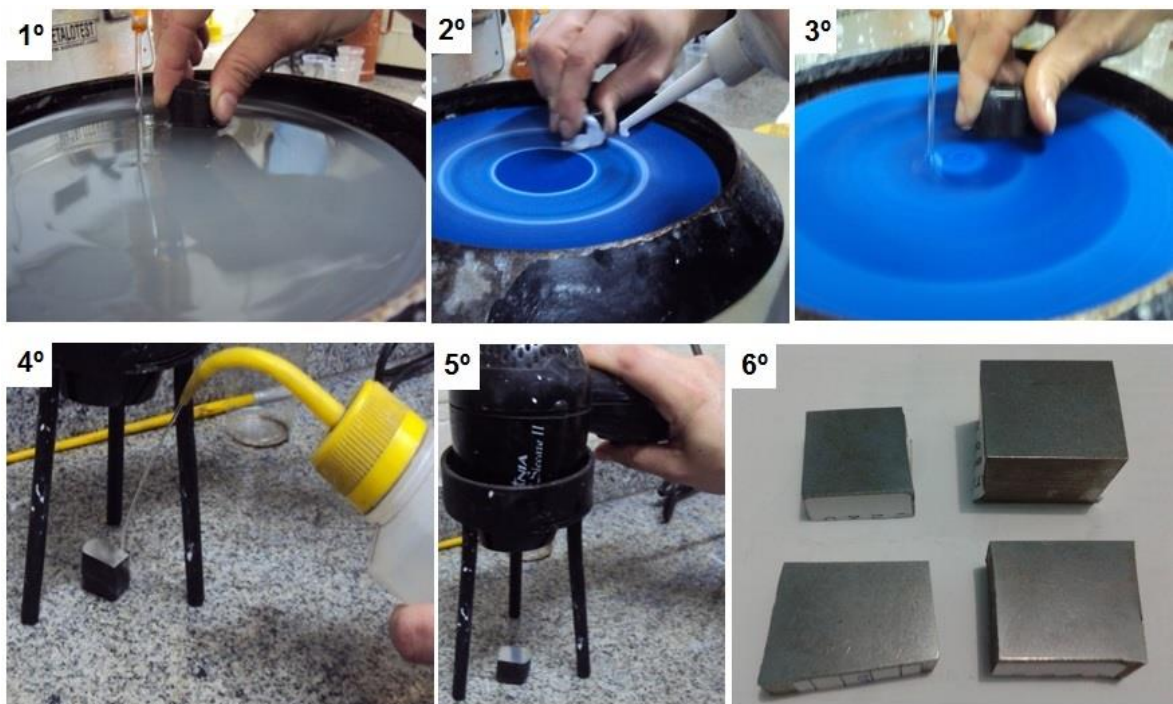
Fonte: O autor, 2016.

A amostra foi cortada e depois prosseguiu-se com o processo de lixamento que foi executado em cinco etapas, cada etapa aconteceu com uma lixa de granulometria diferente, foi usada respectivamente, lixa n° 220, 400, 600, 1000, 1200 e, conforme descrito abaixo:

- Lixa n° 220 usada para tirar a marca do corte na metalografia;
- Lixa n° 400 usada para tirar as marcas da lixa anterior;
- Lixa n° 600 é um pouco mais fina, também usada para tirar os riscos da lixa anterior;
- Lixa n° 1000 usada para remover os resquícios de riscos e necessitou de pouco tempo de lixamento;
- Lixa n° 1200 usada para dar o acabamento final na etapa de lixamento.

Depois da amostra lixada ela foi polida com pano de polimento. Colocou-se alumina 1,00 micron, fazendo movimentos horários e anti-horários com a amostra. Pronto essa etapa, a amostra seguiu para polimento em água e posteriormente passou por um banho em álcool. A fim de remover qualquer umidade em sua superfície, a amostra passou por um secador. Na Figura 18, é possível visualizar todo o processo de preparação das amostras para obtenção dos corpos de prova usados como objeto de análise microscópica.

Figura 18 - Ilustração do processo de obtenção dos corpos de prova metalográficos para as análises no microscópico



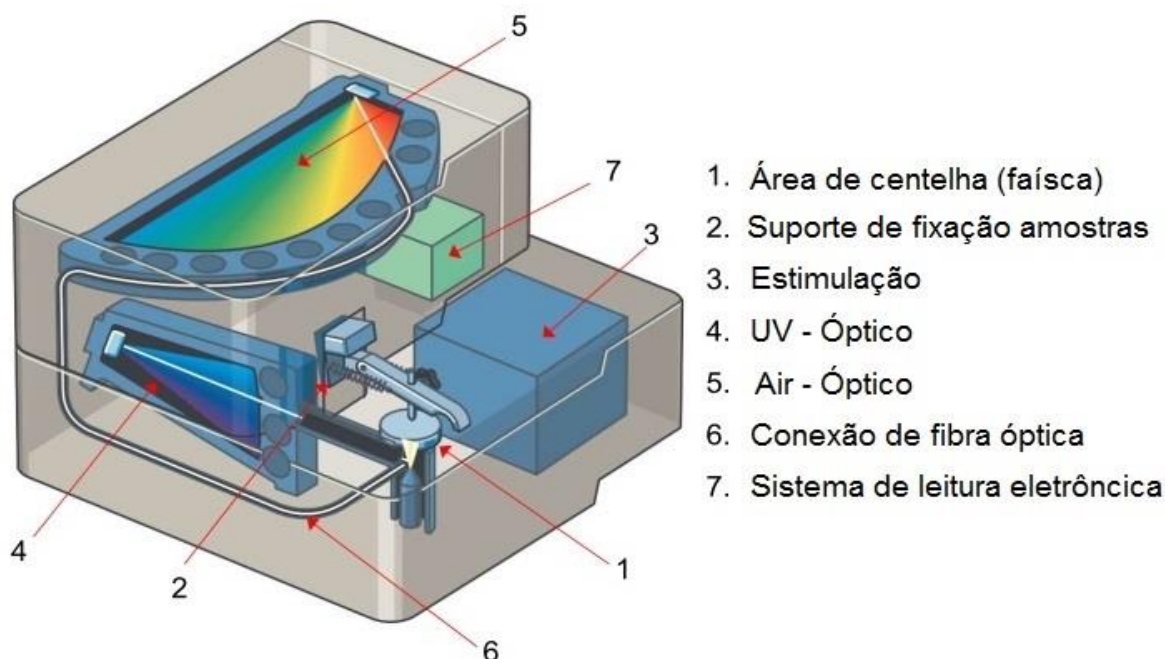
Fonte: O autor, 2016.

Conforme Figura 18, na 1º etapa pode-se visualizar o processo de lixamento, na 2º etapa o processo de polimento com alumina 1,00 micron, depois na 3º etapa o processo de polimento com água, na 4º etapa o banho em álcool e para finalizar os processos, a 5º etapa com o secador agindo na superfície da amostra. Na 6º etapa é possível visualizar o aspecto final dos corpos de prova prontos.

3.1.4 Ensaio Químico

Para a determinação da composição química encontrada nos corpos de prova foi utilizado um espectrômetro de emissão óptica, onde as amostras foram lixadas em lixadeira de fita de modo a garantir uma superfície isenta de impurezas e suficientemente plana de modo a posicionar corretamente dentro da câmara de queima do aparelho, conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Desenho esquemático para ensaio com espectrômetro



Fonte: O autor, 2016.

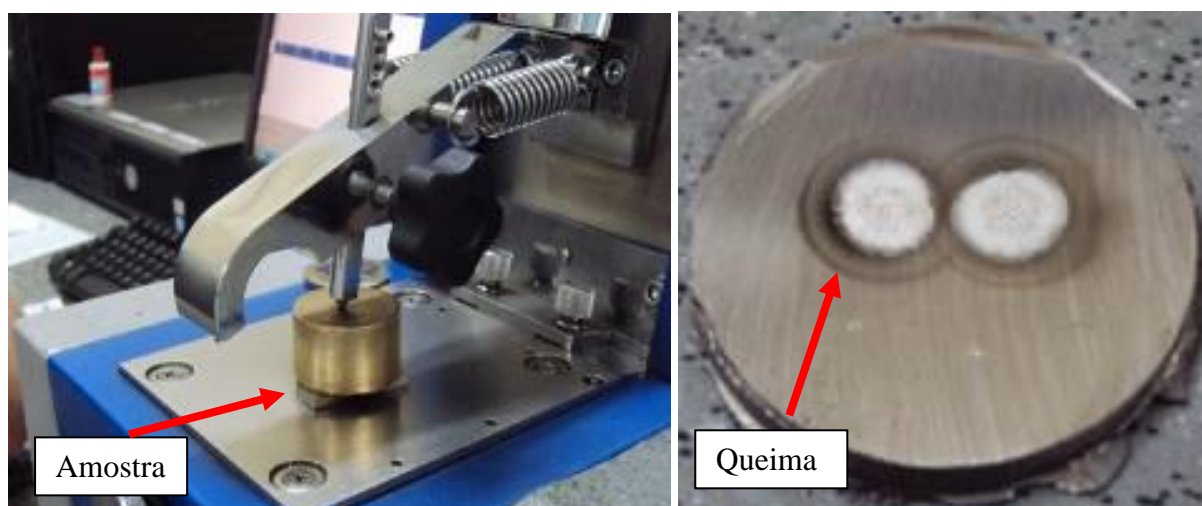
A mesa do equipamento, situada na área de centelha e que serve de base para a amostra, possui um orifício onde fica posicionado abaixo dele o eletrodo. O eletrodo foi escovado para limpeza de resíduos que possam interferir nas análises de elementos químicos.

Após a limpeza as amostras foram posicionadas de modo a cobrir completamente o orifício da mesa e com o suporte de fixação a amostra foi presa pressionando-a contra a mesa.

Para iniciar o processo, verificou-se na máquina todos os pontos de fixação e regulagem adequadamente de modo a realizar um trabalho seguro, a amostra com a superfície a ser analisada foi presa contra a mesa cobrindo completamente o orifício da mesma.

Ao realizar a análise, é bom salientar que deve ser efetuada duas a três queimas respeitando a repetibilidade dos resultados das queimas no corpo de prova. Pode-se verificar na Figura 20 como se comportou um dos corpos de prova depois do ensaio.

Figura 20 - Aparência de um dos corpos de prova após o ensaio químico



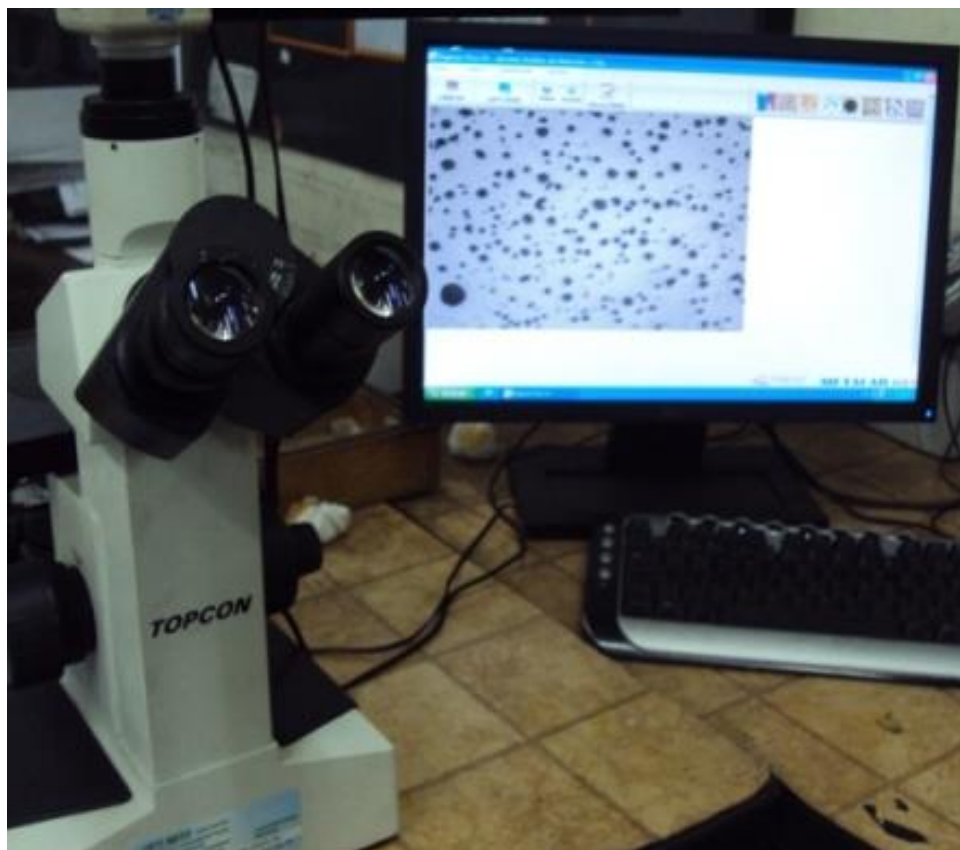
Fonte: O autor, 2016.

Retirou-se as amostras durante o processo de vazamento dos moldes onde já ocorreu a inoculação e nodularização do metal, para serem avaliadas as conformidades através da composição final da peça, feito isso, imprimiu-se o relatório com os resultados.

3.1.5 Ensaio Metalográfico

Obteve-se as imagens metalográficas por meio de um microscópio óptico com ampliação padrão de 100X e o auxílio do *software* computacional *Working Advanced Light* para a análise das imagens capturadas pelo microscópio. Na Figura 21, pode-se ter uma ideia visual do microscópio e o *software* computacional usado para a obtenção das imagens.

Figura 21 – Microscópio óptico utilizado para obtenção das imagens metalográficas



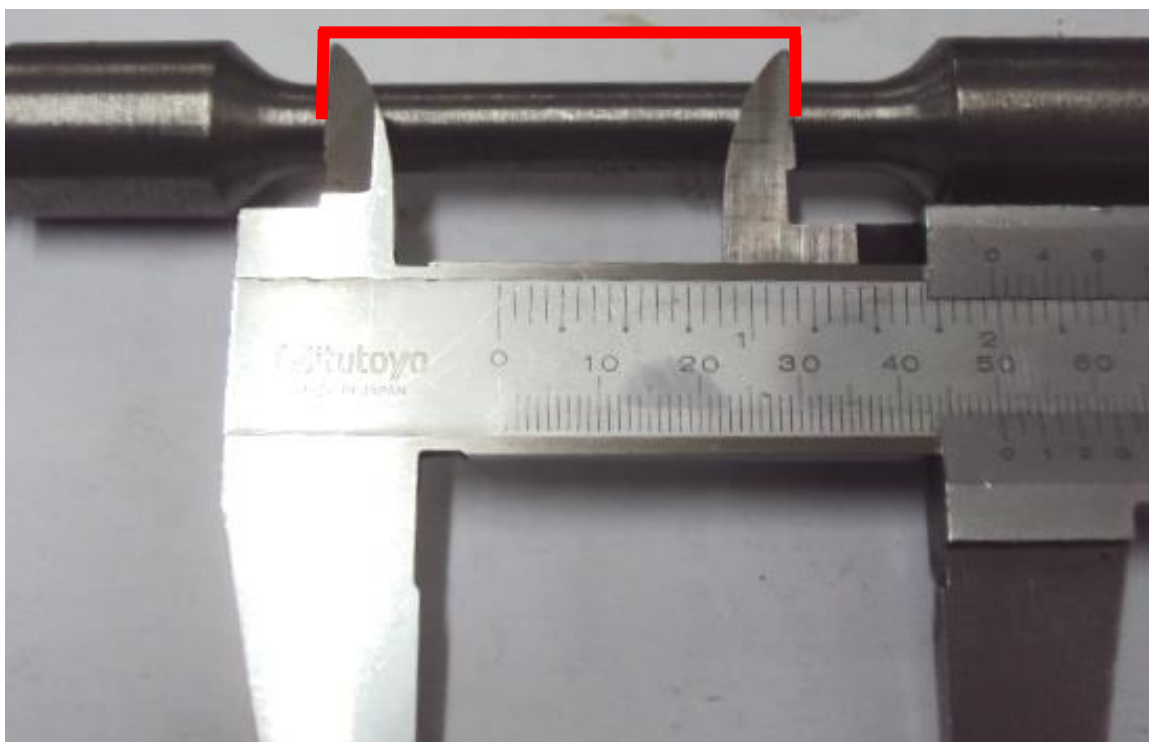
Fonte: O autor, 2016.

De acordo com a Figura 21, primeiramente foi realizado análises nos corpos de prova sem ataque químico, com o objetivo de efetuar a caracterização dos nódulos de grafita. Depois foi realizado as análises com ataque químico através da adição de nital (2%) para observar as proporções dos constituintes, suas dimensões, sua distribuição, estruturas anormais e elementos estranhos das fases presentes. O processo de preparo das amostras com ataque químico ocorre da seguinte forma: inicialmente o reagente químico (nital 2%) é depositado em um recipiente de vidro, a superfície polida do corpo de prova é mergulhada para que entre em contato com o reagente. O nital age durante 25 segundos e com 30 segundos (tempo necessário para que ocorra a revelação da microestrutura do material em análise) o corpo de prova é retirado, e em seguida lavado em água corrente. Com isso o aspecto brilhante desaparece, deixando a superfície do corpo de prova fosca. Depois o material é secado e levado para visualização no microscópio. Por fim, emite-se um relatório dos ensaios para análise dos resultados.

3.1.6 Ensaio de Tração

Inicialmente a máquina de ensaios para o teste de tração é ligada e regulada, conforme norma ASTM A536, antes de colocar o corpo de prova na máquina, o mesmo é marcado com a medida de 50 mm entre dois pontos que servirão de parâmetro para análise de deformação do material após efetuar ensaio de tração. Na Figura 22 pode ser visualizado com maior clareza esse procedimento.

Figura 22 – Determinação da distância entre dois pontos para análise de deformação



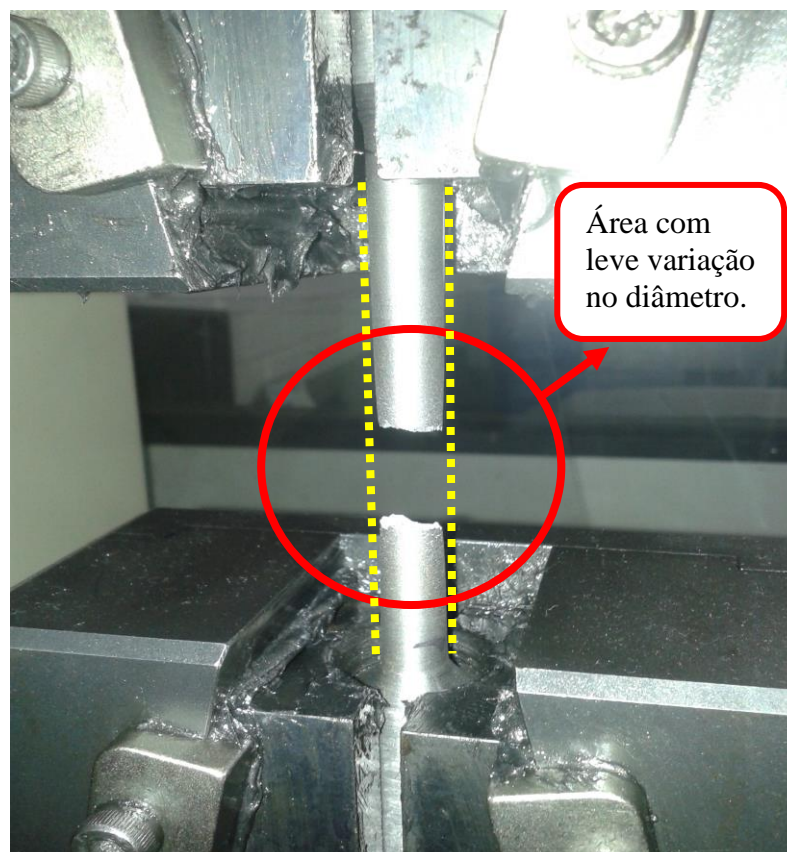
Fonte: O autor, 2016.

Logo depois, o corpo de prova foi posicionado corretamente na máquina. Os dados do mesmo foi anotado no *software Tesc* instalado no computador de mesa que fica logo ao lado da máquina de ensaio, esse *software* está vinculado à máquina de ensaio de tração e através dele foi obtido os relatórios para as análises. Conforme apêndice A, pode-se observar o corpo de prova e a interface do *software Tesc*.

Antes da realização de cada ensaio mede-se o diâmetro menor do corpo de prova para conferir a dimensão da área que sofrerá o alongamento e ruptura, feito isso, o valor do diâmetro verificado foi adicionado ao banco de dados do *software*.

Após a realização de cada ensaio mediu-se novamente o diâmetro próximo a área onde o material se rompeu e o valor conferido também foi adicionado ao banco de dados do *software* com o propósito de contribuir para a formulação do relatório final dos corpos de prova ensaiados. Na Figura 23 é possível visualizar a aparência do corpo de prova após o ensaio.

Figura 23 – Aparência do corpo de prova após o ensaio de tração



Fonte: O autor, 2016.

Conforme Figura 23, pode-se observar claramente a área onde ocorreu a ruptura e uma leve variação do diâmetro próximo a essa área. Depois disso, encaminhou-se os relatórios obtidos através dessas análises para posterior análise dos resultados.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Realizou-se alguns processos em um empresa do ramo metal-mecânico da cidade de Santa Rosa - RS. Os materiais e equipamentos utilizados seguiu da seguinte forma: para o corte dos corpos de prova foi utilizado a máquina Serra de Fita Horizontal da marca

FRANHO modelo FM-500A, para o torneamento foi utilizado um Torno Convencional da marca NARDINI NODUS modelo ND 250. Depois disso, todas as etapas de procedimentos experimentais, bem como a coleta de dados, realizaram-se na empresa Metalúrgica Candeia, a qual disponibilizou toda a estrutura e recursos necessários para a realização deste trabalho. Os principais equipamentos utilizados na empresa de fundição e que devem ser mencionados, são os usados para os testes práticos e que pertencem ao laboratório da empresa. Entre eles estão:

- Retífica, que serviu de preparação para as amostras do ensaio químico;
- Espectrômetro ICP, modelo SPECTROMAXx, da AMETEK, que foi utilizado para os ensaios químicos;
- Politriz metalográfica da marca SOLOTEST, que foi utilizada para o lixamento e polimento das amostras;
- Secador de cabelo doméstico para remoção de umidade nas amostras;
- Microscópio da marca TOPCON, que realizou a análise da estrutura metalográfica das amostras e;
- Máquina Universal de ensaio, marca EMIC e modelo DL – 30000, que foi usada para os ensaios de tração.

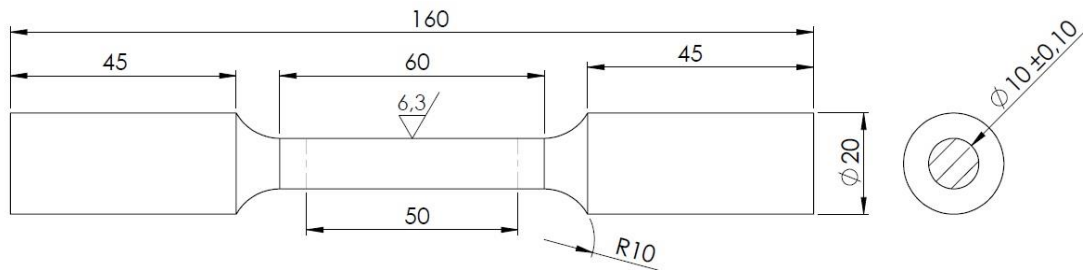
Para os ensaios de tração, o *software Tesc* arrecadou e estruturou as informações de cada ensaio em forma de relatório. Na metalografia, a realização das análises ocorreu com o auxílio do *software Working Advanced Light*. Para os procedimentos de medição utilizou-se um paquímetro analógico.

3.3 DESCRIÇÃO DA AMOSTRA

Os ensaios prosseguiram conforme norma ASTM A536. Para o ensaio químico foi separado duas amostras, ou seja, uma amostra de ferro fundido GGG40 e outra amostra de ferro fundido GGG50. Elas são representativas por ser a análise final da carga já corrigida pelos teores de elementos químicos. Apresenta-se na forma tipo pastilha coquilhada de diâmetro 30 mm e espessura 5 mm, Figura 13.

No processo de obtenção dos corpos de prova referentes ao ensaio de tração, necessitou-se de um desenho técnico com o objetivo de obter as dimensões desejadas para atender, conforme mencionado na revisão bibliográfica, ao padrão da máquina de testes e as normas aplicadas a esse tipo de ensaio. Conforme Figura 24, é possível verificar as dimensões usadas na preparação das amostras para o ensaio.

Figura 24 – Dimensões do corpo de prova padrão para ensaio de tração

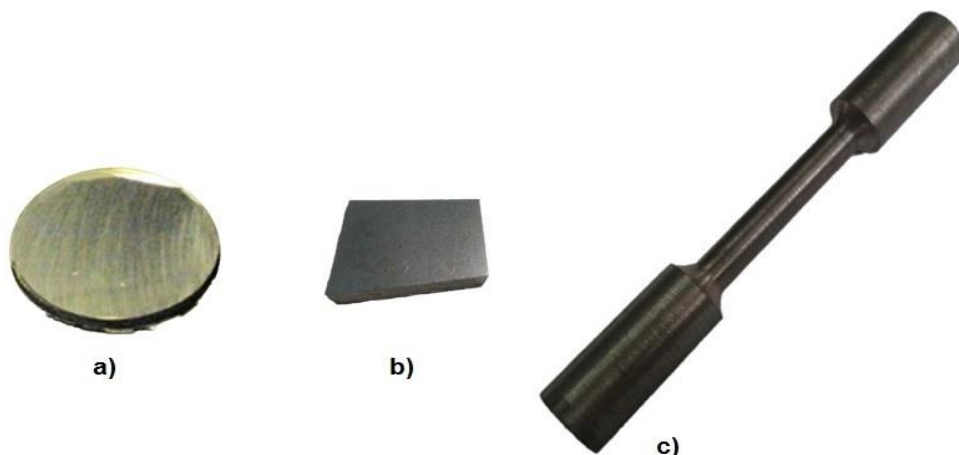


Fonte: O autor, 2016.

É importante observar que, de acordo com a Figura 24, o diâmetro de 20mm teve que ser revisto pois todos os corpos de provas não encaixaram nos orifícios de fixação da máquina de ensaio de tração. Assim, os corpos de prova foram usinados novamente, onde as áreas com diâmetro de 20mm passaram a apresentar diâmetro de 19mm.

Nos ensaios de metalografia, as amostras foram obtidas através dos materiais que foram rejeitados na seleção dos corpos de provas para o ensaio de tração. Para se ter uma ideia geral das amostras que foram utilizadas como base de testes, na Figura 25 pode-se verificar os três tipos diferentes de corpos de prova apresentados neste trabalho.

Figura 25 – Corpos de prova utilizados para realizar os ensaios



Fonte: O autor, 2016.

Conforme Figura 25, a imagem da letra “a” refere-se a pastilha coquilhada que serviu de corpo de prova para o ensaio químico. Já na imagem da letra “b” esta apresentado o corpo de prova que foi utilizado para os ensaios metalográficos e por último, na letra “c” é possível visualizar o corpo de prova padrão para os ensaios de tração.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados são organizados em relação aos dois tipos de materiais vazados em alta temperatura e baixa temperatura, onde as análises da composição química, da microestrutura e das propriedades mecânicas são apresentadas.

4.1 ENSAIO QUÍMICO

O ensaio químico conforme descrito na metodologia deste trabalho foi executado sob uma amostra de ferro fundido nodular da classe GGG40 e uma amostra de ferro fundido nodular da classe GGG50, ambas vazadas em um mesmo grau de temperatura. Não é necessário analisar a composição química com o material vazado em temperaturas diferentes na mesma classe, pois ela permanece constante em relação as variações de temperatura. Na Tabela 4 é possível verificar a composição química encontrada para o ferro fundido nodular GGG40.

Tabela 4 – Composição química encontrada para o ferro fundido nodular GGG40

Composição Química Encontrada (%)									
C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Mg	Cr	Ni
3,68	2,97	0,408	0,031	0,0072	0,072	0,0078	0,048	0,034	0,011

Fonte: O autor, 2016.

Conforme a Tabela 4, é possível ver a composição química encontrada para o ferro fundido nodular GGG40 em porcentagem. Comparando os resultados encontrados com o padrão especificado para o ferro fundido nodular GGG40 na Tabela 1, percebe-se que os componentes (Si) e (Mn) estão com percentual um pouco acima do especificado, mas como há uma diferença mínima, não acarretará problemas que possam alterar a composição química do material. O restante dos componentes não apresentaram variações.

Utilizando os mesmos critérios de análise para o ferro fundido nodular GGG50, pode-se observar na Tabela 5 os resultados encontrados.

Tabela 5 – Composição química encontrada para o ferro fundido nodular GGG50

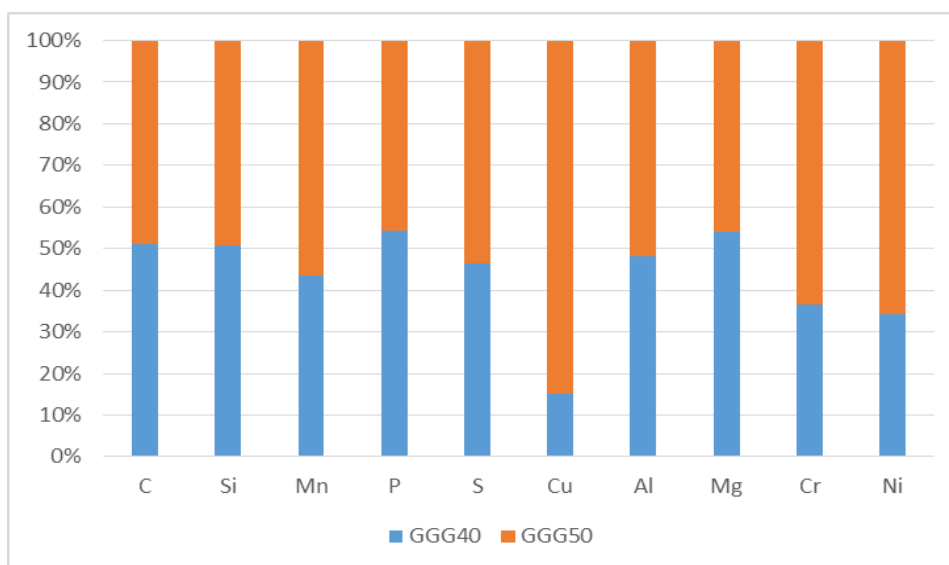
Composição Química Encontrada (%)									
C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Mg	Cr	Ni
3,52	2,87	0,53	0,026	0,0083	0,404	0,0084	0,041	0,059	0,021

Fonte: O autor, 2016.

De acordo com a Tabela 5, os resultados encontrados, comparados ao padrão especificado para o ferro fundido nodular GGG50 na Tabela 1, também apresenta nos componentes (Si) e (Mn), percentuais acima dos limites especificados, mas como há uma diferença mínima, não acarretará problemas que possam alterar a composição química do material. O restante dos componentes não apresentaram desvio nos limites do padrão especificado.

A fim de comparar os resultados encontrados entre o ferros fundidos nodular GGG40 e GGG50, foi elaborado um gráfico para melhor entendimento dos dados expostos. O gráfico pode ser observado conforme Figura 26.

Figura 26 - Gráfico comparativo entre os materiais GGG40 e GGG50, conforme os dados apresentados nas Tabelas 4 e 5



Fonte: O autor, 2016.

De acordo com a Figura 26, o gráfico demonstra superioridade percentual dos componentes Manganês (Mn), Enxofre (S), Cobre (Cu), Cromo (Cr) e Níquel (Ni) presentes na composição do ferro fundido nodular GGG50 comparado ao ferro fundido nodular GGG40. A maior diferença é visivelmente percebida no percentual de Cobre (Cu) entre os dois tipos de materiais, comparado ao GGG50 o ferro fundido nodular GGG40 possui aproximadamente 85% de Cobre (Cu) a menos em sua composição química.

Por outro lado, os componentes Fósforo (P) e Magnésio (Mg) presentes no ferro fundido nodular GGG40 tem percentual superior. Alguns componentes como o Carbono (C), Silício (Si) e Alumínio (Al) não apresentam grande diferença de percentual.

4.2 ENSAIO METALOGRAFICO

4.2.1 Análise metalográfica dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 no estado quimicamente não atacado.

A análise das amostras metalograficamente preparadas, no estado quimicamente não atacado, permitiu a observação e a caracterização dos nódulos de grafita para os ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 vazados em temperaturas diferentes após os tratamentos de nodularização e inoculação. Para cada uma das quatro amostras foram capturadas microscopicamente duas imagens em regiões diferentes de sua superfície com ampliação de 100X. O resultado pode ser visto no apêndice B.

Conforme apêndice B, os nódulos se distribuem de modo homogêneo por toda a extensão das amostras. As amostras apresentam em sua maioria nódulos regulares de grafita, do tipo VI conforme demonstrado na Figura 5. As imagens “a” e “b” correspondem ao ferro fundido nodular GGG40 vazado em baixa temperatura, já as imagens “c” e “d” correspondem ao ferro fundido nodular GGG40 vazado em alta temperatura. As imagens “e” e “f” pertencem ao ferro fundido nodular GGG50 vazado em baixa temperatura, por último as imagens “g” e “h” que pertencem ao ferro fundido nodular GGG50 vazado em alta temperatura.

4.2.1.1 Análise quantitativa da grafita nodular

A quantificação dos nódulos de grafita foi realizada por meio da contagem e determinação da quantidade de nódulos por mm². Na Tabela 6 é possível verificar os dados obtidos para cada imagem analisada no apêndice B.

Tabela 6 – Contagem e determinação da quantidade de nódulos por mm²

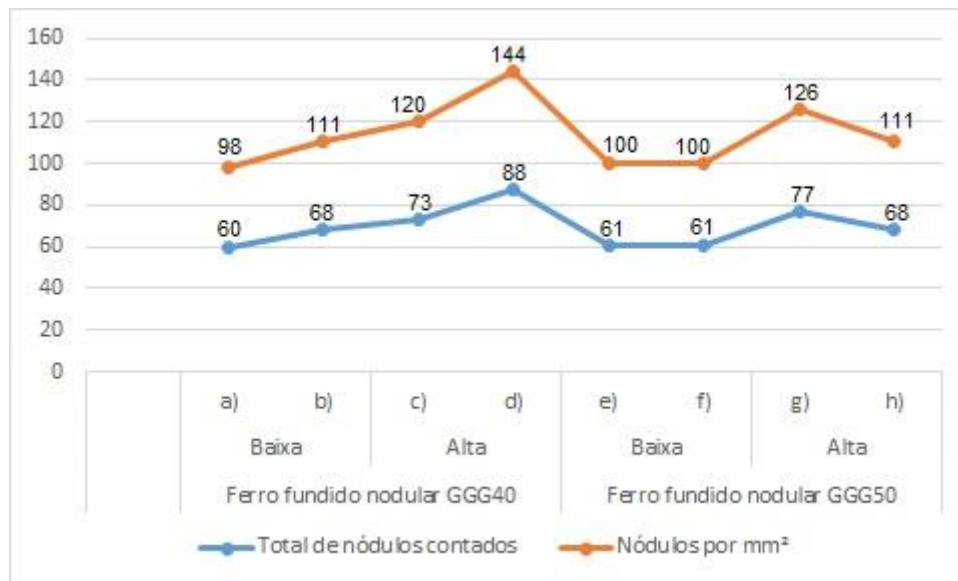
Material	Característica da temperatura de vazamento	Imagem	Total de nódulos contados	Nódulos por mm ²
Ferro fundido nodular GGG40	Baixa	a)	60	98
		b)	68	111
	Alta	c)	73	120
		d)	88	144
Ferro fundido nodular GGG50	Baixa	e)	61	100
		f)	61	100
	Alta	g)	77	126
		h)	68	111

Fonte: O autor, 2016.

De acordo com as informações apresentadas na Tabela 6, observa-se que em ambos os materiais existe uma superioridade numérica de nódulos por mm^2 presentes na composição das amostras que foram vazadas em alta temperatura.

Para demonstrar de forma mais claras os dados expressos pela Tabela 6, na Figura 27 é possível observar graficamente os dados encontrados.

Figura 27 – Demonstração gráfica conforme dados obtidos pela Tabela 6



Fonte: O autor, 2016.

Conforme a Figura 27, é possível verificar a variação de nódulos por mm^2 em ambos os materiais analisados. Isso prova que materiais vazados com temperaturas baixas apresentam menor número de nódulos por mm^2 em sua estrutura, isso pode limitar o campo de aplicações para o qual esses materiais foram designados.

4.2.2 Análise metalográfica dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 no estado quimicamente atacado.

A análise metalográfica das amostras em estado quimicamente atacado com nital (2%) permitiu realizar as avaliações qualitativa e quantitativa das fases presentes, bem como melhor avaliar a distribuição dos nódulos de grafita e outras fases presentes.

Através de imagens microscópicas com aumento de 100X, observa-se que as ligas possuem matriz predominantemente ferrítica, com nódulos de grafita distribuídos homogeneamente por sua extensão, além de regiões escuras de perlita. Os nódulos grafiticos são cercados por grãos de ferrita, formando regiões contínuas. A perlita se apresenta entre

grãos de ferrita, revelando a matriz ferrítica-perlítica, conforme demonstrado no apêndice C, para os diferentes materiais ambos vazados em alta e baixa temperatura.

O material e a característica da temperatura de vazamento correspondente para cada imagem do apêndice C seguem a mesma sequência conforme mencionado no apêndice B. As letras que foram destacadas como forma de identificação podem ser definidas como: nódulo de grafita (N), ferrita (F) e perlita (P).

Ao comparar as imagens dos dois materiais, percebe-se que a classe GGG50 apresenta menor abrangência da matriz ferrita em sua composição, em contrapartida, a matriz perlita se apresenta em nível superior, comparação visual entre GGG40 e GGG50. Para confirmar as hipóteses levantadas, no próximo tópico será apresentado a análise quantitativa das duas classes estudadas.

4.2.2.1 Análise quantitativa dos microconstituintes presentes nos ferros fundido nodulares GGG40 e GGG50 no estado quimicamente atacado.

A análise quantitativa dos microconstituintes presentes comprovou a predominância da matriz ferrita no ferro fundido nodular GGG40 vazado em baixa temperatura, ainda no mesmo material mas com vazamento em alta temperatura o percentual da matriz perlita possui considerável aproximação em relação a matriz ferrita, contudo, o percentual da matriz ferrita ainda permanece superior aos demais valores encontrados. Os resultados encontrados para o ferro fundido nodular GGG50 comprovou a predominância da matriz perlita para ambas as temperaturas de vazamento. O percentual da matriz grafita manteve-se constante em todos os casos analisados. O resultado da avaliação quantitativa dos microconstituintes presentes está demonstrado na Tabela 7.

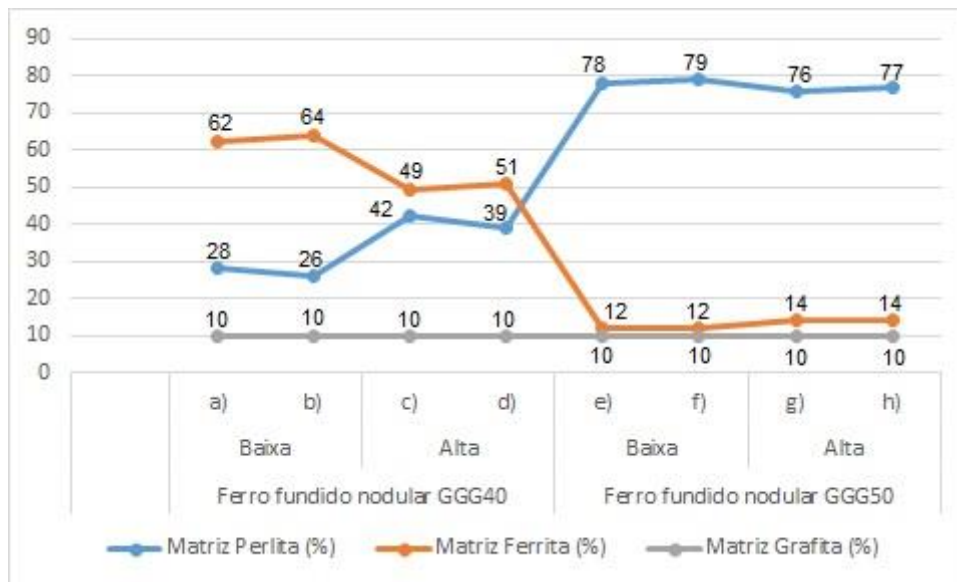
Tabela 7 – Avaliação quantitativa dos microconstituintes presentes

Material	Característica da temperatura de vazamento	Imagem	Matriz Perlita (%)	Matriz Ferrita (%)	Matriz Grafita (%)
Ferro fundido nodular GGG40	Baixa	a)	28	62	10
		b)	26	64	10
	Alta	c)	42	49	10
		d)	39	51	10
Ferro fundido nodular GGG50	Baixa	e)	78	12	10
		f)	79	12	10
	Alta	g)	76	14	10
		h)	77	14	10

Fonte: O autor, 2016.

Conforme a Tabela 7, a quantificação foi feita com micrografias em aumento de 100X. Percebe-se que para o ferro fundido nodular GGG40 o índice de ferrita em sua composição é mais abrangente em relação aos demais, já para o ferro fundido nodular GGG50 o microconstituente com maior abrangência apresenta-se como perlita. A Figura 28 apresenta graficamente a variação percentual dos microconstituintes em função do tipo de material e da temperatura de vazamento.

Figura 28 - Variação do percentual de microconstituintes presentes, como ferrita, grafita e perlita, em função do tipo de material e da temperatura de vazamento



Fonte: O autor, 2016.

Através dos dados apresentados pela Figura 28, pode-se perceber as diferenças peculiares em relação aos microconstituintes de ambos os materiais. Essas diferenças possuem relativa influência que ajudam a definir, em parte, as aplicações para cada material.

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Por meio dos ensaios de tração foi possível avaliar as propriedades mecânicas das amostras, tendo como foco principal os valores para tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento. Inicialmente foram preparadas 20 amostras (quantidade suficiente para se obter maior número de variáveis), mas duas delas apresentaram porosidades, ou seja, imperfeições pela falta de material. Na Figura 29 está apresentado a comparação entre um corpo de prova em condições de ensaio e outro com imperfeições e sem condições de efetuar ensaio.

Figura 29 - Comparativo entre um corpo de prova sem falha e outro apresentando imperfeições



Fonte: O autor, 2016.

Conforme Figura 29, é inviável usar corpos de prova com esse grau de imperfeição nos testes, pois os resultados seriam nulos e o material se romperia imediatamente. Os dois corpos de prova que apresentaram esse sintoma foram as amostras de número 03, referente ao material ferro fundido nodular GGG40 vazado em alta temperatura e, de número 06, pertencente ao material ferro fundido nodular GGG50 também vazado em alta temperatura. Ambas as amostras foram removidas da parte superior do bloco Y respectivos a cada uma delas, como a parte superior desse tipo de corpo de prova serve como alimentação para a área inferior, o risco das amostras, que foram obtidas próximas ao canal de alimentação, de apresentarem imperfeições era previsto.

Contudo, os valores referentes aos ensaios de tração foram obtidos por meio de 18 corpos de prova. Foi realizado um relatório para cada conjunto de amostras obtidas através dos blocos Y, ou seja, foram gerados oito relatórios. Os dois blocos Y obtidos para cada temperatura de vazamento, dentro dos materiais analisados, foram denominados “Y-01” e “Y-02”. Nas Tabelas 8 á 15 é possível verificar os resultados obtidos e nas Figuras 30 á 37 os gráficos de tensão x deformação.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG40 vazado em baixa temperatura obtidas através do corpo de prova “Y-01”

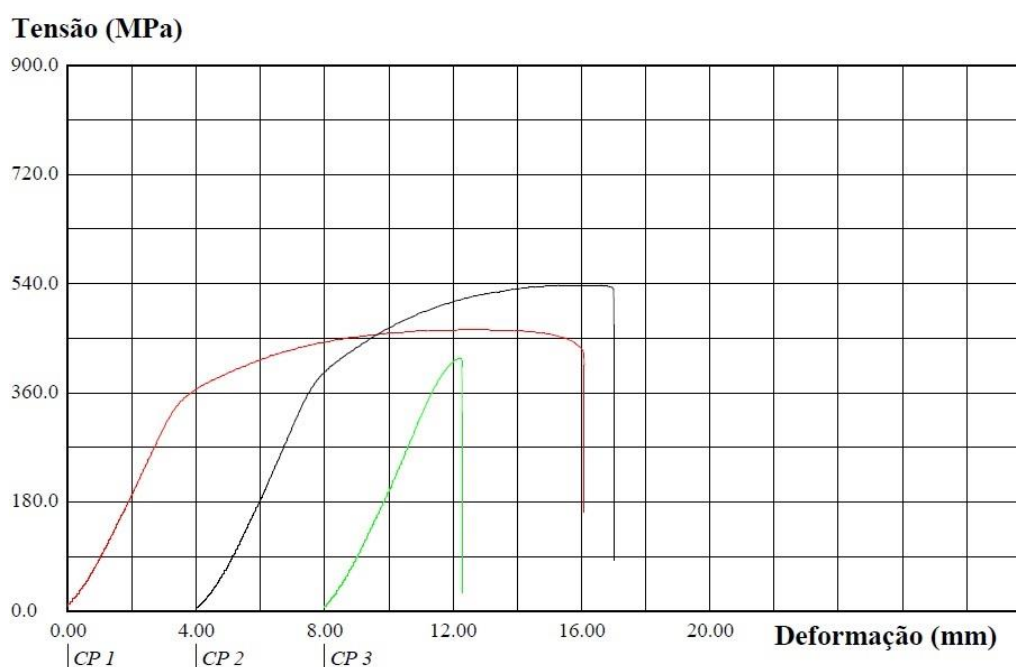
Corpo de Prova	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Estricção (%)
CP 1	78,54	36495,6	464,68	26897,7	342,47	22,2	24,31
CP 2	78,54	42316,7	538,79	29879,27	380,43	14	15,36
CP 3	78,54	32849,8	418,26	32084,45	408,51	2,4	1,99

Fonte: Software Tesc, 2016.

Com os dados apresentados pela Tabela 8, foi possível comparar os resultados com o valores padronizados pela norma, visto na Tabela 2. De acordo com isso, os valores da tensão máxima e do alongamento encontrados para CP3 são inferiores ao mínimo estipulado. Os valores encontrados para CP1 e CP2 se apresentaram dentro do especificado.

Na Figura 30, com as informações da Tabela 8 pôde-se gerar o gráfico de tensão x deformação, apresentando as curvas características para cada material ensaiado.

Figura 30 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 8



Fonte: Software Tesc, 2016.

Conforme Figura 30, é possível visualizar o rompimento prematuro do CP3, pois não obteve um alongamento expressivo. A tensão de escoamento para o mesmo se manteve dentro dos padrões.

Prosseguindo com os procedimentos experimentais, a Tabela 9 traz os dados que foram obtidos através do corpo de prova “Y-02” referente ao GGG40 vazado em baixa temperatura.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG40 vazado em baixa temperatura obtidas através do corpo de prova “Y-02”

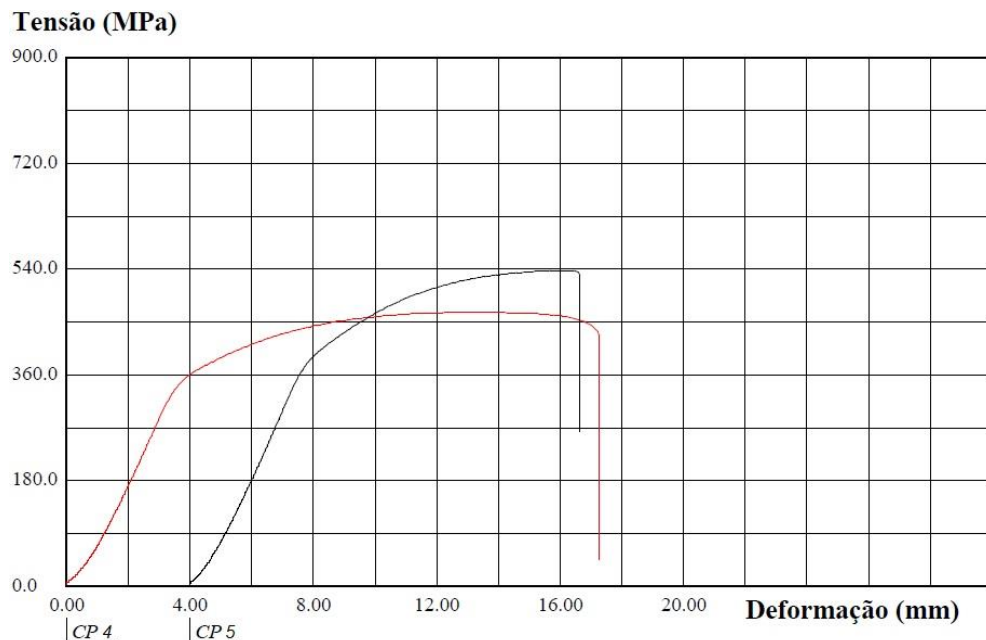
Corpo de Prova	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Estricção (%)
CP 4	78,54	36713,48	467,45	26860,27	342,00	24,40	24,31
CP 5	78,54	42248,58	537,93	29779,62	379,17	14,40	13,51

Fonte: Software Tesc, 2016.

Na Tabela 9, comparando os valores obtidos com os apresentados pela Tabela 2, os dados obtidos para CP4 e CP5 não apresentaram variações inferiores ao mínimo estipulado.

Através da Figura 31, é possível visualizar o gráfico de tensão x deformação formado com base nos valores apresentados na Tabela 9.

Figura 31 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 9



Fonte: Software Tesc, 2016.

Conforme Figura 31, as curvas de tensão x deformação se apresentaram de forma coerente ao comportamento de um material em boas condições.

A Tabela 10 apresenta os dados que foram adquiridos, através do ensaio de tração aplicado ao corpo de prova “Y-01”, referente ao GGG40 vazado em alta temperatura.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG40 vazado em alta temperatura obtidas através do corpo de prova “Y-01”

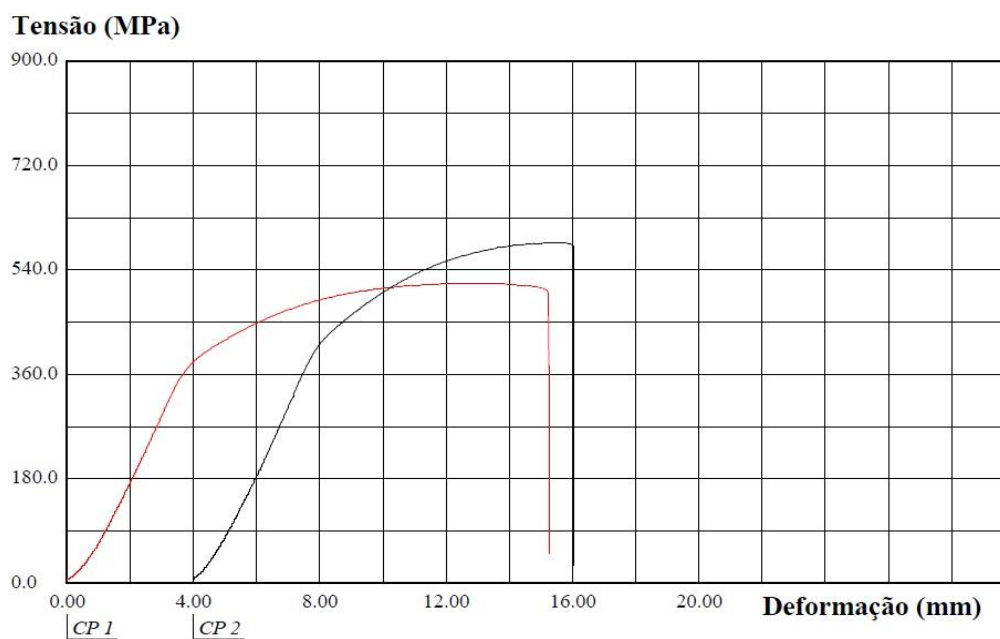
Corpo de Prova	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Estricção (%)
CP 1	78,54	40614,60	517,12	29130,89	370,91	19,80	19,00
CP 2	78,54	46153,11	587,64	32346,22	411,84	11,80	11,64

Fonte: *Software Tesc*, 2016.

Nos resultados obtidos pela Tabela 10, o valor do alongamento encontrado para CP2 foi a única variação que se apresentou inferior ao mínimo estipulado. A diferença observada é pequena mas, é importante manter atenção a essas variações.

O gráfico de tensão x deformação formado com base nos valores apresentados na Tabela 10 pode ser visto conforme Figura 32.

Figura 32 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 10



Fonte: *Software Tesc*, 2016.

De acordo com a Figura 32, as curvas de tensão x deformação se apresentaram de forma coerente ao comportamento de um material em boas condições.

Os dados obtidos através do corpo de prova “Y-02”, referente ao GGG40 vazado em alta temperatura, foram organizados e apresentados conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG40 vazado em alta temperatura obtidas através do corpo de prova “Y-02”

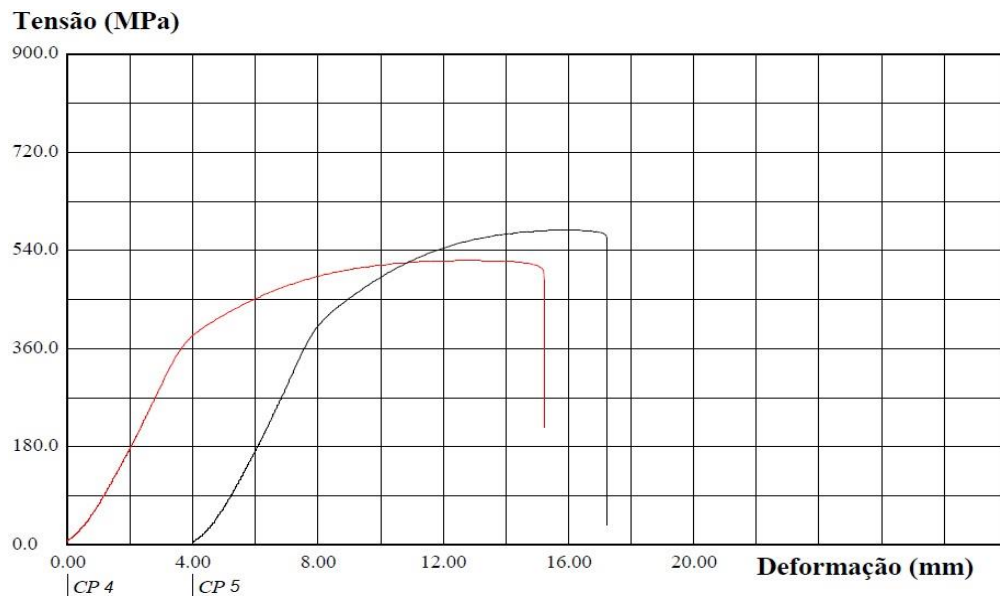
Corpo de Prova	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Estricção (%)
CP 4	78,54	41012,88	522,19	29227,35	372,13	19,40	19,00
CP 5	78,54	45380,38	577,80	31653,59	403,03	17,80	13,51

Fonte: *Software Tesc*, 2016.

Assim como na Tabela 9, todos valores apresentados pela Tabela 11 se mantiveram dentro do padrão estipulado pela norma, ou seja, os dados obtidos para CP4 e CP5 não apresentaram variações inferiores ao mínimo estipulado.

Na Figura 33, com as informações da Tabela 11 pôde-se gerar o gráfico de tensão x deformação, apresentando as curvas características para cada material ensaiado.

Figura 33 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 11



Fonte: *Software Tesc*, 2016.

Na Figura 33, é possível observar o comportamento das curvas de tensão x deformação de maneira normal ao esperado para um material em boas condições de uso e aplicabilidade.

A Tabela 12 traz os dados que foram obtidos através do corpo de prova “Y-01” referente ao GGG50 vazado em baixa temperatura.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG50 vazado em baixa temperatura obtidas através do corpo de prova “Y-01”

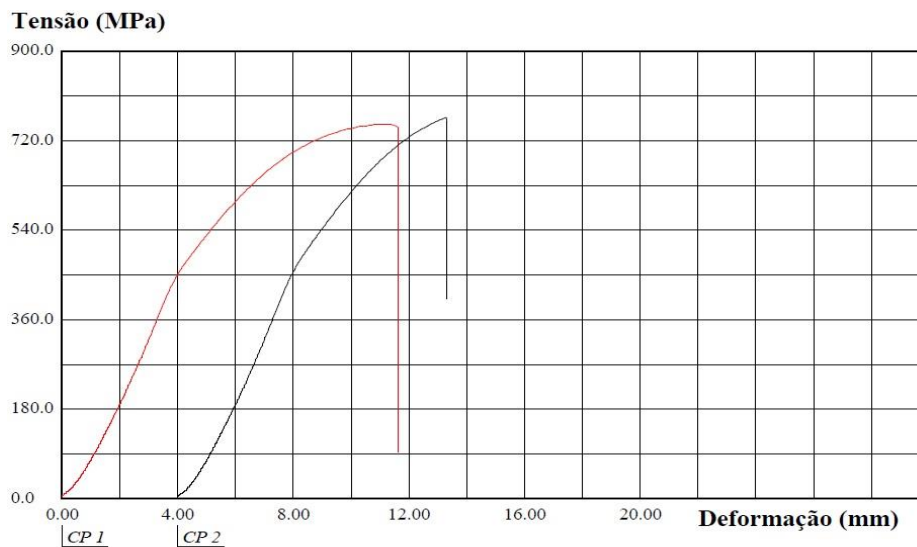
Corpo de Prova	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Estricção (%)
CP 1	78,54	59173,88	753,43	37573,03	478,39	10,60	9,75
CP 2	78,54	60287,03	767,60	38773,40	493,68	4,40	3,96

Fonte: Software Tesc, 2016.

Para as amostras de ferro fundido nodular GGG50 foi usado o mesmo critério de análise. Dessa forma, com os dados apresentados pela Tabela 12, foi possível comparar os resultados com o valores padronizados pela norma, representados na Tabela 2. De acordo com isso, a única variação encontrada se apresentou no alongamento para CP2, que demonstrou um valor inferior ao mínimo especificado.

De acordo com a Figura 34, é possível visualizar o gráfico de tensão x deformação formado com base nos valores apresentados na Tabela 12.

Figura 34 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 12



Fonte: Software Tesc, 2016.

Conforme Figura 34, nota-se a influência do baixo percentual de alongamento apresentado em CP2 na curva de tensão x deformação. A curva em CP2 mostra o rompimento

precoce da amostra logo que alcança a tensão máxima. A curva apresentada para CP1 demonstrou padrões comportamentais normais para esse tipo de material.

A Tabela 13 apresenta os dados que foram adquiridos, através do ensaio de tração aplicado ao corpo de prova “Y-02”, correspondente ao material GGG50 vazado em baixa temperatura.

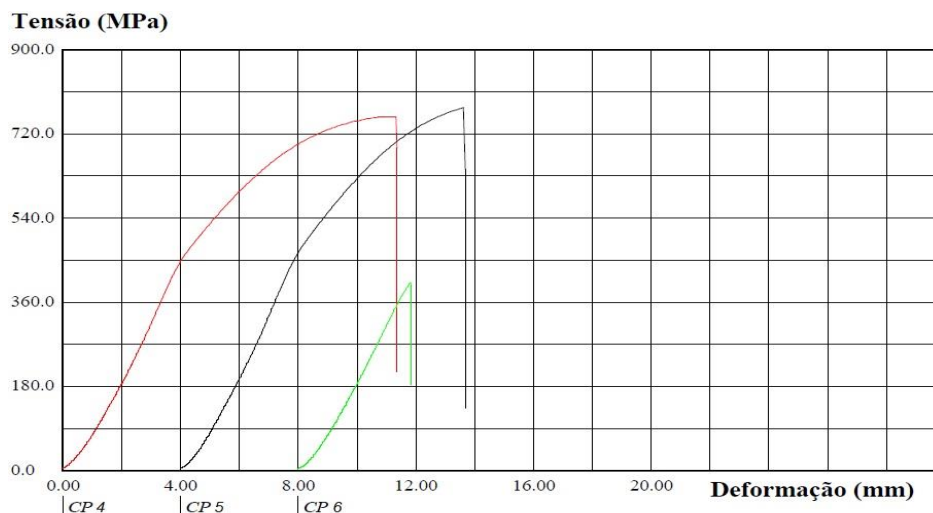
Tabela 13 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG50 vazado em baixa temperatura obtidas através do corpo de prova “Y-02”

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Estricção (%)
CP 4	78,54	59558,55	758,32	37829,88	481,67	8,60	5,91
CP 5	78,54	61001,90	776,70	39054,81	497,26	5,20	3,96
CP 6	78,54	31576,65	402,05	30445,19	387,64	1,00	0,00

Fonte: Software Tesc, 2016.

Para os dados observados na Tabela 13, há uma atenção especial para os valores obtidos no ensaio em CP6. Perante comparativos com dados da Tabela 2, na tensão máxima e alongamento os valores encontrados se apresentaram muito inferiores ao esperado. Ainda na mesma amostra, a tensão de escoamento não se apresentou inferior ao padrão, mas obteve resultado muito próximo do mínimo estipulado. Em CP4 e CP5, conforme a norma, os valores obtidos se apresentaram dentro do aceitável.

Figura 35 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 13



Fonte: Software Tesc, 2016.

De forma a analisar as curvas representadas na Figura 35, é possível verificar a grande diferença de CP6 para com o restante das amostras. Essa grande diferença pode ser advinda de eventual falhas internas causadas por porosidades, pois como mencionado anteriormente, as amostras com maior proximidade do canal que serve de alimentação, em um bloco Y, correm o risco de serem ineficientes aos ensaios de tração. Em CP5, foi observado alongamento com percentual um pouco inferior ao padrão e, na curva correspondente, pode-se perceber a baixa tenacidade desse material comparado a curva apresentada em CP4.

Os resultados adquiridos através do corpo de prova “Y-01”, referente ao material GGG50 vazado em alta temperatura, foram organizados e apresentados conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG50 vazado em alta temperatura obtidas através do corpo de prova “Y-01”

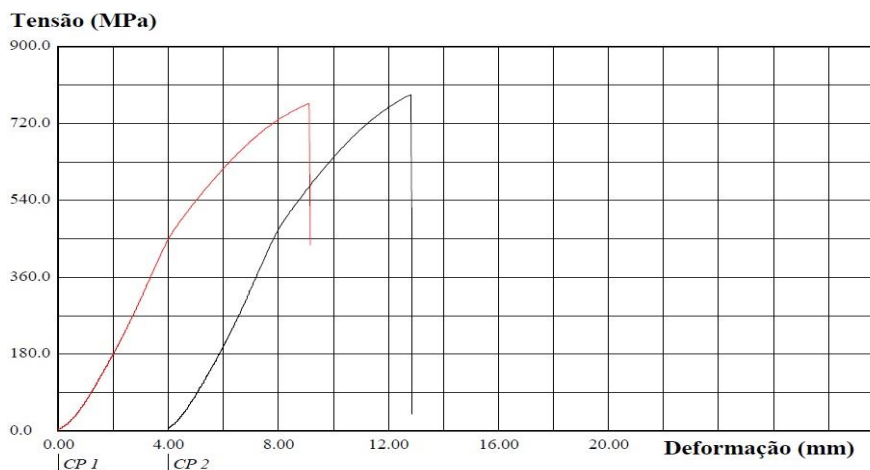
Corpo de Prova	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Estricção (%)
CP 1	78,54	60287,03	767,60	38826,36	494,35	6,40	5,91
CP 2	78,54	61886,97	787,97	40019,31	509,54	4,20	3,96

Fonte: Software Tesc, 2016.

De acordo com a Tabela 14, a única variação encontrada se apresentou no alongamento para CP2, que demonstrou um valor inferior ao mínimo especificado. Os valores restantes se comportaram dentro do normal.

Na Figura 36, pode-se visualizar o gráfico de tensão x deformação construído conforme os dados apresentados na Tabela 14.

Figura 36 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 14



Fonte: Software Tesc, 2016.

Para as curvas de tensão x deformação expressas na Figura 46, percebe-se uma leve diferença de comportamento entre CP1 e CP2, mesmo que o valor de alongamento em CP2 se enquadrar abaixo do mínimo especificado pela norma.

A Tabela 15 apresenta os valores que foram obtidos a partir de “Y-02”, referentes ao material GGG50 vazado em alta temperatura.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de tração nas amostras de ferro fundido nodular GGG50 vazado em alta temperatura obtidas através do corpo de prova “Y-02”

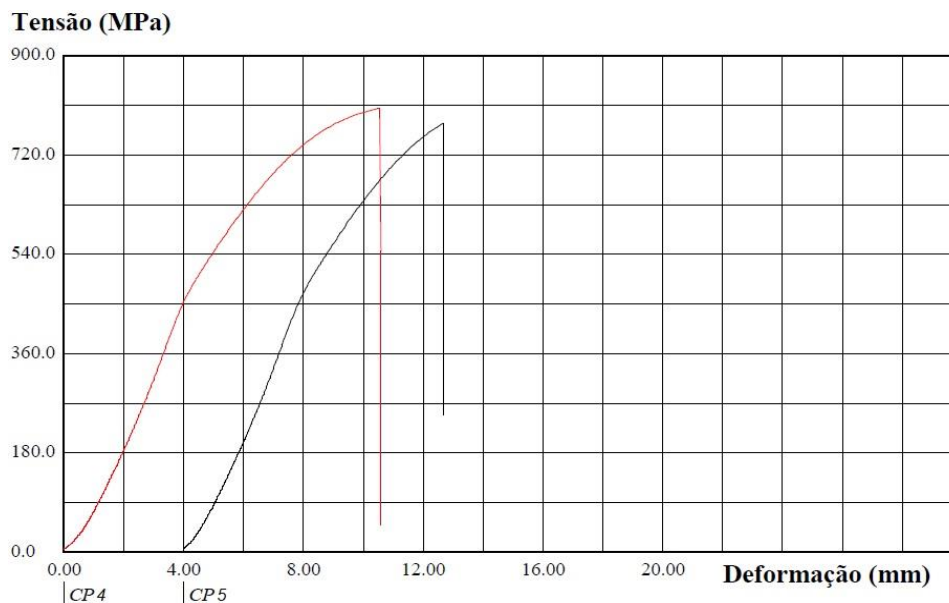
Corpo de Prova	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Carga de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Estricção (%)
CP 4	78,54	63235,00	805,13	40196,77	511,80	6,60	3,96
CP 5	78,54	61073,39	777,61	39553,09	503,61	3,80	1,99

Fonte: Software Tesc, 2016.

Na Tabela 15, apenas obteve-se variação no alongamento para CP5, que demonstrou um valor inferior ao mínimo especificado. O restante dos resultados apresentados se comportaram dentro do padrão.

Com as informações da Tabela 15 pôde-se gerar o gráfico de tensão x deformação e, dessa forma, representar as curvas características, mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Gráfico Tensão x Deformação conforme resultados da Tabela 15



Fonte: Software Tesc, 2016.

Segundo o gráfico da Figura 37, conforme a curva de tensão x deformação é possível verificar a influência do baixo percentual de alongamento apresentado em CP5. A curva em CP5 mostra o rompimento precoce da amostra logo que alcança a tensão máxima. A curva apresentada para CP4 demonstrou padrões comportamentais normais para esse tipo de material.

4.4 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Os resultados adquiridos mediante os ensaios realizados foram organizados de forma a obter uma ideia geral dos fatos evidenciados. De acordo com isso, os resultados apresentam-se nos tópicos a seguir:

- Diferentes temperaturas de vazamento podem provocar alterações estruturais, tais como: presença do carbono livre na forma de pequenos nódulos, aglomeração dos pequenos nódulos, formação de nódulos de grafita nodular (tipo VI) e alterações nos percentuais de grafita, perlita e ferrita;
- A estrutura dos ferros fundidos analisados possui matriz ferrítica-perlítica, com nódulos de grafita primários de forma regular (tipo VI), distribuídos uniformemente na fase ferrítica, formados como resultado de inoculação e nodularização, ainda no estado líquido. Além dos nódulos, a estrutura possui pequenos nódulos de carbono, distribuídos preferencialmente na perlita;
- Para a classe GGG40 dos ferros fundidos nodulares observou-se maior abrangência da matriz ferrita. Quando comparadas as temperaturas de vazamento para essa classe, os corpos de prova vazados em temperatura alta apresentaram menor percentual de ferrita em sua estrutura, porém, a matriz perlita apresentou-se em níveis superiores. O percentual de grafita permaneceu constante em todos os casos;
- Para a classe GGG50 dos ferros fundidos nodulares observou-se maior abrangência da matriz perlita. Quando comparadas as temperaturas de vazamento para essa classe, os corpos de prova não apresentaram variação significativa para os percentuais de perlita, ferrita e grafita;
- Percebeu-se dois fatores importantes que influenciam diretamente nos resultados de um ensaio de tração. Um desses fatores foi mencionado anteriormente e está relacionado com as imperfeições internas e externas causadas pela porosidade ou falta de material. Outro fator importante observado é o valor dimensional do raio, no qual tem a função de servir como alívio de tensões na área de interseção entre os diâmetros

de 10 e 20mm, Figura 24. Esse valor se apresentou insuficiente para obter maior eficiência nos testes, pois algumas das amostras apresentaram rompimento precoce muito próximo ao raio, isso indicou a necessidade de aumentar sua dimensão para ensaios futuros, afim de, suavizar tensões, prolongar o rompimento da amostra e, obter resultados mais concretos e próximos do real;

- A porosidade e as imperfeições se apresentaram com maior frequência em corpos de prova vazados em baixa temperatura. Isso se deve pelo fato de que o processo de solidificação seja mais avançado em temperaturas baixas, não preenchendo uniformemente todos os espaços do molde e, deixando vazios e/ou imperfeições internas na peça final.

Para finalizar, os dados obtidos para cada classe de material estudado apresentaram-se dentro dos padrões estipulados pela norma DIN 1693. As variações apresentadas em alguns corpos de provas são relativas a falhas de processo na preparação das amostras e que eram previstas pelo pesquisador.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi caracterizado duas classes de ferros fundidos nodulares através dos ensaios químico, metalográfico e de tração. Analisou-se os corpos de prova referentes aos materiais GGG40 e GGG50 ambos vazados em alta e baixa temperatura e, os resultados obtidos foram organizados e postos em discussão.

Verificou-se que a variação de temperatura após os tratamentos de inoculação e nodularização conduzem a alterações estruturais das fases presentes (grafita nodular, ferrita, e perlita). O limite de resistência à tração se mostrou influenciado pela forma da grafita, além de outros fatores como a variação no percentual de ferrita e perlita entre os dois tipos de materiais. O alongamento por sua vez, se mostrou bastante dependente da forma da grafita, bem como da influência de seu tamanho e área média para todas as temperaturas de vazamento.

A partir da análise geral dos resultados, pode-se concluir que a realização do levantamento de dados das características estruturais para as duas classes de materiais foi alcançada com êxito. O trabalho também servirá de referência para novas pesquisas conforme fundamentação de seus resultados através dos ensaios realizados. Desta forma, atende à demanda prevista no tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAYER, P. S. **Ensaio dos materiais**. 2013. Disponível em: <<http://www.joinville.ifsc.edu.br/~paulosergio/Ensaio%20dos%20Materiais/Apostila%20de%20Ensaio%20dos%20Materiais.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2016.

CALLISTER Jr, W D. **Ciência e engenharia dos materiais uma introdução**, 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAVALHEIRO, E.; STREY, F. **O ferro fundido (Fofó)**. 2014. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgmFUAH/trabalho-ferro-fundido>>. Acesso em: 03 mar. 2016.

CHEGATTI, S. **Aplicação de resíduos de fundição em massa asfáltica, cerâmica vermelha e fritas cerâmicas**, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CHIAVERINI, V. – **Aços e ferros fundidos**. Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 517p. – 1987.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**, 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2002.

CHIZZOTTI, A. **Pesquisa em ciências humanas e sociais**. São Paulo: Cortez, 1995.

FARACO, B. S. **Classificação de grafitas em ferro fundido cinzento via técnicas de análise de imagens**. 2005. Disponível em: <http://www.emc.ufsc.br/control/arquivos/estagio/geral/arquivo_048-Biana_Faraco.pdf>. Acesso em: 04 set. 2016.

FILHO, K. de S. O.; SARAIVA, M. de F. O. **Espectroscopia**. 2015. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm>>. Acesso em: 21 mar. 2016.

FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, E. **Propriedades mecânicas: ensaios fundamentais**. 2011. Disponível em: <<http://cermat.ufsc.br/wp-content/uploads/2015/03/APOSTILA-DO-LABORATORIO-DE-PROPRIEDADES-MEC-160315.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2016.

FUNDAÇÃO ALTIVO S/A. **Catálogo técnico**. 2011. Disponível em: <<http://www.altivo.com.br/produtos/ferritico-tipo-fn-1/>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GUESSER, W L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**, 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

HASSE, S.: **Ductile cast iron: handbook for producers and appliers of casting**. Original in German. Schiele & Schön, Berlin, 1996.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS (IPT). **Caracterização química e controle da qualidade de materiais metálicos**. 2015. Disponível em: <http://www.ipt.br/solucoes/29-caracterizacao_quimica_e_controle_da_qualidade_de_materiais_metalicos.htm>. Acesso em: 21 mar. 2016.

KARSAY, SI. **Ductile iron – Productin and practice**. American Foundry Society, USA, 1985.

MALUF, O. **Influência do roleteamento no comportamento em fadiga de um ferro fundido nodular perlítico**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MATTAR, F. N. **Pesquisa de marketing**. São Paulo: Atlas, 1999.

OLIVEIRA, T. M. N. de. **Eco-estratégia empresarial no setor metal-mecânico da escola técnica Tupy**. Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina.

ROHDE, R. A. **Metalografia preparação de amostras**. 2010. Disponível em: <<http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2016.

SAAD, F. **Inspeção de peças em fundição**. 2012. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/6331-inspecao-de-pecas-em-fundicao/>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

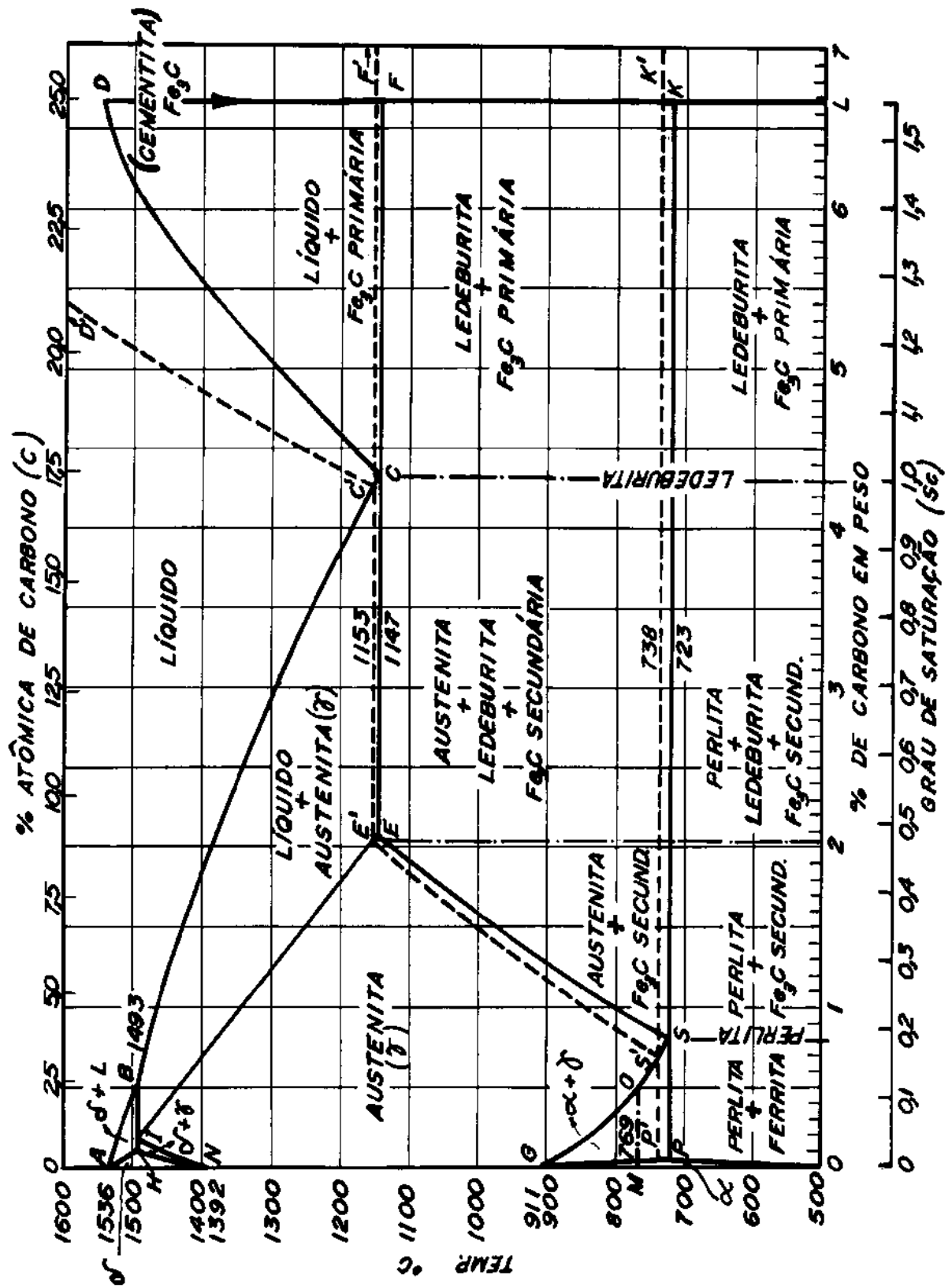
SANTOS, A B. de S.; SUGIYAMA, N. & P., A. **Efeito de algumas variáveis de processo na estrutura e propriedades de ferro fundido nodular**. Metalurgia, 1974.

SERVI, D. R. **Ligas metálicas ferrosas: ferros fundidos**. 2013. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAga2EAB/tcp-ligas-metalicas-ferrosas> >. Acesso em: 02 abr. 2016.

SILVA, A. de A. P. **Ferro fundido de grafita compactada e nodular**. 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA37QAL/ferro-fundido-nodular-vermicular>>. Acesso em: 02 abr. 2016.

SOBRAL, M. D. C.; OLIVEIRA, D. G. R. **Tecnologia dos materiais**. 2009. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/metalografia/arq/apostila_sem_i_2009.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2016.

ANEXO A

Diagramas metaestável Fe-Fe₃C e estável Fe-C

Fonte: Callister, 2008.

ANEXO B

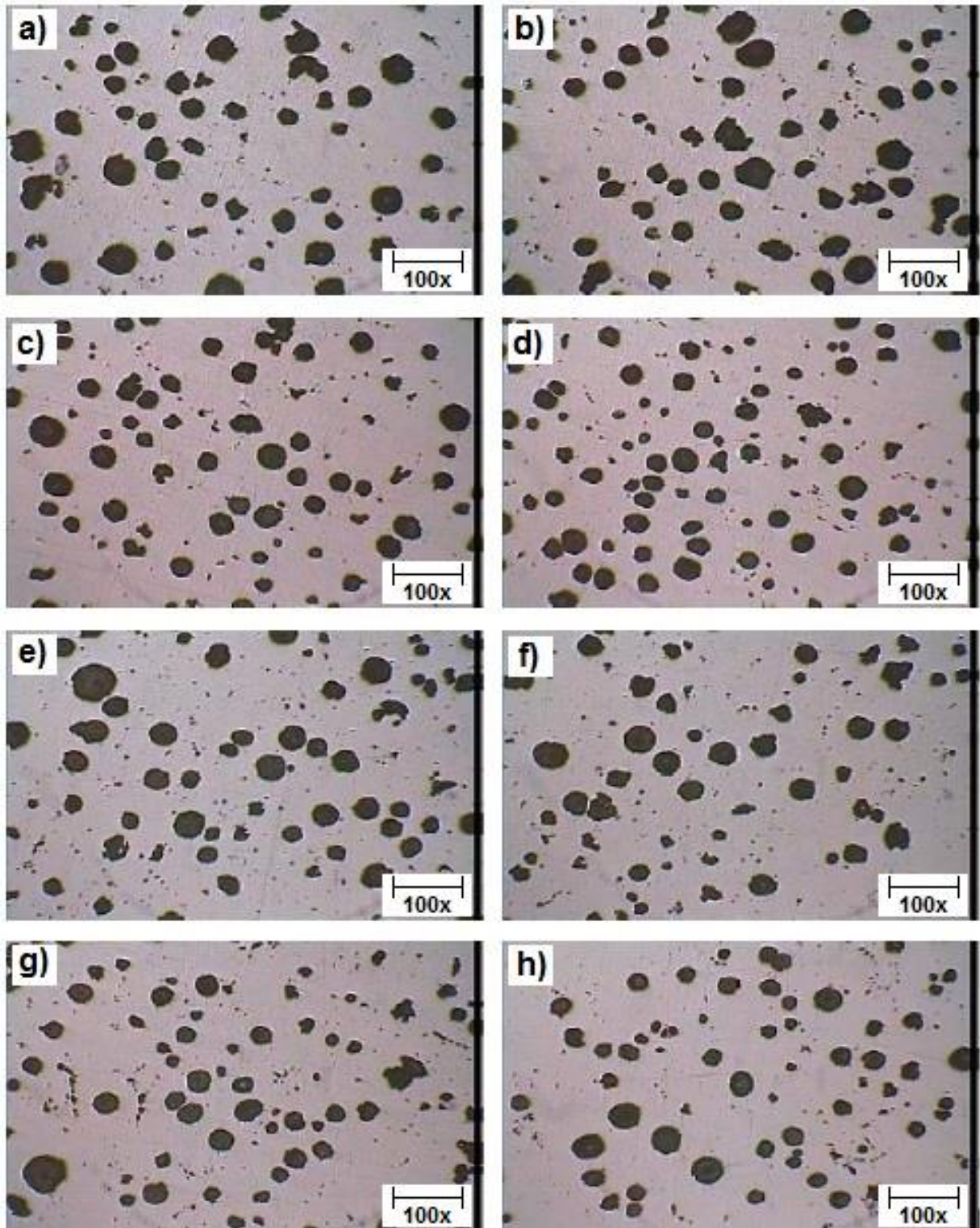
Máquina de ensaios universal



Fonte: Sobral; Oliveira, 2009.

APÊNDICE B

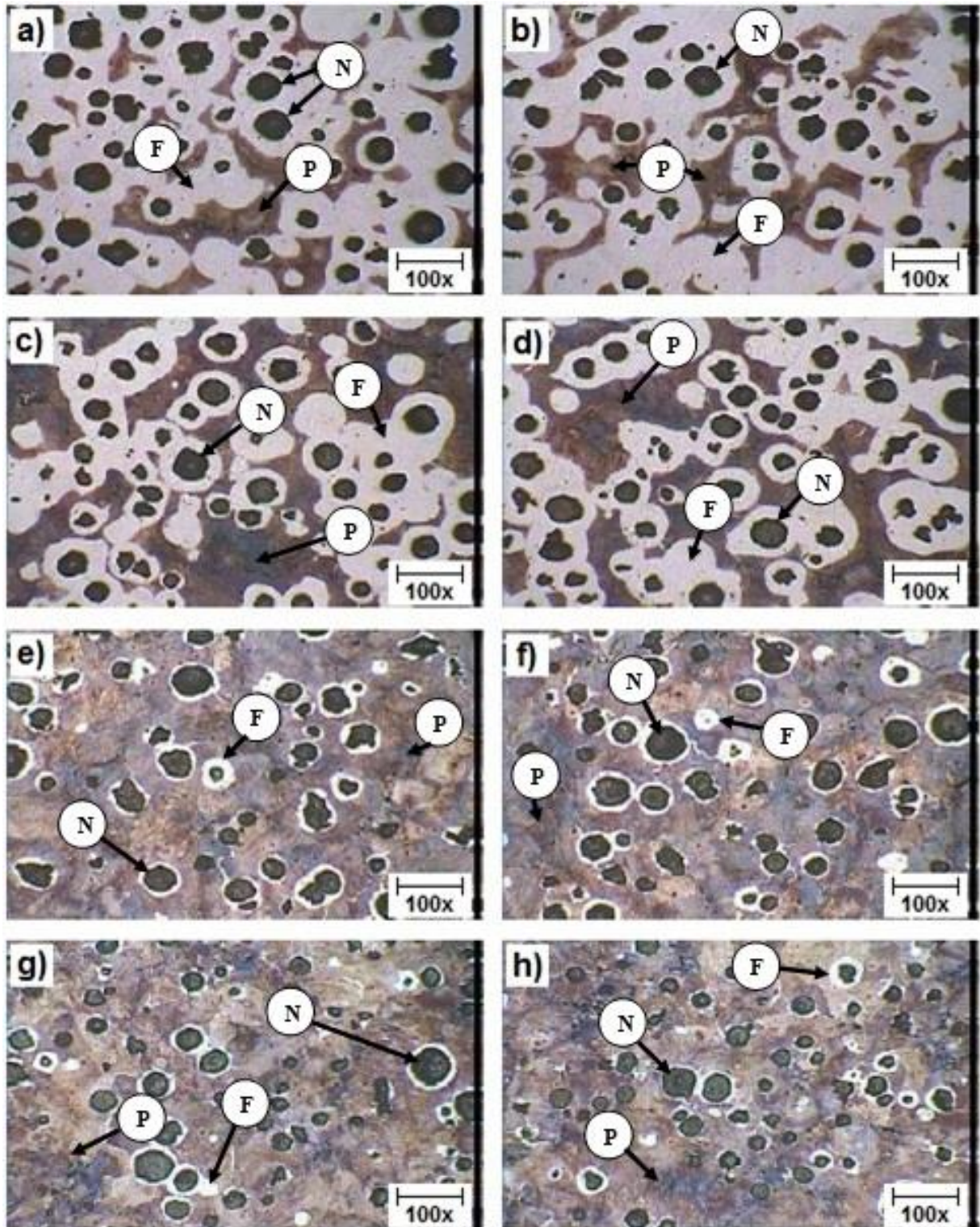
Micrografias dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 vazados em temperaturas diferentes sem ataque químico



Fonte: O autor, 2016.

APÊNDICE C

Micrografias dos ferros fundidos nodulares GGG40 e GGG50 vazados em temperaturas diferentes com ataque químico



Fonte: O autor, 2016.