

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**OSWALDO LUIZ SANTANA JUNIOR**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CEMENTITA NO FERRO FUNDIDO NODULAR**

**VOLTA REDONDA**

**2019**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CEMENTITA NO FERRO FUNDIDO NODULAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aluno:

Oswaldo Luiz Santana Junior

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

**VOLTA REDONDA**

**2019**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Aluno:

Oswaldo Luiz Santana Junior

### **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CEMENTITA NO FERRO FUNDIDO NODULAR**

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

---

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

---

Prof. Me. Rui Aurélio

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pois sem Ele nada seria possível na minha vida.

Aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado me dando força e coragem para permanecer firme na minha caminhada.

A minha namorada, que me motiva a cada momento a ser uma pessoa melhor e aos meus familiares, por todo incentivo e desejos de felicidade.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tantas oportunidades, aprendizados e momentos de alegria em minha vida, sem Ele seria impossível conquistar todas essas coisas que tenho hoje.

Agradeço aos meus pais e familiares por me apoiarem e me incentivarem nas decisões, sempre me aconselhando para os melhores caminhos.

A minha namorada, fruto de paz e alegria em minha vida, por estar sempre ao meu lado nos momentos difíceis e de conquistas.

Aos meus padrinhos, por terem me dado a oportunidade de ingressar na faculdade.

A todos os mestres e funcionários do UniFOA, responsáveis pelo meu crescimento pessoal e acadêmico.

## EPÍGRAFE

*“Quando você realiza um sonho, você  
descobre também que existem sonhos  
ainda maiores para serem realizados”*

*(Carlos Wizard Martins)*

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a realização de um estudo da influência da cementita no ferro fundido nodular nas características mecânicas do material, como a dureza, ductilidade e alongamento.

As propriedades mecânicas dos materiais são fatores essenciais na escolha dos mesmos para determinadas atividades, pois cada material possui características diferentes, fazendo com que as aplicações sejam específicas.

Dentre os materiais utilizados na indústria mecânica, o ferro fundido se destaca pela sua versatilidade e facilidade de produção, tendo os tipos nodulares e cinzento como mais conhecidos.

A metodologia do presente trabalho é baseada em um estudo realizado em tubos de ferros fundidos nodulares que continham a presença do carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) em sua microestrutura, sendo necessário uma avaliação das propriedades mecânicas do material, a fim de avaliar o impacto sobre as suas aplicações.

Com as análises realizadas nos tubos de ferro fundido nodular, foi possível a obtenção de resultados dos ensaios metalográficos, de dureza, ductilidade e alongamento. Com esses valores, é possível realizar a comparação da presença da cementita nas amostras coletadas, mostrando a sua influência nas principais propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. Podemos avaliar que, com o aumento da cementita na microestrutura, o ferro fundido nodular perde as suas características mecânicas, ficando inviável a sua aplicação em diversas atividades.

Com a avaliação da microestrutura do material com a presença de diferentes quantidades de cementita, podemos concluir que o controle de produção desses materiais deve ser eficaz e preciso, a fim de garantir a correta aplicação deste material.

Palavras-Chave: Cementita; Ferro Fundido; Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

The present work aims to conduct a study of the influence of cementite on nodular cast iron on the mechanical characteristics of the material, such as hardness, ductility and elongation.

The mechanical properties of materials are essential factors in choosing them for certain activities, as each material has different characteristics, making applications specific.

Among the materials used in the mechanical industry, cast iron stands out for its versatility and ease of production, with the nodular and gray types as the best known. The methodology of the present work is based on a study carried out in nodular cast iron tubes that contained the presence of iron carbide ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) in its microstructure, requiring an evaluation of the mechanical properties of the material in order to evaluate the impact on your applications.

With the analyzes performed in the nodular cast iron tubes, it was possible to obtain results of the metallographic, hardness, ductility and elongation tests. With these values, it is possible to compare the presence of cementite in the collected samples, showing its influence on the main mechanical properties of nodular cast iron. We can evaluate that, with the increase of cementite in the microstructure, nodular cast iron loses its mechanical characteristics, making its application in several activities impracticable.

With the evaluation of the microstructure of the material with the presence of different amounts of cementite, we can conclude that the production control of these materials must be effective and precise, in order to guarantee the correct application of this material.

Keywords: Cementite; Cast iron; Mechanical properties.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
<b>1.1 Considerações Iniciais .....</b>	<b>02</b>
<b>1.2 Objetivo .....</b>	<b>02</b>
<b>1.3 Objetivo Específico.....</b>	<b>02</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>03</b>
<b>2.1 História do Ferro.....</b>	<b>03</b>
<b>2.2 Ferros Fundidos.....</b>	<b>03</b>
<b>2.2.1 Definição de ferro fundido.....</b>	<b>03</b>
<b>2.2.2 Fases do ferro.....</b>	<b>04</b>
<b>2.2.3 Constituintes do ferro .....</b>	<b>05</b>
<b>2.2.3.1 Ferrita.....</b>	<b>06</b>
<b>2.2.3.2 Austenita.....</b>	<b>07</b>
<b>2.2.3.3 Cementita .....</b>	<b>08</b>
<b>2.2.4 Componentes químicos.....</b>	<b>09</b>
<b>2.2.5 Velocidade de resfriamento.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.6 Elementos influenciadores na grafitação.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.7 Componentes estruturais.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.8 Tratamentos térmicos nos ferros fundidos.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.8.1 Alívio de tensões.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.8.2 Recozimento de decomposição de carbonetos.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.8.3 Recozimento de ferritização.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.8.4 Normalização.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.8.5 Têmpera.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.8.6 Têmpera superficial.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.9 Tipos de ferros fundidos.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Ferro Fundido Nodular.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.1 Definição.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.2 Processos de obtenção.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.3 Componentes químicos.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.4 Classificação.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.5 Propriedades mecânicas.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.6 Aplicações.....</b>	<b>19</b>

<b>2.4 Ferro Fundido Vermicular.....</b>	<b>20</b>
2.4.1 Definição.....	20
2.4.2 Propriedades mecânicas.....	21
2.4.3 Aplicações.....	21
2.4.4 Classificação.....	22
<b>2.5 Ferro Fundido Cinzento.....</b>	<b>23</b>
2.5.1 Definição.....	23
2.5.2 Composição química.....	24
2.5.3 Classificação.....	25
2.5.4 Propriedades mecânicas.....	26
2.5.5 Aplicações.....	27
<b>2.6 Ferro Fundido Branco.....</b>	<b>28</b>
2.6.1 Definição.....	28
2.6.2 Fatores para obtenção do Ferro Fundido Branco.....	29
2.6.2 Propriedades mecânicas.....	29
2.6.3 Classificação.....	30
2.6.4 Aplicações.....	30
<b>2.8 Dureza.....</b>	<b>31</b>
2.8.1 Aspectos da dureza.....	31
2.8.2 Técnicas de medição.....	31
2.8.2.1 Ensaios de Dureza Rockwell.....	31
2.8.2.2 Ensaios de Dureza Brinell.....	33
<b>2.9 Resistência à Tração.....</b>	<b>33</b>
2.9.1 Aspectos da tração.....	33
2.9.2 Técnicas de medição.....	34
<b>2.10 Ductilidade.....</b>	<b>36</b>
2.10.1 Aspectos da Ductilidade.....	36
2.10.2 Técnicas de medição.....	37

<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Método Para Ensaio Metalográfico.....</b>	<b>39</b>
3.1.1 Preparação da amostra.....	40
3.1.2 Lixamento da superfície.....	41
3.1.3 Polimento da superfície.....	42
3.1.4 Ataque químico.....	43
3.1.5 Análise Metalográfica.....	44
<b>3.2 Método Para Ensaio de Dureza.....</b>	<b>45</b>
3.2.1 Preparação da amostra.....	46
3.2.2 Ensaio de dureza.....	46
<b>3.3 Método Para Ensaio de Tração e Alongamento.....</b>	<b>46</b>
3.3.1 Preparação da amostra.....	47
3.3.2 Ensaio de tração e alongamento.....	48
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>51</b>
4.1 Exame Metalográfico.....	51
4.2 Ensaio de Dureza.....	57
4.3 Ensaio de Tração.....	58
4.4 Ensaio de Alongamento.....	60
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Diagrama de equilíbrio de fases ferro-carbono.....	04
Figura 02 – Ferrita $\alpha$ (ampliação de 90x) .....	06
Figura 03 – Austenita (ampliação de 325x) .....	07
Figura 04 – Cementita globular.....	08
Figura 05 – Formas típicas da grafita.....	11
Figura 06 – Microestrutura ferro fundido nodular.....	16
Figura 07 – Ilustração processo Tundish Cover.....	17
Figura 08 – Microestrutura ferro fundido vermicular.....	20
Figura 09 - Ferro fundido vermicular.....	22
Figura 10 – Microestrutura ferro fundido cinzento.....	24
Figura 11 – Microestrutura ferro fundido branco.....	28
Figura 12 – Ilustração do comportamento da curva tensão-deformação.....	34
Figura 13 – Ilustração da carga de tração em um corpo de prova.....	35
Figura 14 – Exemplo Gráfico Tensão-Deformação.....	36
Figura 15 – Comparação entre material frágil e dúctil .....	37
Figura 16 - Amostra com superfície esmerilhada.....	41
Figura 17 – Superfície da amostra polida.....	42
Figura 18 – Ataque químico realizado na superfície da amostra.....	43
Figura 19 – Microscópio ótico manual.....	44
Figura 20 – Durômetro portátil.....	45
Figura 21 – Máquina para ensaio de tração.....	47
Figura 22 – Corpo de prova bruto.....	47
Figura 23 – Corpo de prova usinado padrão.....	48
Figura 24 – Corpo de prova fixado para ensaio de tração.....	49
Figura 25 – Corpo de prova fraturado após ensaio de tração.....	49
Figura 26 – Medição do comprimento útil do corpo de prova.....	50
Figura 27 – Amostra com 10% de Cementita.....	52
Figura 28 – Amostra com 20% de Cementita.....	53
Figura 29 – Amostra com 30% de Cementita.....	53
Figura 30 – Amostra com 40% de Cementita.....	54
Figura 31 – Amostra com 50% de Cementita.....	55

Figura 32 – Amostra com 60% de Cementita.....	55
Figura 33 – Amostra com 70% de Cementita.....	56
Figura 34 – Amostra com 80% de Cementita.....	56
Figura 35 – Amostra com 90% de Cementita.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição química de ferros fundidos típicos.....	10
Tabela 02 – Componentes químicos do ferro fundido nodular.....	18
Tabela 03 – Aplicações ferro fundido nodular.....	19
Tabela 04 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.....	21
Tabela 05 – Classes de ferro fundido vermicular.....	23
Tabela 06 – Classificação em relação à composição química.....	25
Tabela 07 – Classificação em relação às propriedades mecânicas.....	25
Tabela 08 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos.....	26
Tabela 09 – Aplicações ferro fundido cinzento.....	27
Tabela 10 – Classificação ferro fundido branco.....	30
Tabela 11 – Escalas de Dureza Rockwell.....	32
Tabela 12 – Escalas de Dureza Rockwell Superficial.....	32
Tabela 13 – Sequência de lixas utilizadas.....	41
Tabela 14 - Resultados dos percentuais de Cementita.....	51
Tabela 15 – Comparação entre Cementita e Dureza.....	52
Tabela 16 – Comparação entre Cementita e Resistência à Tração.....	53
Tabela 17 – Comparação entre Cementita e Alongamento.....	55

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Relação da Cementita com a Dureza.....	53
Gráfico 02 – Relação da Cementita com a Resistência à Tração.....	54
Gráfico 03 – Relação da Cementita com o Alongamento.....	55

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Fe: Ferro

Fe-C: Ferro carbono

C: Carbono

Si: Silício

S: Enxofre

Mn: Manganês

P: Fósforo

Fe<sub>3</sub>C: Carboneto de ferro

CCC: Cúbica de corpo centrado

CFC: Cúbica de face centrada

NBR: Norma Brasileira

ISO: Organização Internacional para Padronização

ASTM: American Society for Testing and Materials

JIS: Japanese Industrial Standards

GJV: Ferro Fundido Vermicular

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações Iniciais**

A propriedade mecânica é um item essencial no momento de se definir qual material utilizar para uma determinada função, pois com a grande variedade existente no mercado, a escolha do material precisa ser feita minuciosamente, a fim de evitar transtornos futuros com erros e consequentes acidentes.

Há muito tempo o homem vem procurando encontrar materiais que sejam mais resistentes para cada tipo de trabalho, buscando sempre a longevidade do material aliado com o seu baixo custo de fabricação.

O ferro é considerado um dos materiais mais abundantes na Terra, tendo uma ampla utilização por seu baixo custo e facilidade de fabricação e, além disso, alguns tipos tem se destacado no mercado industrial, como por exemplo o ferro fundido nodular, que tem a sua grafita em forma de nódulos e uma resistência mecânica que pode ser comparado com alguns aços para aplicações determinadas.

O processo de fabricação deste material é importante para uma qualidade do produto, tendo a velocidade de resfriamento e os elementos químicos como importantes variáveis a serem controladas, a fim de evitar falhas na sua microestrutura e composição química. O presente trabalho visa apresentar um estudo que compara diferentes percentuais do carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), mais conhecido como "cementita", atuando no ferro fundido nodular. Este componente na matriz do material influencia diretamente na sua resistência mecânica e ductilidade, e, em grandes percentuais, faz com que o material se torne frágil, impedindo-o de executar as suas funções corretamente.

O conhecimento de pontos críticos no processo de produção do ferro fundido nodular é importante para definir planos de melhorias e, os resultados apresentados podem favorecer nesta atividade, pois demonstram o quão importante é um correto controle de processo.

## **1.2 Objetivo**

Utilizando tubos de ferro fundido nodular e materiais de laboratório, este trabalho tem como objetivo a comparação de diferentes propriedades mecânicas do ferro fundido nodular considerando a presença em sua matriz do constituinte carbeto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), usualmente conhecido como cementita.

## **1.3 Objetivo Específico**

Este trabalho tem como objetivo específico analisar a influência da cementita no ferro fundido nodular em relação a microestrutura, dureza, alongamento e resistência à tração, utilizando técnicas de laboratório, apresentando resultados em forma de tabela e gráficos para que seja possível realizar comparações e correções no processo produtivo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 História do Ferro**

O ferro é considerado um dos elementos mais abundantes do universo e tem como simbologia na tabela periódica a nomenclatura *Fe*. Em temperatura ambiente, a sua ocorrência é observada sob a forma de minério de ferro, sendo encontrado na natureza em estado sólido.

Existem indícios que a primeira utilização do ferro, que era encontrado em meteoritos, tenha sido em objetos como pontas de lança e outros ornamentos feitos pelos habitantes do Egito antigo e Suméria, em 4.000 a.C.

A metalurgia do ferro teve seu início na Ásia, por volta do ano de 1300 a.C. e chegando até a Europa no período de 1000 a.C., espalhando-se pelo ocidente, onde teve início a Idade do ferro, época no qual o bronze foi substituído pelo ferro na produção de armas e outros objetos.

O ferro é considerado o metal mais utilizado em todo mundo e que tem como fatores para sua aplicação (Callister, 2007):

- O ferro é o metal mais abundante na crosta terrestre;
- tem um baixo custo em relação ao seu processo de fabricação;
- é versátil e pode ser adaptado para uma variedade de propriedades mecânicas.

### **2.2 Ferros Fundidos**

#### **2.2.1 Definição de ferro fundido**

Os ferros fundidos podem ser considerados como sendo uma classe de ligas ferrosas com teores de carbono acima de 2,14%, além de conter também outros elementos de liga, como silício, manganês e fósforo. Estas ligas ferrosas se tornam completamente líquidas em temperaturas de aproximadamente 1150°C e 1300°C (Callister, 2016). Com esta faixa de temperatura, menor que a do aço, as ligas ferrosas são fundidas facilmente, o que justifica a ampla utilização desses materiais.

### 2.2.2 Fases do ferro

Segundo Callister (CALLISTER, 2002), uma fase do material é definida como sendo uma porção homogênea de um sistema que possui características físicas e químicas uniformes.

Dependendo da sua temperatura, o ferro pode apresentar duas estruturas diferentes, a Cúbica de Corpo Centrado (CCC) e a Cúbica de Face Centrada (CFC), tendo os componentes químicos como estabilizadores de uma ou outra. Para um estudo sobre essas propriedades, leva-se em consideração o diagrama de equilíbrio do Fe-C, conforme ilustrado na figura 01.

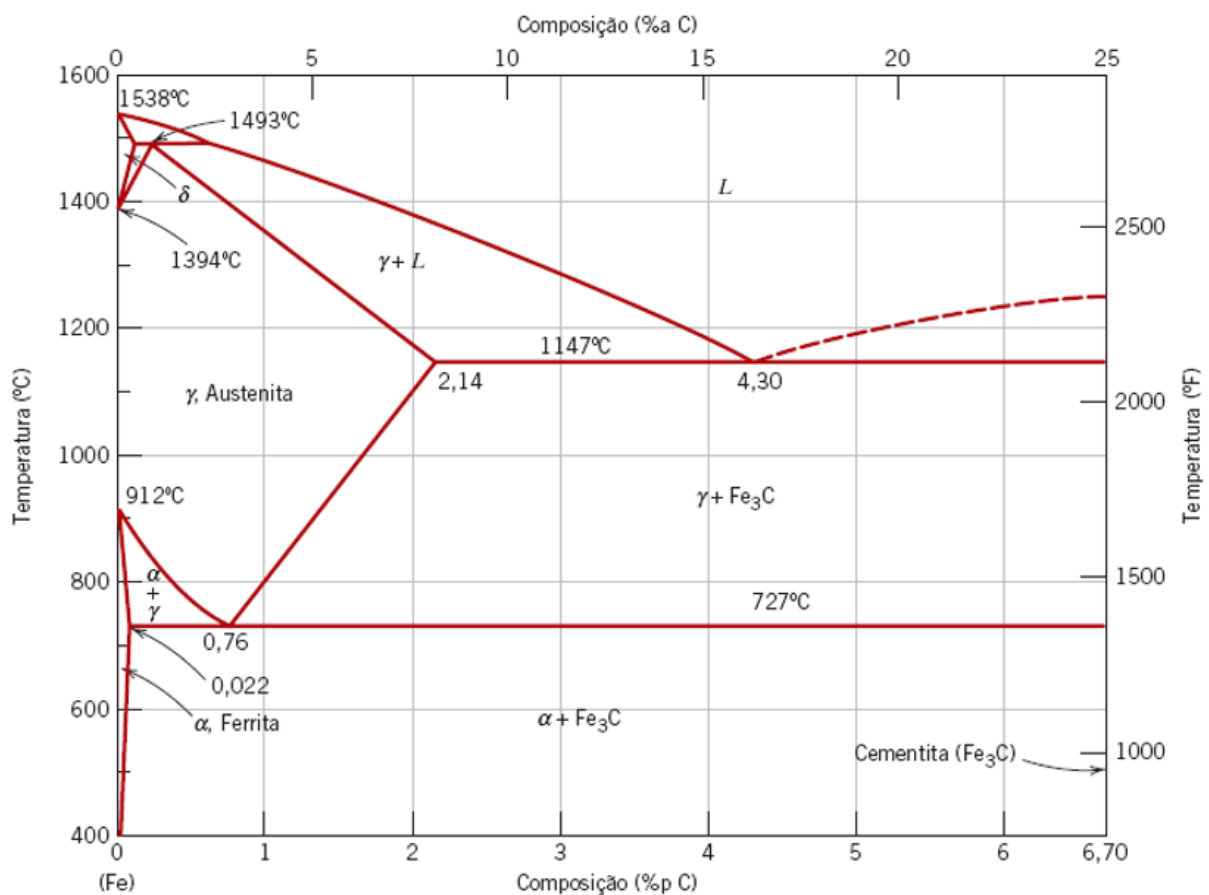


Figura 01 – Diagrama de equilíbrio de fases ferro-carbono

Fonte: Callister, 2016

Segundo Colpaert, as análises estruturais são feitas através deste diagrama por conta de dois principais fatores (COLPAERT, 2008):

- A escassez de dados precisos sobre os diagramas de materiais mais complexos;
- Dificuldade de representação e interpretação gráfica de sistemas mais complexos.

Através da temperatura e percentual de carbono, é possível realizar uma análise sobre qual fase estável o material se encontra, tornando possível o conhecimento da estrutura do metal.

As linhas de separação das fases existentes neste diagrama indicam um equilíbrio de fases distintas no metal em determinado ponto, fazendo com que o material fique estável e não sofra nenhum tipo de transformação estrutural, por conta da falta de energia. Porém, aplicando uma mudança termodinâmica no material, a energia presente irá ser diferente, criando assim uma força motriz, fazendo com que ocorra uma transformação no material.

Para que as transformações de fases e a nucleação ocorram e, o material tenha a sua forma definida, é necessário que os seus átomos se desloquem, gastando energia do sistema. Além disso, pode ser necessário que o material precise vencer forças distintas, como por exemplo a diferença de volume do núcleo formado e a fase anterior.

### **2.2.3 Constituintes do ferro**

Um material apresenta diferentes constituintes em sua microestrutura, dependendo da sua temperatura de processamento e percentual de carbono existente. Estes constituintes são importantes para a formação das propriedades mecânicas do material, pois cada um deles possuem uma característica diferente.

Quando o ferro puro é aquecido a uma determinada temperatura ele apresenta algumas mudanças em sua microestrutura antes de ocorrer a sua fundição. A ferrita, conhecida como ferro  $\alpha$ , em temperatura ambiente, apresenta uma estrutura CCC e, quando atinge aproximadamente 912°C, ela se transforma em austenita CFC.

Esta transformação se mantém até uma temperatura aproximada de 1394°C, quando a austenita se transforma novamente em ferrita, que agora é denominada ferrita  $\delta$ . A fundição do ferro ocorre em uma temperatura de 1538°C.

O eixo horizontal do diagrama de fases, apresentado na figura 01, apresenta as composições do ferro, ao qual se estende até 6,70%p C. Quando o ferro atinge este percentual de carbono, é formado o constituinte cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

### 2.2.3.1 Ferrita

Este constituinte pode ser considerado como sendo o ferro puro, tendo a sua forma estável em temperatura ambiente. Sua estrutura, representado na figura 02, se encontra na forma CCC, sendo dúctil e pouco resistente quando comparado com outros constituintes, além de ter uma dureza bastante baixa. A ferrita  $\alpha$  possui uma solubilidade máxima de carbono de 0,022%p C (Callister, 2002)

Alguns elementos químicos que possuem uma estrutura CCC são dissolvidos no ferro para estabilizarem a ferrita, como por exemplo o silício, cromo, molibdênio, vanádio, fósforo etc.



Figura 02 – Ferrita  $\alpha$  (ampliação de 90x)

Fonte: CALLISTER, 2002

### 2.2.3.2 Austenita

O aquecimento do ferro faz com que a ferrita se transforme em austenita CFC, conforme mostrado na figura 03, a qual é estável apenas em temperatura elevada, aproximadamente em 912°C. A solubilidade máxima de carbono na austenita é de 2,14%p C, ocorrendo em 1147°C, por conta de as posições intersticiais serem maiores nessa estrutura (Callister, 2002).

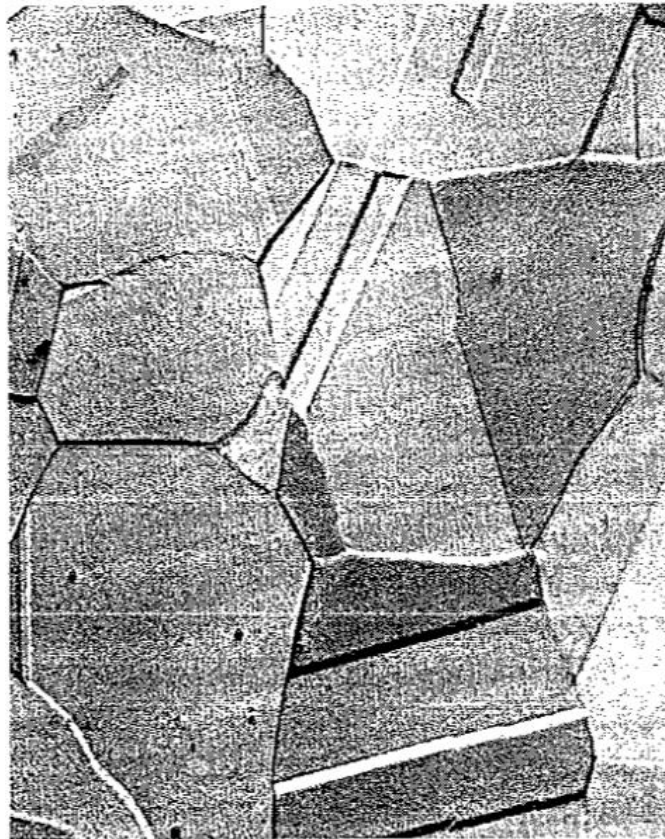


Figura 03 – Austenita (ampliação de 325x)

Fonte: CALLISTER, 2002

Assim como a ferrita, existem elementos químicos que podem estabilizar a austenita, sendo a maioria deles de estrutura CFC, como por exemplo o níquel, manganês, cobalto, cobre e carbono.

### 2.2.3.3 Cementita

Este constituinte tem como característica ser frágil e duro, sendo usada em aços para aumento da dureza. A cementita é considerada estável em temperaturas ambiente e aparece no ferro quando a solubilidade do carbono na ferrita é excedida em temperatura de 727°C (Callister, 2002). Alguns elementos têm a tendência de formarem os carbonetos de ferro, como o titânio, nióbio, vanádio e tungstênio. A figura 04 apresenta um aço composto com uma quantidade de manganês, laminado a quente, onde existe a presença de ferrita e cementita globular.

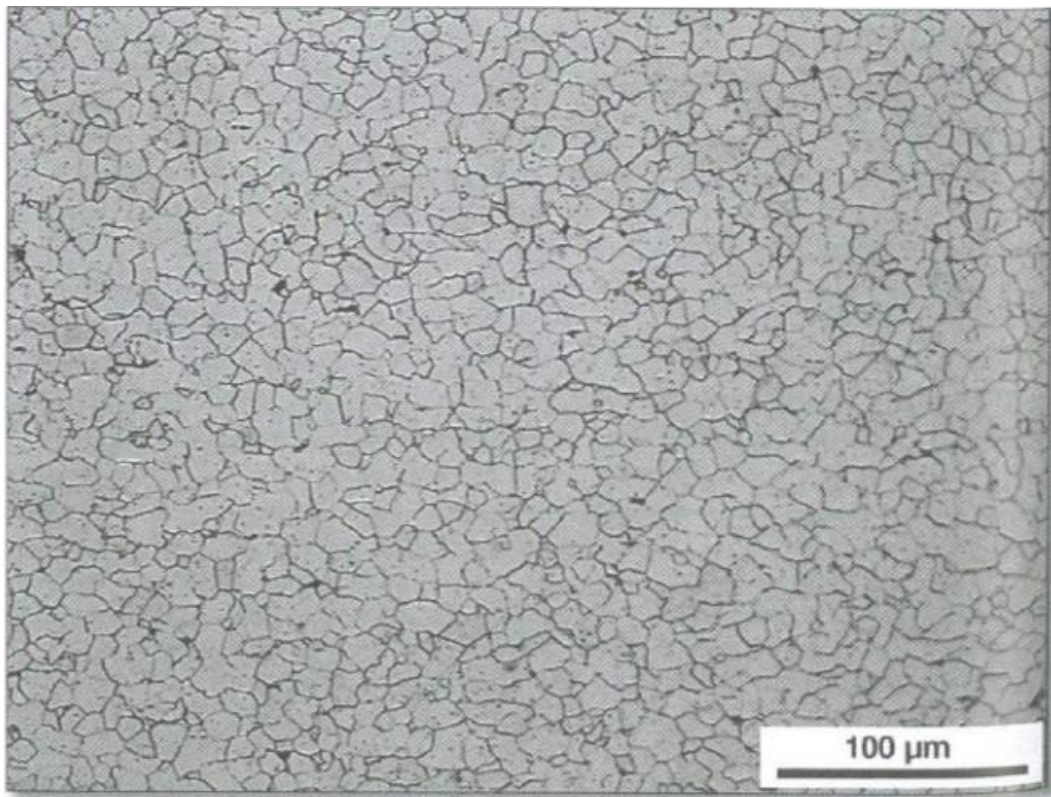


Figura 04 – Cementita globular

Fonte: Callister, 2002

#### 2.2.4 Componentes químicos

Podemos encontrar no ferro fundido alguns elementos de liga que são necessários para a formação da sua microestrutura, sendo o C, Si, P, S e Mn como os mais encontrados. De acordo com (Chiaverini, 2005), esses elementos têm influências distintas na microestrutura do ferro fundido, como descrito abaixo:

- Carbono (C): responsável por determinar o quanto de grafita poderá ser formada no processo de fabricação e, em teores baixos, a tendência é a formação da Cementita;
- Silício (Si): após o Carbono, podemos considerar este elemento como sendo o de maior importância para o ferro fundido. Ele reduz a estabilidade da cementita, favorecendo também a decomposição da mesma em grafita e perlita;
- Manganês (Mn): sua principal função é a neutralização dos teores de enxofre nos ferros fundidos, porém, se adicionados em elevados teores, pode eliminar a atuação do Silício, dificultando a decomposição da cementita;
- Enxofre (S): encontrado em pequenas proporções, não tem um significado relevante em relação a ação grafitizante do ferro fundido;
- Fósforo (P): quando tem teores normais ou baixos, atua como grafitizante, porém em altos teores contribui para a formação da cementita, fragilizando a microestrutura do ferro fundido.

A tabela 01 mostra o percentual dos elementos químicos mais presentes nos diferentes tipos de ferro fundido, no qual serão abordados neste trabalho.

Tabela 01 – Composição química de ferros fundidos típicos

Tipo	Composição química %				
	C	Si	Mn	S	P
<b>Branco</b>	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,80	0,06-0,20	0,06-0,20
<b>Maleável</b>	2,2-2,9	0,9-1,9	0,15-1,20	0,02-0,20	0,02-0,20
<b>Cinzento</b>	2,5-4,0	1,0-3,0	0,20-1,00	0,02-0,25	0,02-1,00
<b>Nodular</b>	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,00	0,01-0,03	0,01-0,10
<b>Vermicular</b>	2,5-4,0	1,0-3,0	0,20-1,00	0,01-0,03	0,01-0,10

Fonte: (Chiaverini, 2007)

### 2.2.5 Velocidade de resfriamento

Este fator é relacionado com a espessura do material que está sendo fabricado. Quanto maior a espessura, mais lento será o seu resfriamento e, quanto menor for a espessura, seu resfriamento ocorrerá de forma mais rápida.

Em velocidades de resfriamento elevadas, não há tempo suficiente para ocorrer a decomposição da cementita, pois quando depende dos teores de carbono e silício, há pouca grafitação do material.

Em velocidades baixas de resfriamento, a formação da grafita é favorecida, fazendo com que a estrutura do ferro fundido seja constituída de grafita e perlita, basicamente.

### 2.2.6 Elementos influenciadores na grafitação

Durante o processo de fabricação dos ferros fundidos a velocidade de resfriamento e a adição de elementos químicos são dois fatores para a formação da microestrutura do ferro fundido. Porém, outro fator importante que influencia na fabricação destes materiais é o processo de inoculação, que consiste na adição de algum elemento metálico no ferro líquido, seja no próprio forno ou na panela de fundição. Este processo influencia no decréscimo da tendência do ferro fundido se tornar branco.

Alguns fatores são importantes para uma correta inoculação do material, como por exemplo a temperatura do ferro, quantidade de inoculante introduzida, tempo entre a inoculação e a solidificação, perda da eficiência do inoculante e a técnica de se realizar esta inoculação.

### 2.2.7 Componentes estruturais

Para uma correta aplicação dos diferentes tipos de ferros fundidos existentes, é importante o conhecimento dos componentes presentes na sua microestrutura, assim como as propriedades mecânicas de cada um deles.

- Grafita: sua formação depende especialmente dos teores de carbono e silício, sendo considerada o componente estrutural mais importante no ferro fundido, pois ela determina as propriedades mecânicas deste material.

A figura 05 apresenta os diferentes formatos de grafita que podem ser obtidas através do controle da taxa de resfriamento do material.

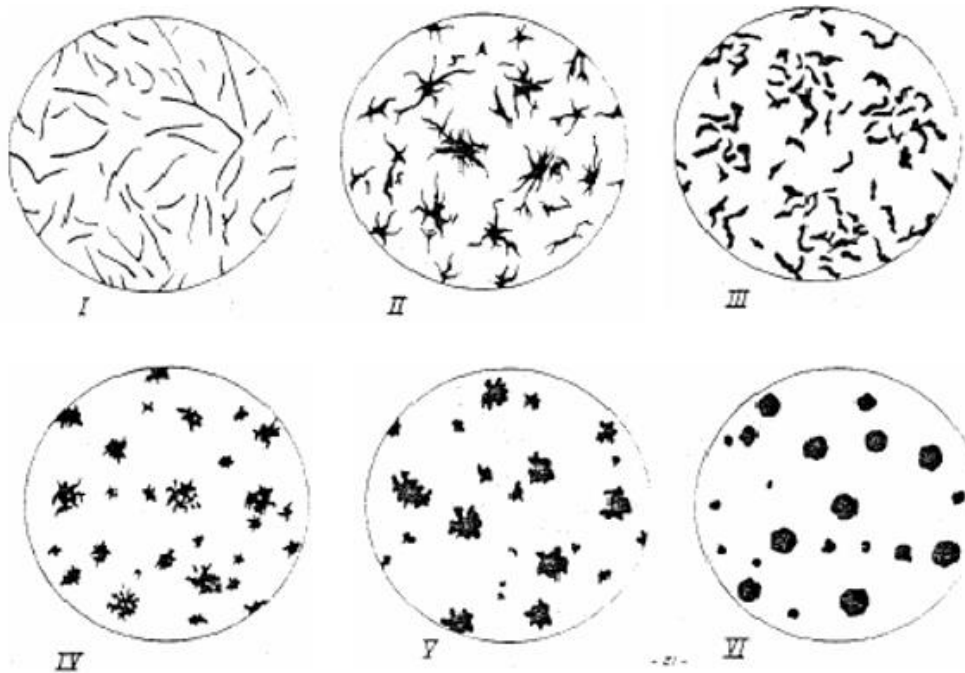


Figura 05 – Formas típicas da grafita

Fonte: Colpaert, 2008

Podemos observar os diferentes formatos de grafita, sendo definidos como:

- I. Lamelar;
- II. Rosetas;
- III. Vermicular;

IV. Semi-compactas;

V. Compactas

VI. Esferoidal

### **2.2.8 Tratamentos térmicos nos ferros fundidos**

Os tratamentos térmicos em materiais são amplamente utilizados pelas indústrias a fim de obter características especiais para cada tipo de aplicação. Segundo Guessser (Guessser, 2009), os ferros fundidos passam por diferentes tratamentos térmicos com os seguintes objetivos:

- Eliminação das tensões residuais;
- Melhora na usinabilidade;
- Homogeneização das propriedades;
- Decomposição de carbonetos;
- Aumento da tenacidade;
- Aumento de resistência mecânica;
- Aumento de resistência ao desgaste e à fadiga.

Para alcançar estes objetivos, são aplicadas diferentes técnicas de tratamento térmicos. Com o objetivo de reduzir os custos de fabricação, as propriedades mecânicas específicas devem ser alcançadas sempre na fase de fundição bruta, porém, em muitos casos isso não é possível, fazendo com que se tenha que recorrer à algum tratamento térmico para o material.

Nem todos os tratamentos térmicos são aplicados para os tipos de ferros fundidos existentes. Por exemplo, a aplicação de tratamentos térmicos em ferros fundidos nodulares é mais ampla, porém em ferros fundidos cinzentos normalmente são utilizados apenas as técnicas de alívio de tensões e tratamento superficiais (Guessser, 2009).

### **2.2.8.1 Alívio de tensões**

Este tipo de tratamento térmico tem o objetivo de remover as tensões residuais ao qual foram introduzidas na peça em processos de fabricação anteriores. A tensão residual é causada por conta da diferença de temperatura na peça, muito por conta da sua geometria complexa, que faz com que se tenha seções espessas e mais finas, conduzindo a diferentes contrações do material.

Uma outra variável que pode afetar na formação de tensões residuais é a temperatura de desmoldagem da peça. Este processo sendo feito a quente impõe grandes gradientes térmicos na peça, favorecendo a geração de tensões residuais.

Tensões residuais podem causar grandes problemas para as peças, diminuindo a sua resistência efetiva e conduzindo a deformações durante a sua usinagem, o que modifica as dimensões da peça.

Este tratamento térmico consiste então na exposição do material em altas temperaturas durante um período para que as tensões residuais sejam superiores ao limite de escoamento do material, fazendo com que as tensões sejam aliviadas através da deformação plástica. A quantidade de elementos de liga do material faz com que necessite uma maior temperatura para alívio de tensões.

### **2.2.8.2 Recozimento de decomposição de carbonetos**

Em peças brutas de fundição a formação de carbonetos é muito comum, especialmente em peças com espessuras finas, que solidificam rapidamente.

As consequências da formação de carbonetos no material são a redução do alongamento e usinabilidade, fazendo com que seja necessário empregar um tratamento térmico de decomposição de carbonetos. Neste processo, ocorre a seguinte transformação de fase:



A temperatura para este processo depende da quantidade de carbonetos existentes no material e da quantidade de elementos de liga da peça, pois cada um deles influencia de uma forma diferente na decomposição da cementita.

### **2.2.8.3 Recozimento de ferritização**

Este tratamento tem como objetivo a obtenção de uma matriz completamente ferrítica, sendo aplicado quando isto não foi alcançado durante a produção da peça na sua forma bruta de fundição. Para este processo, existem diferentes ciclos térmicos: recozimento pleno, subcrítico e dentro da zona crítica.

No recozimento pleno ocorre a austenitização da peça, seguida de resfriamento lento através da zona crítica, resultando então na matriz ferrítica.

No recozimento subcrítico a cementita decompõe-se da perlita. Este tipo é utilizado quando a quantidade de perlita a se decompor é baixa, tendo o tempo de recozimento estabelecido em função da composição química do material e da espessura da peça.

No recozimento dentro da zona crítica acontece a austenitização parcial do material, seguida de um resfriamento lento, fazendo com que a cementita se decomponha da perlita.

### **2.2.8.4 Normalização**

Este tratamento térmico tem como objetivo aumentar a resistência mecânica do material ou homogeneizar as propriedades mecânicas da peça. Pode ser realizado através de 3 diferentes ciclos térmicos: Normalização em um estágio, normalização seguida de recozimento e normalização dentro da zona crítica.

Na normalização em um estágio aplica-se a austenitização da peça, seguida de resfriamento, atingindo a microestrutura e dureza desejada. Tem como resultado uma microestrutura com perlita e ferrita, tendo a quantidade dependente da velocidade de resfriamento.

Na normalização seguida de recozimento realiza-se a austenitização do material, seguida de um resfriamento ao ar ambiente, o que resulta em uma matriz completamente de perlita, com alta dureza.

Na normalização dentro da zona crítica ocorre a austenitização parcial da peça, seguido de resfriamento forçado, que resulta na transformação da austenita em perlita.

### **2.2.8.5 Têmpera**

Tem como objetivo aumentar a resistência mecânica e resistência ao desgaste do material. Este tratamento envolve a austenitização seguida de resfriamento rápido. A temperabilidade, característica necessária para obtenção da têmpera, pode ser aumentada com a utilização de elementos de liga específicos para cada tipo de material, como o manganês, níquel e molibdênio para os ferros fundidos nodulares (Guesser, 2009).

### **2.2.8.6 Têmpera superficial**

Este tratamento é utilizado com o objetivo de alcançar um aumento na resistência superficial do material, fazendo com o seu núcleo tenha a tenacidade necessária para determinada aplicação.

Uma pequena camada do material é austenitizada, formando uma camada de martensita na superfície.

### **2.2.9 Tipos de ferros fundidos**

Inicialmente, a classificação dos ferros fundidos deu-se por conta da sua fratura e, diante disso, dois tipos de ferros fundidos foram reconhecidos:

- Ferro fundido branco: devido à solidificação metaestável, a superfície desta fratura é branca e cristalina, pois ocorre junto às placas de carboneto de ferro;
- Ferro fundido cinzento: a fratura ocorre próximo às placas de grafita, exibindo uma superfície cinzenta, sendo resultado da solidificação estável.

Com o avanço dos estudos metalográficos, foi possível obter a classificação de diferentes ferros fundidos.

De acordo com Guesser (Guesser, 2009), os ferros fundidos são classificados em diferentes famílias, especialmente em relação com a forma da grafita. As principais famílias de ferros fundidos são:

- Ferro Fundido Nodular;
- Ferro Fundido Cinzento;

- Ferro Fundido Maleável;
- Ferro Fundido Vermicular;
- Ferro Fundido Branco.

## 2.3 Ferro Fundido Nodular

### 2.3.1 Definição

Os ferros fundidos nodulares são conhecidos pela sua grafita ser em formato de nódulos, conforme ilustrado na figura 06, tendo a ductilidade como principal característica mecânica. Por essa excelente propriedade, o ferro fundido nodular tem se destacado nas aplicações de engenharia, substituindo, além dos outros tipos de ferros fundidos, também os aços fundidos e forjados.

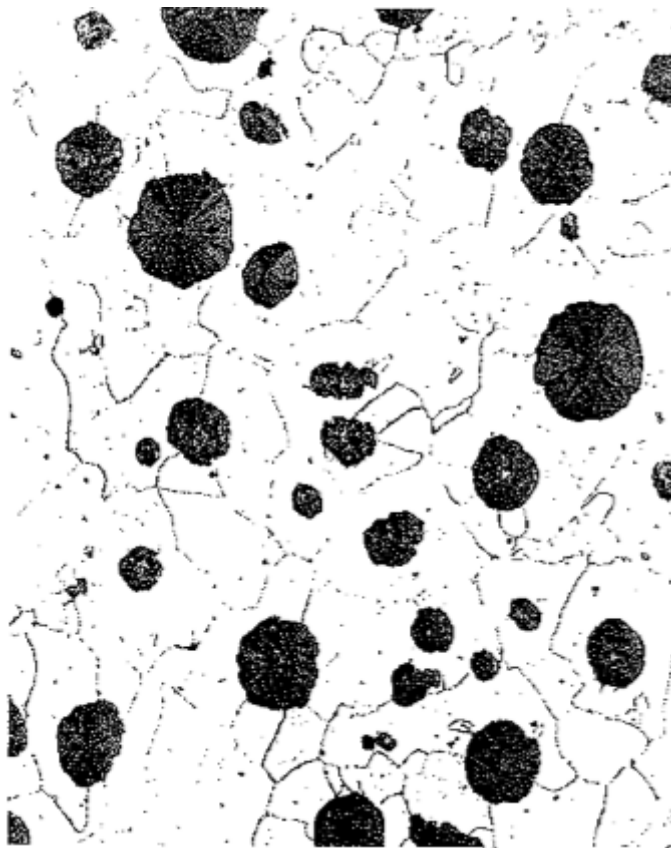


Figura 06 – Microestrutura ferro fundido nodular

Fonte: Callister, 2000

### 2.3.2 Processos de obtenção

A obtenção da grafita nodular nos ferros fundidos pode ser dada de diferentes maneiras, porém a mais comum nas indústrias é a adição de uma quantidade controlada de magnésio, que tem como objetivo a nodularização do ferro fundido.

Para um ferro fundido nodular de qualidade, deve-se ter como objetivo principal a formação de maiores quantidades de nódulos, pois quanto maior este número, melhor será o material. Um exemplo de melhoria se dá no fato de que, com o aumento da quantidade de grãos, a resistência ao alongamento do ferro fundido aumenta consideravelmente.

O método mais utilizado nas indústrias para a obtenção do ferro fundido nodular é através do processo “Tundish Cover”, que consiste em mergulhar uma quantidade determinada de material nodularizante dentro de uma panela de ferro líquido, conforme ilustrado na figura 07.

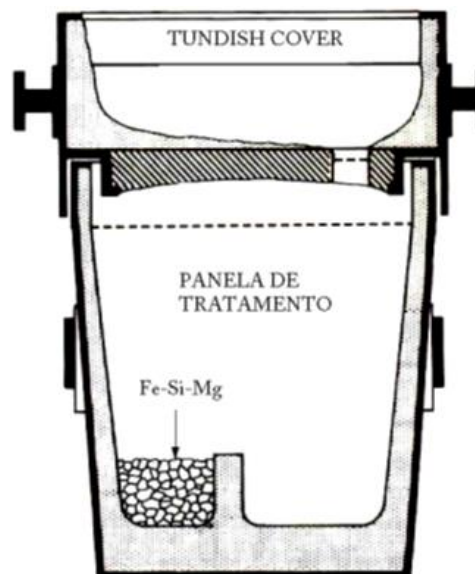


Figura 07 – Ilustração processo Tundish Cover

Fonte: Autor

### 2.3.3 Componentes químicos

Basicamente o ferro fundido nodular contém os mesmos componentes químicos de outros ferros fundidos, com a diferença para o elemento nodularizante, sendo o magnésio como o mais utilizado. A tabela 02 apresenta a quantidade de cada elemento permitido para a fabricação de um ferro fundido nodular.

Tabela 02 – Componentes químicos do ferro fundido nodular

Tipo	C,%	Si,%	Mn,%	P%	S,%	Ni,%	Cu,%	Cr,%	Mo,%	Sn,%
1	4,0 máx.	1,7/2,8	0,25/0,50	0,10 máx.	0,01 máx.	1,0/3,0	1,50	0,3	0,3	0,10
2	4,0 máx.	1,6/2,8	0,30	0,10 máx.	0,01 máx.	0,5	0,15	0,1	0,1	0,02
3	4,0 máx.	2,5 máx.	0,20	0,05 máx.	0,01 máx.	0,8	—	—	—	—
4	4,0 máx.	2,1 máx.	0,10 máx.	0,03 máx.	0,01 máx.	—	—	—	—	—

Fonte: Chiaverini, 2007

### 2.3.4 Classificação

De acordo com a norma NBR 6916:2017, o ferro fundido nodular é classificado em diferentes tipos, tendo a sua designação constituída por duas letras e cinco números. Os três primeiros números da classe correspondem à resistência à tração do material, medida em MPa e, as duas últimas letras, são os valores percentuais do alongamento do ferro fundido nodular.

Desta forma, o ferro fundido nodular é classificado como:

- FE 38017;
- FE 42012;
- FE 50007;
- FE 60003;
- FE 70002;
- FE 80002.

### 2.3.5 Propriedades mecânicas

A ductilidade é uma propriedade essencial para o ferro fundido nodular, que o faz ser superior ao aço em algumas aplicações específicas, por seu baixo custo de produção e por atender a uma determinada demanda de trabalho. Os ferros fundidos nodulares com matrizes ferríticas podem ter seus limites de resistência com valores entre 380-450 MPa, enquanto nos de matriz perlíticas o limite de resistência pode alcançar a 900Mpa.

### 2.3.6 Aplicações

Com números expressivos em termos de resistência, as aplicações desses materiais são diversas, como em virabrequins, eixos, carcaças, componentes hidráulicos, como tubulações e válvulas, engrenagens, entre outros. A tabela 03 mostra as diversas aplicações para o ferro fundido nodular.

Tabela 03 – Aplicações ferro fundido nodular

Especificação N°	Classe	Usos gerais	Aplicações típicas
ASTM A 395 ASME SA 395	60-40-18	Componentes para pressão para emprego a altas temperaturas.	Válvulas e aplicações para equipamento de vapor e da indústria química.
ASTM A 476 SAE AMS 5316	80-60-03	Equipamento de fábricas de papel, até temperaturas de 230°C.	Cilindros de secagem de fábricas de papel.
ASTM A 536	60-40-18	Partes para resistência ao choque; serviços para baixas temperaturas.	Válvulas e corpos de bombas de pressão.
	65-45-12	Serviços gerais.	Componentes de máquinas sujeitos a cargas de choque e fadiga.
	80-55-06	Serviços gerais.	Virabrequins, engrenagens e rolamentos.
	100-70-03	Melhor combinação de resistência mecânica e ao desgaste e à tempera superficial.	Engrenagens e componentes de máquinas para suportar elevados esforços.
	120-90-02	Mais elevadas resistência mecânica e ao desgaste.	Pinhões, engrenagens, rolamentos etc.
SAE J 434	D 4018	Componentes mecânicos sob cargas moderadas, exigindo boas ductilidade e usinabilidade	Articulações de direção.
	D4512		Calibres de freios a disco.
	D 5506	Componentes sujeitos a tensões elevadas, exigindo boa tenacidade.	Virabrequins
	D 7003	Componentes sujeitos a tensões elevadas, exigindo muito boa resistência ao desgaste e reação ao endurecimento parcial.	Engrenagens
	DQ & T	Componentes sujeitos a tensões elevadas, exigindo uniformidade de microestrutura e controle rigoroso de propriedades.	Braços de balancim.

Fonte: Chiaverini, 2007

## 2.4 Ferro Fundido Vermicular

Este material tem como principal curiosidade o fato de ter sido descoberto após erros de composição química na fabricação do ferro fundido nodular, no qual níveis insuficientes de cério e magnésio foram adicionados durante o seu processo de fabricação. Devido a isso, foi produzido um material com a grafita em forma de veios.

### 2.4.1 Definição

O ferro fundido vermicular tem a sua grafita em forma de veios, conforme ilustrado na figura 08 sendo intermediária entre o ferro fundido cinzento e o nodular. Assim como o nodular, este material precisa que elementos químicos, como por exemplo o magnésio e/ou cério sejam adicionados durante o processo para que a microestrutura citada seja obtida, porém, é necessário que haja um controle para produzir esta microestrutura, a fim de obter grafitas em forma de veios e, ao mesmo tempo, se limite ao grau de nodularidade (Callister, 2016).

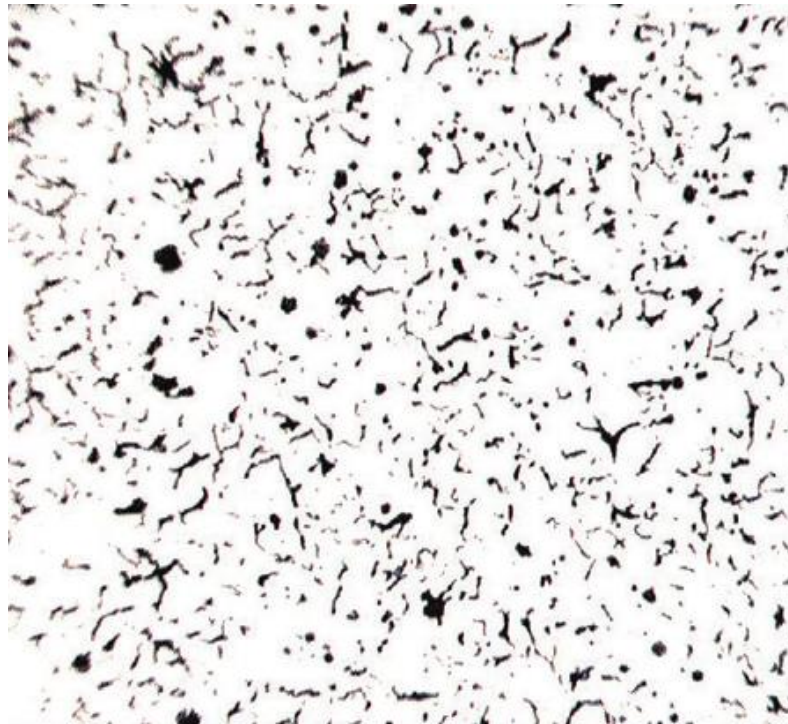


Figura 08 – Microestrutura ferro fundido vermicular

Fonte: Fundição e Serviços, 2007

### 2.4.2 Propriedades mecânicas

Assim como em outros ferros fundidos, as propriedades mecânicas obtidas neste material estão diretamente relacionadas à sua microestrutura. Para uma maior resistência do material, devemos aumentar o grau de nodularidade das partículas de grafita, devendo ter no máximo 20% de grafita nodular segundo a norma ISO. Os ferros fundidos vermiculares com matrizes ferríticas apresentam valores de ductilidade maiores em comparação com as matrizes perlíticas. A tabela 04 mostrada abaixo apresenta valores comparativos de diferentes propriedades.

Tabela 04 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos

Propriedade	Ferro Cinzento	Ferro Vermicular	Ferro Nodular
Resistência à Tração [MPa]	250	450	750
Módulo de Elasticidade [GPa]	105	145	160
Resistência à Fadiga [MPa]	110	200	250
Condutividade Térmica [W/m <sup>2</sup> K]	47	37	28

Fonte: Indústrias de Fundição Tupy, 2011

### 2.4.3 Aplicações

O ferro fundido vermicular pode ser aplicado em distintas funções, dependendo da sua propriedade específica. Em comparação com outros ferros fundidos, este tipo de material apresenta uma certa vantagem em relação a sua tecnologia e economia. Atualmente, o ferro fundido vermicular é aplicado em equipamentos importantes, entre eles (CALLISTER, 2016):

- blocos de motores diesel;
- distribuidores de exaustão;
- carcaças de caixas de engrenagem;
- discos de freio para trens;
- volantes de motores.

#### 2.4.4 Classificação

As normas internacionais JIS G5502: 2001, ASTM A247: 2006 e ISO 945: 2008 classificam esta liga através da forma e tipo da sua grafita.

O ferro fundido vermicular é classificado como Tipo III de acordo com a norma ISO 945:2008, como mostrado na figura 09.

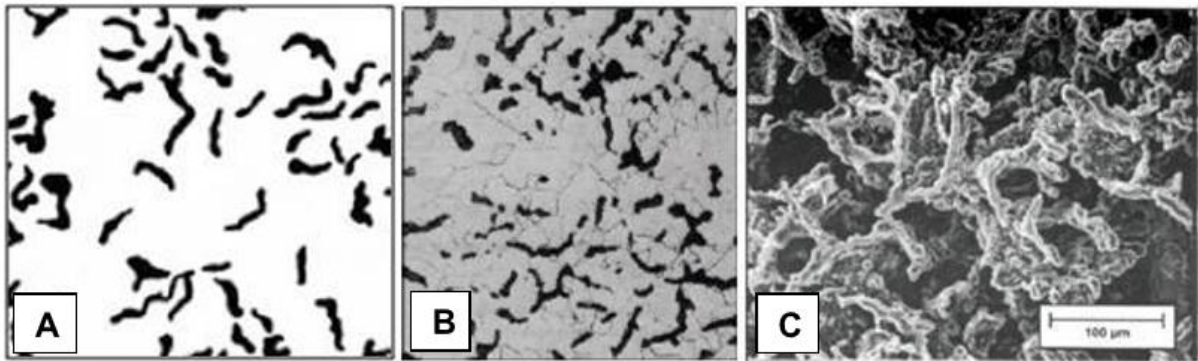


Figura 09 - Ferro fundido vermicular. (A) Grafita Forma III segundo ISO 945, 2008. (B) Micrografia óptica do ferro fundido vermicular atacada com nital. (C) Microscopia Eletrônica de Varredura do ferro fundido vermicular após ataque profundo

Fonte: Guessser, 2002

Em 2006, a ISO determinou a abreviação “GJV” para os ferros fundidos vermiculares, classificando-o em cinco classes distintas de acordo com o seu limite mínimo de resistência a tração:

- GJV 300 (ferrítico);
- GJV 350;
- GJV 400;
- GJV 450 (perlítico);
- GJV 500 (ligado).

A tabela 05 apresenta as propriedades mecânicas do ferro fundido vermicular de acordo com cada classe.

<b>Classe</b>	<b>Resistência a Tração (MPa)</b>	<b>Resistência ao Escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Dureza Brinell (resultados típicos)</b>
<b>EN-GJV-300</b>	300-375	220-295	1,5	140-210
<b>EN-GJV-350</b>	350-425	260-335	1,5	160-220
<b>EN-GJV-400</b>	400-475	300-375	1,0	180-240
<b>EN-GJV-450</b>	450-525	340-415	1,0	200-250
<b>EN-GJV-500</b>	500-575	380-455	0,5	220-260

Tabela 05 – Classes de ferro fundido vermicular, de acordo com a norma VDG W50:2002

Fonte: (GUESSER, 2009)

## 2.5 Ferro Fundido Cinzento

### 2.5.1 Definição

O ferro fundido cinzento tem como característica principal ter a grafita em forma de flocos, sendo envolvido por uma matriz do tipo ferrítica ou perlítica, como pode ser observado na figura 07. Por conta dessa grafita em forma de flocos, quando uma superfície deste material é fraturada, a mesma aparece na cor acinzentada, justificando o seu nome (Callister, 2012).

Este material é o mais utilizado entre as ligas fundidas por conta das suas características mecânicas (Chiaverini, 2005):

- Fácil fusão e moldagem;
- Boa resistência mecânica;
- Excelente usinabilidade;

- Boa resistência ao desgaste;
- Boa capacidade de amortecimento.



Figura 10 – Microestrutura ferro fundido cinzento.

Fonte: CALLISTER, 2002

### 2.5.2 Composição química

Para o ferro fundido cinzento, a composição química é muito aproximada ao de outros fundidos, tendo como variação apenas a quantidade de cada elemento. De acordo com Chiaverini (2005), a composição química deste material está em uma faixa ampla de utilização:

- 2,00 a 4,00 %C;
- 1,00 a 3,00 %Si;
- 0,3 a 1,00 %Mn;
- 0,10 a 1,00 %S;

- 0,05 a 0,25 %P.

### 2.5.3 Classificação

O ferro fundido cinzento é classificado de acordo com a sua composição química e propriedades mecânicas, no qual são apresentadas nas tabelas 06 e 07, respectivamente.

Tabela 06 – Classificação em relação à composição química

Classe ASTM	Composição química (%)				
	C	Si	Mn	P	S
<b>20</b>	3,10-3,80	2,20-2,60	0,50-0,80	0,20-0,80	0,08-0,13
<b>25</b>	3,00-3,50	1,90-2,40	0,50-0,80	0,15-0,50	0,08-0,13
<b>30</b>	2,90-3,40	1,70-2,30	0,45-0,80	0,15-0,30	0,08-0,12
<b>35</b>	2,80-3,30	1,60-2,20	0,45-0,70	0,10-0,30	0,06-0,12
<b>40</b>	2,75-3,20	1,50-2,20	0,45-0,70	0,07-0,25	0,05-0,12
<b>50</b>	2,55-3,10	1,40-2,10	0,50-0,80	0,07-0,20	0,06-0,12
<b>60</b>	2,50-3,00	1,20-2,20	0,50-1,00	0,05-0,20	0,05-0,12

Fonte: Chiaverini, 2007

Tabela 07 – Classificação em relação às propriedades mecânicas

Classe	Descrição
<b>FC-10 e FC-15</b>	Ferro fundido comum, com melhor usinabilidade e excelente fundibilidade
<b>FC-20 e FC-25</b>	Boa fundibilidade e usinabilidade. Possui melhor resistência mecânica
<b>FC-30 e FC-35</b>	Maior dureza e resistência mecânica
<b>FC-40</b>	É o que possui maior resistência mecânica

Fonte: Chiaverini, 2007

### 2.5.4 Propriedades mecânicas

Em trabalhos mecânicos, o ferro fundido cinzento se apresenta como pouco resistente e frágil quando colocados em esforços de tração. Isto acontece por conta da sua microestrutura ser em forma de veios, onde pode ocorrer altas taxas de concentração de tensão nas extremidades, podendo vir a ocasionar trincas e falhas no material. Em esforços de compressão, o ferro fundido cinzento consegue obter melhores resultados em relação à sua resistência e à sua ductilidade.

A tabela 08 apresenta os valores das propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento em relação à sua classe.

Tabela 08 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos

Classe	Diâmetro da barra de ensaio		Limite de resistência à tração (min.)		Dureza Brinell (máx.)
	Diâmetro –estado bruto de fundição (mm)	Diâmetro –usinada (mm)	Kgf/mm <sup>2</sup>	MPa	
FC10	30	20	10	100	201
FC15	13	8	23	230	241
	20	12,5	18	180	223
	30	20	15	150	212
	45	32	11	110	201
FC20	13	8	28	270	255
	20	12,5	23	230	235
	30	20	20	200	223
	45	32	16	160	217
FC25	13	8	33	320	269
	20	12,5	28	270	248
	30	20	25	250	241
	45	32	21	210	229

<b>FC30</b>	20	12,5	33	320	269
	30	20	30	290	262
	45	32	26	260	248
<b>FC35</b>	20	12,5	38	370	–
	30	20	35	340	227
	45	32	31	300	269
<b>FC40</b>	30	20	40	390	–
	45	32	36	350	–

Fonte: CHIAVERINI, 2007

### 2.5.5 Aplicações

Por conta das suas características mecânicas que, em muitos casos, são desejáveis, o FoFo cinzento é amplamente utilizado. Especialmente, este tipo de material é utilizado em situações que requerem resistência à vibração, como por exemplo em bases de máquinas e equipamentos pesados que são colocados em trabalho vibracional (Callister, 2016).

Além disso, este material apresenta uma boa fluidez quando colocado em temperatura de fundição, o que permite a fabricação de peças complexas. Em relação ao seu custo, é considerado um dos materiais metálicos mais baratos que existem no mercado.

A tabela 09 apresenta diferentes aplicações do ferro fundido cinzento para cada classe designada.

Tabela 09 – Aplicações ferro fundido cinzento

<b>Classe</b>	<b>Aplicação</b>
<b>FC-10 e FC-15</b>	Base de máquinas, carcaças metálicas e aplicações semelhantes.
<b>FC-20 e FC-25</b>	Elementos estruturais tais como cabeçotes, barramentos e mesas de máquinas operatrizes.
<b>FC-30 e FC-35</b>	Pequenos virabrequins, engrenagens, base pesada de máquinas, buchas, colunas de máquinas e grandes blocos de motor.
<b>FC-40</b>	Utilização limitada a peças de espessuras médias e grossas

Fonte: Chiaverini, 2007

## 2.6 Ferro Fundido Branco

### 2.6.1 Definição

O ferro fundido branco é definido como um material que não contém grafita em sua microestrutura, possuindo baixo teor de silício e tendo o carbono existente em forma de carboneto de ferro,  $Fe_3C$ .

Na figura 11, podemos observar como a Cementita aparece na microestrutura do material, sendo envolvida por perlita em forma de lamelas.



Figura 11 – Microestrutura ferro fundido branco

Fonte: CALLISTER, 2002

### **2.6.2 Fatores para obtenção do Ferro Fundido Branco**

Alguns fatores durante o processo produtivo são essenciais para a obtenção de um ferro fundido branco de qualidade. Para a composição química do material, os principais fatores que influenciam são:

- Teores de silício e carbono;
- Velocidade de resfriamento.

Estes fatores devem estar bem alinhados durante o processo produtivo, pois são extremamente importantes. Para isso, é utilizado o sistema de coquilha, no qual o metal líquido é derramado em moldes metálicos e são deixados em condições de resfriamento específicas, fazendo com que a grafitização seja extinta deste material.

Além disso, outros fatores externos influenciam na fabricação deste material:

- Temperatura de vazamento;
- Temperatura de coquilhamento;
- Espessura da peça fabricada;
- Tempo no qual o metal está em contato com a coquilha.

### **2.6.2 Propriedades mecânicas**

As propriedades mecânicas deste material são condicionadas de acordo com a quantidade de cementita presente na sua microestrutura, fazendo com que tenha características específicas de trabalho:

- Alta resistência ao desgaste;
- Baixos valores de tenacidade e ductilidade;
- Em esforços de tração, possuem baixa resistência;
- Elevada resistência à compressão;
- Absorção de vibrações;
- Difícil usinagem.

### 2.6.3 Classificação

O ferro fundido branco é classificado conforme a sua composição química, tendo também diferentes tipos de moldagem, conforme apresentado na tabela 10.

Tabela 10 – Classificação ferro fundido branco

Classe	Dureza Brinell	Tipo de moldagem ou tratamento térmico	Composição química (%)									
				Ci	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	Outros	
<b>I Tipo A</b>	500 600	Areia Coquilha	min. max.	3,0 3,6	0,8	1,3	3,3 5,0	1,4 4,0	1,0	0,15	0,30 P	
<b>I Tipo B</b>	550 600	Areia Coquilha	min. max.	2,5 3,0	0,8	1,3	3,3 5,0	1,4 4,0	1,0	0,15	0,30 P	
<b>I Tipo C</b>	550 600	Areia Coquilha	min. max.	2,9 3,7	0,8	1,3	2,7 4,0	1,1 1,5	1,0	0,15	0,30 P	
<b>I Tipo D</b>	550 600	Areia Coquilha	min. max.	2,5 3,6	1,0 2,2	1,3	5,0 7,0	7,0 11,0	1,0	0,15	0,10 P	
<b>II Tipo A</b>	550 600	Areia Temperada	min. max.	2,4 2,8	1,0	0,5 1,5	0,5	11,0 14,0	0,5 1,0	0,06	0,10 P; 1,2 Cu	
<b>II Tipo B</b>	450 600	Areia Temperada	min. max.	2,4 2,8	1,0	0,5 1,5	0,5	14,0 18,0	1,0 3,0	0,06	0,10 P; 1,2 Cu	
<b>II Tipo C</b>	550	Areia Temperada	min. max.	2,8 3,6	1,0	0,5 1,5	0,5	14,0 18,0	2,3 3,5	0,06	0,10 P; 1,2 Cu	
<b>II Tipo D</b>	450 600	Areia Temperada	min. max.	2,0 2,6	1,0	0,5 1,5	1,5	18,0 23,0	1,5	0,06	0,10 P; 1,2 Cu	
<b>II Tipo E</b>	450 600	Areia Temperada	min. max.	2,6 3,2	1,0	0,5 1,5	1,5	18,0 23,0	1,0 2,0	0,06	0,10 P; 1,2 Cu	
<b>III Tipo A</b>	450 600	Areia Temperada	min. max.	2,3 3,0	1,0	0,5 1,5	1,5	23,0 28,0	1,5	0,06	0,10 P; 1,2 Cu	

Fonte: Chiaverini, 2007

### 2.6.4 Aplicações

As aplicações para este tipo de material ficam restritas às suas características mecânicas, sendo mais utilizado em equipamentos que necessitam de uma superfície dura e resistente à abrasão, como por exemplo os cilindros de laminação em laminadores (Callister, 2012).

## **2.8 Dureza**

### **2.8.1 Aspectos da dureza**

A dureza do material mede o quanto é a sua resistência a uma deformação plástica localizada e os ensaios de dureza são amplamente utilizados em relação a outros ensaios mecânicos (Callister, 2016), pois:

- São simples e baratos: os corpos de prova não precisam ser preparados e os equipamentos de medição são relativamente baratos;
- Ensaio não-destrutivo: para o ensaio, o corpo de prova não precisa ser fraturado, tendo apenas uma pequena indentação em sua superfície;
- Outras propriedades mecânicas do material podem ser obtidas através deste ensaio.

### **2.8.2 Técnicas de medição**

#### **2.8.2.1 Ensaios de Dureza Rockwell**

Este ensaio é o método mais utilizado para se medir a dureza de um material, pelo fato de ter uma simples aplicação e, principalmente, por não necessitar de habilidades especiais por parte do técnico de laboratório.

Existem dois tipos de ensaios: Rockwell e Rockwell superficial. Para o ensaio Rockwell, as cargas são maiores do que os ensaios de dureza superficiais. As tabelas 11 e 12, apresentam os valores de cargas para cada símbolo utilizado na escala do ensaio.

Com a variedade de indentadores e cargas, este ensaio pode ser aplicado em praticamente todas as ligas metálicas, podendo ser feito também em alguns polímeros. Os indentadores podem ser fabricados com esferas de aço endurecidas, com diferentes tamanhos e, para materiais mais duros, é usado um indentador cônico de diamante.

Tabela 11 – Escalas de Dureza Rockwell

<b><i>Símbolo da Escala</i></b>	<b><i>Indentador</i></b>	<b><i>Carga Principal (kg)</i></b>
A	Diamante	60
B	Esfera com 1/16 in	100
C	Diamante	150
D	Diamante	100
E	Esfera com 1/8 in	100
F	Esfera com 1/16 in	60
G	Esfera com 1/16 in	150
H	Esfera com 1/8 in	60
K	Esfera com 1/8 in	150

Fonte: Callister, 2016

Tabela 12 – Escalas de Dureza Rockwell Superficial

<b><i>Símbolo da Escala</i></b>	<b><i>Indentador</i></b>	<b><i>Carga Principal (kg)</i></b>
15N	Diamante	15
30N	Diamante	30
45N	Diamante	45
15T	Esfera com 1/16 in	15
30T	Esfera com 1/16 in	30
45T	Esfera com 1/16 in	45
15W	Esfera com 1/8 in	15
30W	Esfera com 1/8 in	30
45W	Esfera com 1/8 in	45

Fonte: Callister, 2016

Alguns cuidados devem ser tomados para que imprecisões não sejam causadas durante a realização do teste. Para que isso não aconteça, a espessura do corpo de prova no qual será realizado o ensaio deve ser de pelo menos 10 vezes a profundidade de indentação (Callister, 2016).

Também deve-se ter o cuidado com a borda da superfície da amostra, pois uma indentação realizada neste local poderá resultar em resultados duvidosos. Por

fim, o cuidado com a superfície do corpo de prova é importante para um correto ensaio, visto que a mesma deve estar plana e lisa.

### **2.8.2.2 Ensaio de Dureza Brinell**

No ensaio de dureza Brinell também é utilizado um indentador esférico e duro e este é forçado contra a superfície do metal que está sendo feito a análise. Neste caso, a carga de prova é mantida por um tempo em contato com a superfície, aproximadamente de 10 a 30 segundos e a carga aplicada varia de acordo com a especificação do material.

Como exigências para a superfície, há uma similaridade com o ensaio Rockwell, visto que para este tipo de ensaio, deve-se ter o cuidado com a planicidade e limpeza da superfície, além da posição para se realizar a indentação.

## **2.9 Resistência à Tração**

### **2.9.1 Aspectos da tração**

A resistência à tração de um material é um importante fator na escolha de materiais para determinadas aplicações. O limite de resistência à tração é a tensão no ponto máximo da curva de tensão-deformação (Callister, 2016). Quando um material é colocado sob tração, ocorrem diferentes fases até a sua ruptura e, o limite de resistência à tração é o valor máximo de tensão que determinado material suportará para uma específica carga de trabalho. Com esta carga aplicada, após a tensão máxima, ocorrerá a fratura do material. O ponto M da figura 12 ilustra onde será o ponto máximo de tensão que um material suportará quando estiver em carregamento.

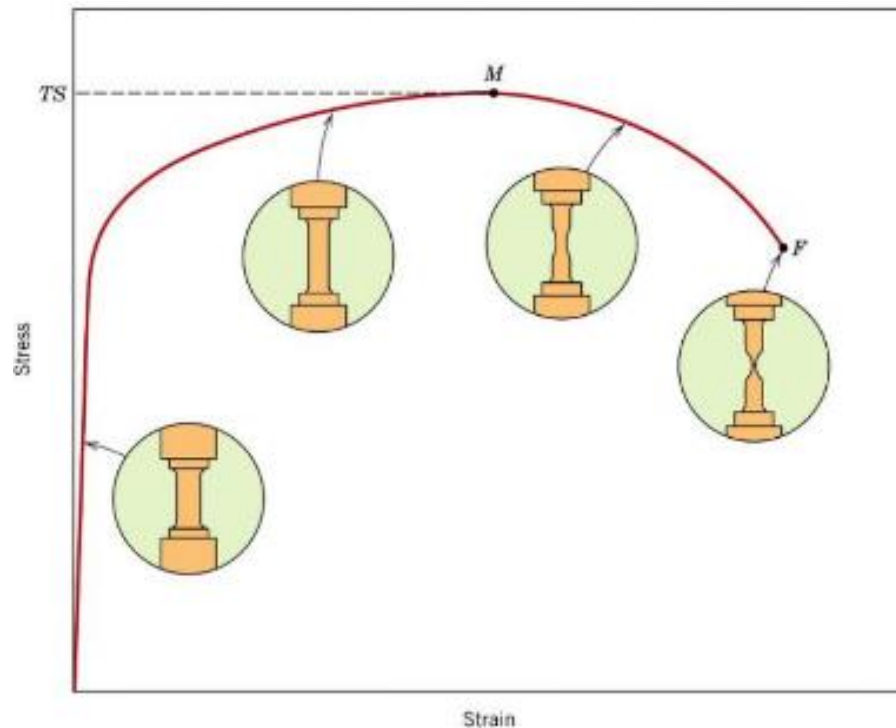


Figura 12 – Ilustração do comportamento da curva tensão-deformação.

Fonte: Callister, 2002

### 2.9.2 Técnicas de medição

Para obtenção dos valores de resistência à tração dos materiais, é realizado um ensaio de tração, o qual é um dos mais comuns ensaios para determinação de propriedades mecânicas dos materiais. Este ensaio consiste em deformar o corpo de prova até a sua ruptura, aplicando uma carga de tração uniaxial ao eixo do corpo de prova, que aumenta gradativamente em relação ao tempo, conforme ilustra a figura 13.

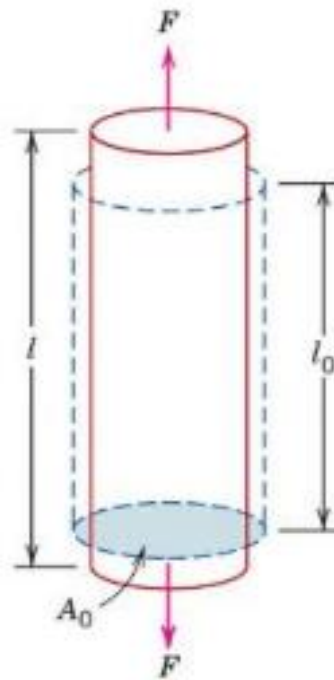


Figura 13 – Ilustração da carga de tração em um corpo de prova

Fonte: Callister, 2002

O corpo de prova geralmente é de forma circular, tendo uma pequena redução no meio do corpo de prova, a fim de confinar a deformação na região central da peça e evitar que fraturas ocorram nas extremidades do material. Ele é fixado pelas suas extremidades com as garras de fixação do equipamento que realiza os ensaios de tração.

O resultado do ensaio geralmente é registrado por um computador como carga ou força em função do alongamento e, além disso, reproduz automaticamente o gráfico de tensão-deformação, ilustrado pela figura 14.

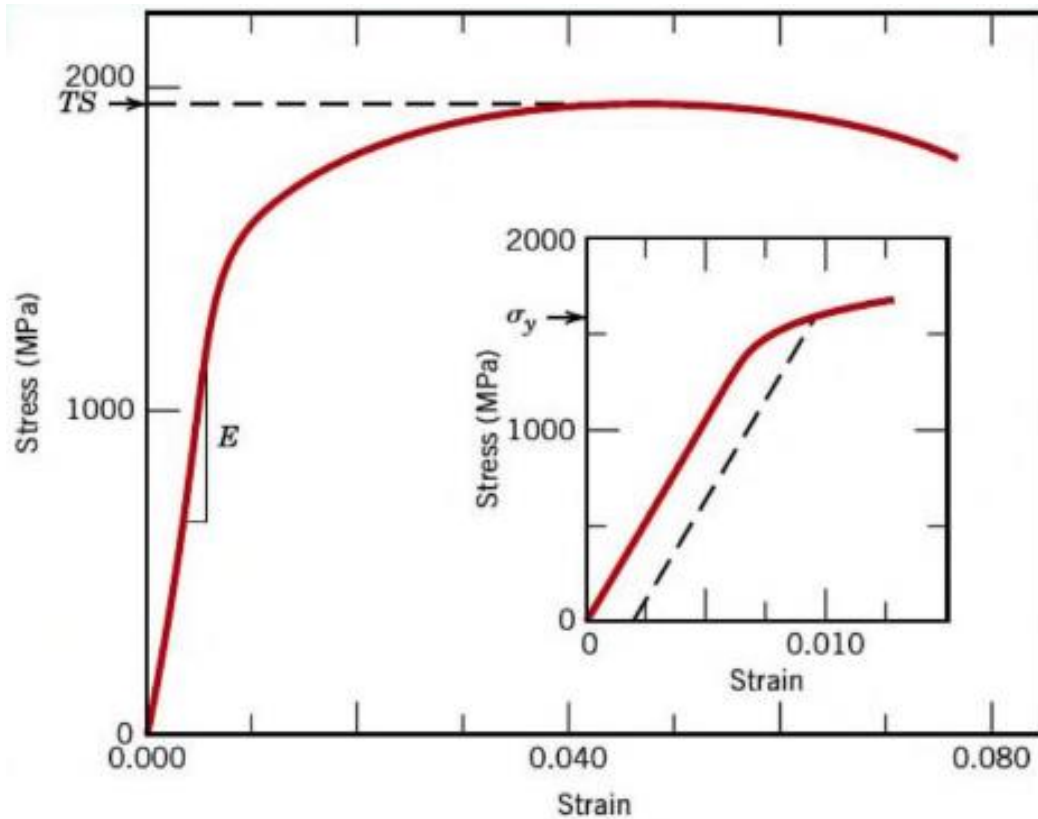


Figura 14 – Exemplo Gráfico Tensão-Deformação

Fonte: Callister, 2016

## 2.10 Ductilidade

### 2.10.1 Aspectos da Ductilidade

Esta é uma importante propriedade mecânica dos materiais, que também pode ser considerada como o alongamento do material. A ductilidade pode ser definida como a habilidade do material em acomodar deformações não elásticas sem ruptura (Guessser, 2009).

Esta é uma propriedade física dos materiais que pode ser conhecida através da realização do ensaio de tração, onde também se obtém os resultados de resistência à tração e limite de escoamento do determinado material ensaiado.

A figura 15 ilustra um gráfico tensão-deformação de um material frágil e outro dúctil, que permite a conclusão da diferença entre essas duas propriedades.

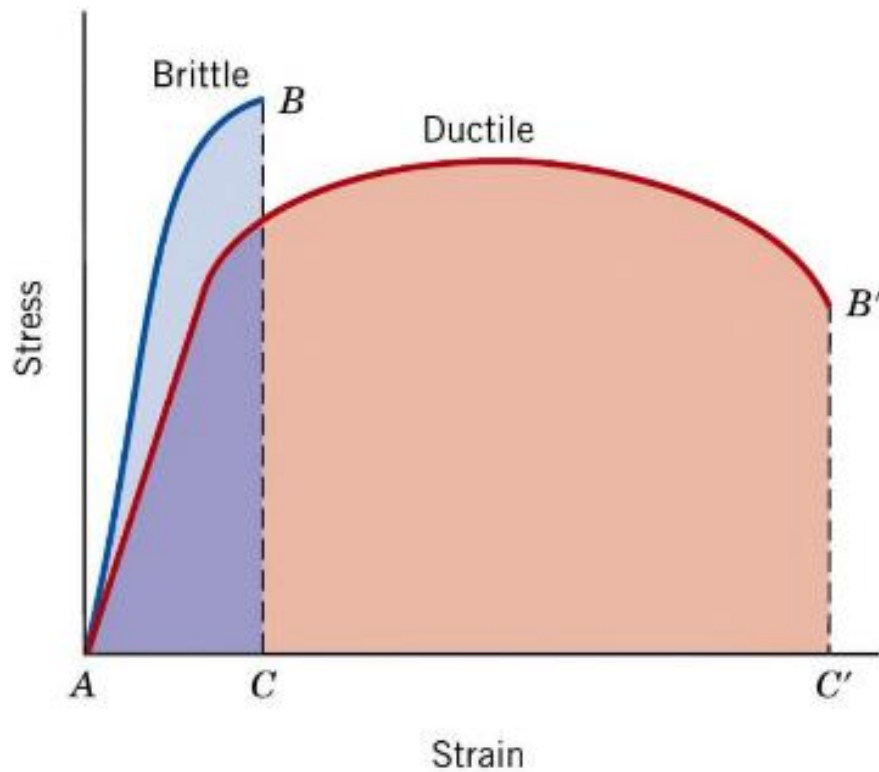


Figura 15 – Comparação entre material frágil e dúctil

Fonte: Callister, 2016

### 2.10.2 Técnicas de medição

Para obtenção dos valores de ductilidade dos materiais, podemos representar de acordo com o alongamento percentual ou pela redução percentual da área na que foi obtido através do ensaio de tração. Temos então a seguinte expressão para definir o percentual de alongamento de um material:

$$AL\% = \left( \frac{l_f - l_o}{l_o} \right) \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo assim, temos  $l_f$  como sendo o comprimento final do corpo de prova após a realização do teste e  $l_o$ , o comprimento original do corpo de prova. Com estes dois resultados obtidos após a realização do ensaio, podemos obter o percentual de alongamento do material.

Além do percentual de alongamento do material, é possível calcular a ductilidade do material através da redução percentual da área do corpo de prova, que tem a seguinte equação:

$$RA\% = \left( \frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Como variáveis, temos  $A_o$  como sendo a área original do corpo de prova e  $A_f$ , a área onde ocorreu a fratura.

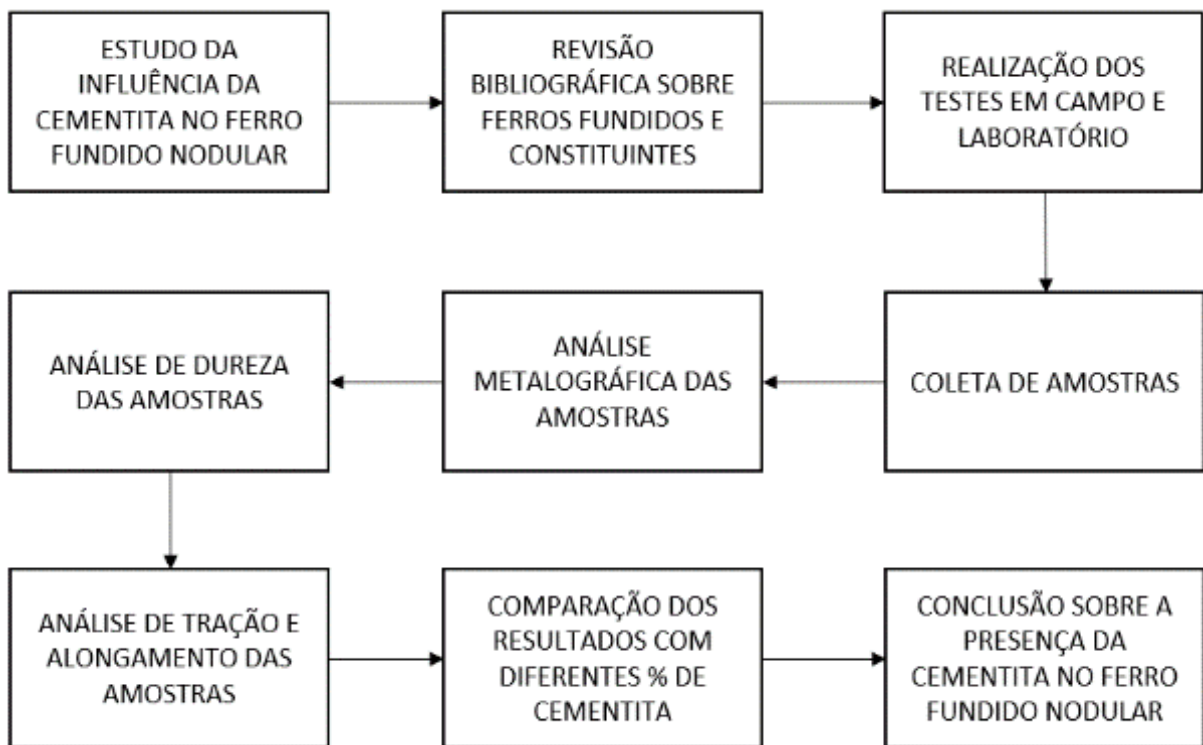
O conhecimento desta propriedade mecânica do material é de suma importância e temos duas razões para justificar esta importância (Guessser, 2009):

- A ductilidade indica ao projetista o grau ao qual uma estrutura irá se deformar plasticamente antes de se deformar;
- Esta propriedade especifica o grau de deformação permitido durante as operações de fabricação.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

No capítulo em questão são apresentadas as características do ferro fundido nodular, os materiais e métodos utilizados nas análises metalográficas e nos ensaios de dureza, tração e alongamento das amostras que foram realizados no interior da fábrica.

As amostras foram retiradas dos tubos de ferro fundido nodular que estavam refugados em um pátio aguardando destinação final. Os ensaios metalográficos e de dureza foram realizados com os tubos organizados no pátio e os ensaios de tração e alongamento foram realizados no laboratório da usina, tendo as amostras retiradas do corpo do tubo de ferro fundido nodular.



#### 3.1 Método Para Ensaio Metalográfico

O ensaio metalográfico é uma técnica muito utilizada em diversas indústrias para o controle da produção e, especialmente, nas análises de falhas ocorridas em um determinado produto fabricado. Com a metalografia, é possível analisar a microestrutura do material, fazendo com que sejam identificados os constituintes e estruturas presentes.

No projeto em questão, foi realizado o ensaio com microscopia ótica, na qual emprega-se um microscópio manual com uma luz que incide sobre a superfície da

amostra escolhida, possibilitando a análise da microestrutura com diferentes resoluções e ampliações, dependendo do tipo de microscópio utilizado.

Alguns aspectos devem ser considerados antes da realização dos testes, como o cuidado com a superfície da amostra, planicidade, polimento e arredondamento dos cantos, pois uma correta interpretação dos resultados obtidos depende muito da forma como a amostra é preparada.

### **3.1.1 Preparação da amostra**

Uma das tarefas mais importantes para se realizar uma correta análise metalográfica do material está na preparação da superfície da amostra, na qual consistem algumas fases a serem seguidas, com o objetivo de evitar falhas nos testes.

O primeiro passo consiste na escolha da área de análise, que varia de acordo com a dimensão do corpo de prova. Para a análise realizada, a preparação da superfície foi realizada com a atividade de esmerilhamento de uma amostra localizada a 1,5m (um metro e meio) em relação ao espelho da bolsa do tubo de ferro fundido nodular, como é mostrado na figura 16.

Com esta atividade, é possível remover as camadas superficiais da amostra, as quais são indesejadas na análise, por conter impurezas provindas do processo de fabricação.



Figura 16 - Amostra com superfície esmerilhada

Fonte: Autor

### 3.1.2 Lixamento da superfície

Após o esmerilhamento da superfície e consequente retirada de impurezas, deve-se realizar o lixamento da superfície da amostra, com o objetivo de obter uma camada plana no local que será realizado a análise metalográfica.

Para isto, foi utilizado um equipamento denominado de lixadeira manual, no qual as lixas de carboneto de silício (SiC) são coladas em um disco rotativo e deve-se girar por toda a superfície para obter uma planicidade da amostra.

A tabela 13 mostra a sequência de numeração das lixas utilizadas na atividade, tendo como início uma lixa de menor rugosidade.

Tabela 13 – Sequência de lixas utilizadas

Sequência de lixas utilizadas
Lixa nº 80
Lixa nº 320
Lixa nº 600

Fonte: Autor

### 3.1.3 Polimento da superfície

Após a realização das atividades anteriores e tendo a superfície da amostra plana e sem resíduos, deve-se realizar o polimento, a fim de obter uma camada com condições de ser analisada para resultados precisos.

Para esta atividade, foi utilizado uma folha de feltro, além de uma solução líquida chamada de alumina, que serve como abrasivo para o polimento. A superfície da amostra, conforme figura 17, deve estar com uma aparência especular e sem riscos perceptíveis a um aumento entre 100 e 200x.



Figura 17 – Superfície da amostra polida

Fonte: Autor

### 3.1.4 Ataque químico

O ataque químico na superfície da amostra tem como objetivo principal revelar a microestrutura do material, seus contornos de grão e constituintes, possibilitando, assim, a visualização e avaliação do interior do material.

De acordo com a figura 18, pode-se observar o ataque químico sendo realizado na superfície da amostra utilizando uma mistura de ácido nítrico e álcool, tendo como produto da mistura o Nital. Para as análises, foram misturadas 100ml de ácido para 1l de álcool etílico.



Figura 18 – Ataque químico realizado na superfície da amostra

Fonte: Autor

### 3.1.5 Análise Metalográfica

Utilizando um microscópio ótico manual, ilustrado pela figura 19, as superfícies das amostras tiveram suas microestruturas analisadas, o que permitiu a obtenção de diferentes percentuais de cementita nas amostras fabricadas em ferro fundido nodular.



Figura 19 – Microscópio ótico manual

Fonte: Autor

### 3.2 Método Para Ensaio de Dureza

Este ensaio tem como objetivo determinar a dureza superficial das amostras retiradas para que seja possível realizar uma avaliação em relação ao percentual de cementita em cada amostra e fazer uma comparação com a dureza.

A dureza é uma propriedade do material amplamente utilizada nas indústrias para controle de qualidade e comparação dos produtos fabricados, tendo como influência a composição química do material, microestrutura e processos de fabricação.

No ensaio realizado foi utilizado um durômetro portátil, conforme mostra a figura 20, no qual consiste uma ponta de diamante que, ao penetrar no material, emite um sinal para o aparelho, mostrando o valor da dureza da amostra na unidade Brinell.



Figura 20 – Durômetro portátil

Fonte: Autor

### **3.2.1 Preparação da amostra**

Assim como o exame metalográfico, o ensaio de dureza exige que a superfície da amostra tenha uma correta preparação, porém não sendo necessário realizar o polimento da mesma.

O aparelho de medição consiste em uma lança com a ponta em diamante, que penetra o material e emite o valor da dureza. Para isso, a camada da superfície da amostra não pode conter impurezas e imperfeições, para que o teste tenha resultados confiáveis.

### **3.2.2 Ensaio de dureza**

Com a superfície da amostra devidamente preparada, o ensaio de dureza foi realizado utilizando o durômetro portátil. O teste consiste primeiramente em uma pré carga para estabilização do penetrador e, após isso, uma força maior é imprimida no equipamento, fazendo com que a ponta de diamante penetrasse no material, tornando-se possível o conhecimento da dureza superficial da amostra.

### **3.3 Método Para Ensaio de Tração e Alongamento**

Este ensaio tem como objetivo a obtenção dos resultados de resistência à tração e percentual de alongamento de uma amostra retirada do corpo de um tubo fabricado em ferro fundido nodular. Foi utilizado uma máquina para ensaio de tração conforme visto na figura 21.

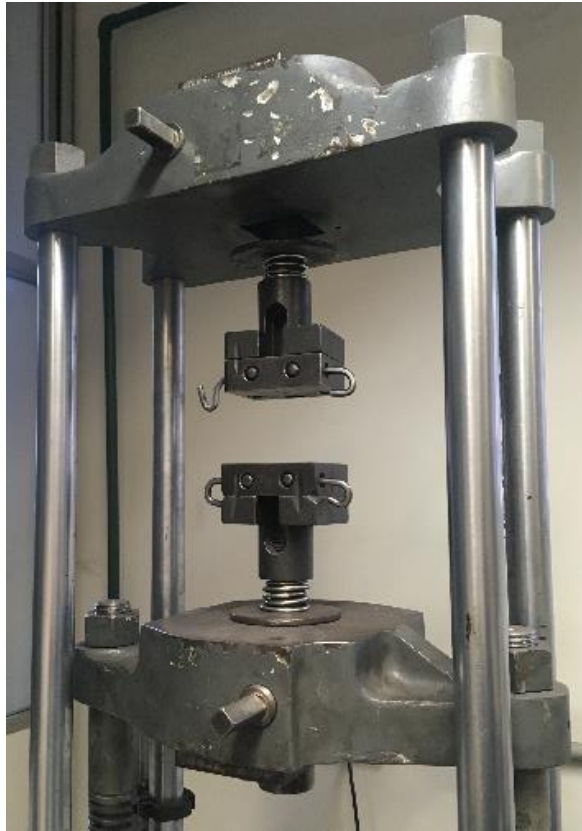


Figura 21 – Máquina para ensaio de tração

Fonte: Autor

### 3.3.1 Preparação da amostra

Inicialmente, o corpo de prova é recebido na sua forma bruta, conforme ilustrado na figura 22 e, por isso, necessita passar pelo processo de usinagem para ter o formato final padrão para o ensaio de tração (Figura 23). O seu meio precisa ser mais fino para que a fratura seja direcionada e não ocorra nas extremidades do corpo de prova.



Figura 22 – Corpo de prova bruto

Fonte: Autor



Figura 23 – Corpo de prova usinado padrão

Fonte: Autor

### 3.3.2 Ensaio de tração e alongamento

O ensaio de tração e alongamento consiste primeiramente na fixação do corpo de prova pelas suas extremidades no equipamento, conforme mostra a figura 24. O ensaio inicia com a programação da máquina pelo técnico de laboratório e uma força gradativa em relação ao tempo é imposta no corpo de prova no sentido axial ao mesmo. Simultaneamente, o programa utilizado em um computador plota o gráfico de tensão-deformação do material, mostrando os resultados de resistência à tração, alongamento do material e limite de escoamento. O ensaio é finalizado automaticamente após a fratura do corpo de prova do material (Figura 25).



Figura 24 – Corpo de prova fixado para ensaio de tração

Fonte: Autor



Figura 25 – Corpo de prova fraturado após ensaio de tração

Fonte: Autor

Para a obtenção dos resultados de alongamento do material, deve-se conhecer os comprimentos inicial e final do corpo de prova e, para isso, usa-se um paquímetro digital para realizar a medição.

Antes de realizar o ensaio, o corpo de prova deve ter o seu comprimento útil medido, ilustrado pela figura 26, a fim de conhecer o comprimento inicial e, após a realização do ensaio de tração, o corpo de prova deve ser novamente unido para obtenção do comprimento final.



Figura 26 – Medição do comprimento útil do corpo de prova

Fonte: Autor

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as tarefas realizadas nos ensaios, descritas no capítulo 3 deste trabalho, foi possível a obtenção de dados que permitiram a comparação do comportamento do ferro fundido nodular em relação ao percentual de cementita existente em cada amostra e às suas propriedades mecânicas, sendo microestrutura, dureza, tração e alongamento.

O presente capítulo apresenta tabelas e gráficos comparativos das propriedades mecânicas do ferro fundido nodular em relação ao percentual de cementita encontrado nas amostras.

##### 4.1 Exame Metalográfico

Para a obtenção dos resultados metalográficos, foi realizado uma análise microscópica na microestrutura do material, apresentando em forma de percentual a quantidade de cementita presente para uma determinada área de amostra.

A tabela 14 mostra os percentuais de cementita que foram obtidos após a realização das análises metalográficas nas amostras selecionadas. Estes resultados permitem a comparação com outras propriedades mecânicas do ferro fundido nodular.

Tabela 14 - Resultados dos percentuais de Cementita

Nº Amostra	Cementita (%)
1	10%
2	20%
3	30%
4	40%
5	50%
6	60%
7	70%
8	80%
9	90%

Fonte: Autor

Conforme as figuras apresentadas abaixo, podemos observar o aumento da quantidade de cementita na microestrutura do material que se apresenta em forma de veios brancos nas imagens.

A figura 27 apresenta uma amostra com microestrutura contendo 10% de cementita. Podemos observar a matriz ferrítica do material, contendo apenas alguns veios brancos.

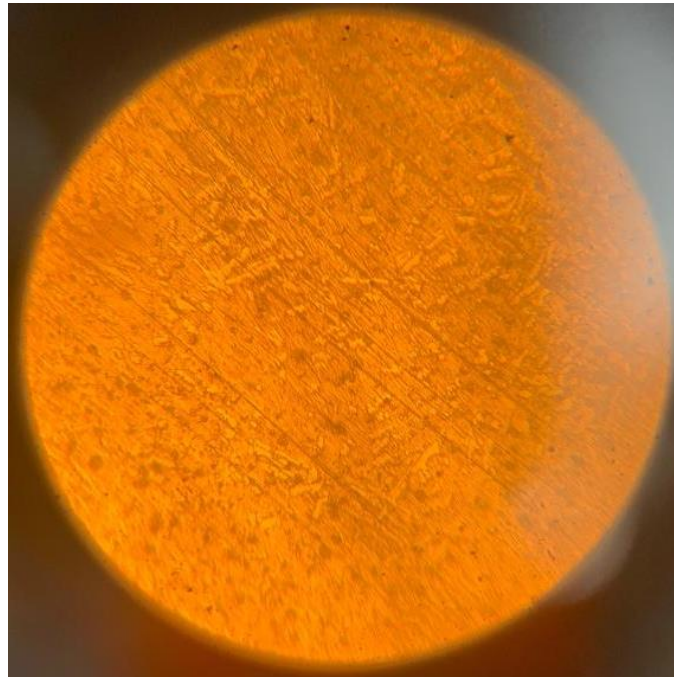


Figura 27 – Amostra com 10% de Cementita

Fonte: Autor

Conforme ilustrado na figura 28, podemos observar uma microestrutura com uma quantidade maior de nódulos de grafita, porém com um leve aumento na quantidade de cementita.

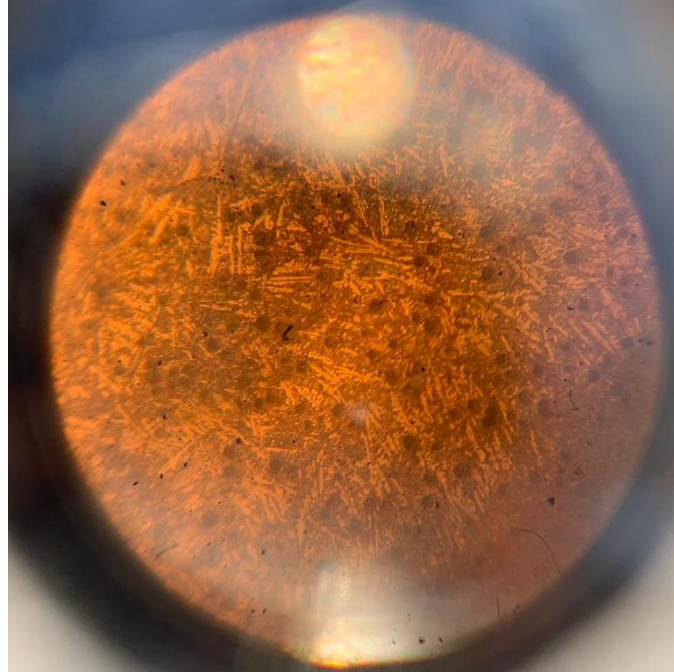


Figura 28 – Amostra com 20% de Cementita

Fonte: Autor

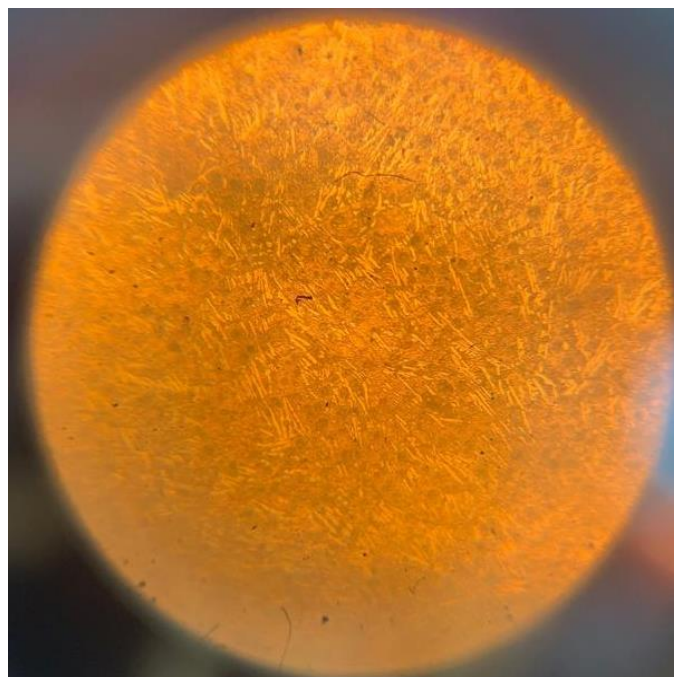


Figura 29 – Amostra com 30% de Cementita

Fonte: Autor

A figura 29 apresenta uma amostra com 30% de cementita, o que acarreta transformações mecânicas no ferro fundido nodular.

Nas demais amostras apresentadas nas figuras a seguir, foram observados elevados teores de cementita na microestrutura do material, modificando a sua resistência e alterando as suas propriedades mecânicas.

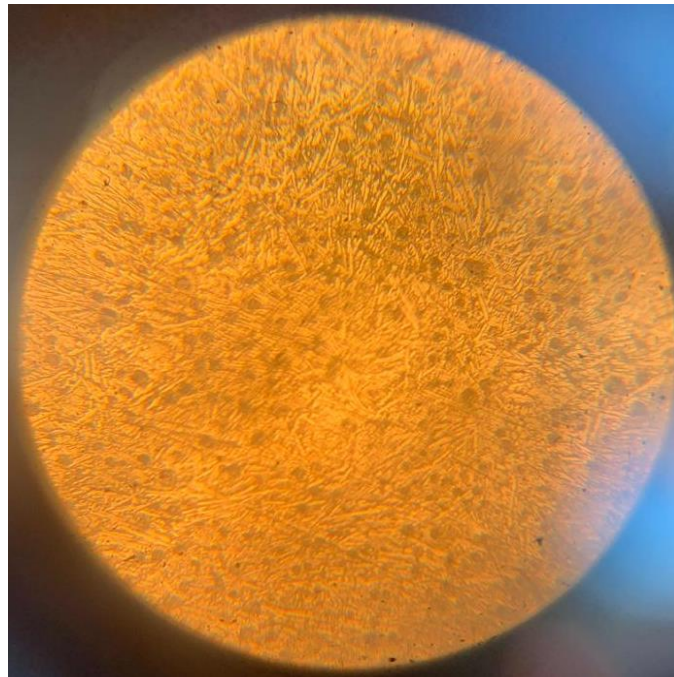


Figura 30 – Amostra com 40% de Cementita

Fonte: Autor

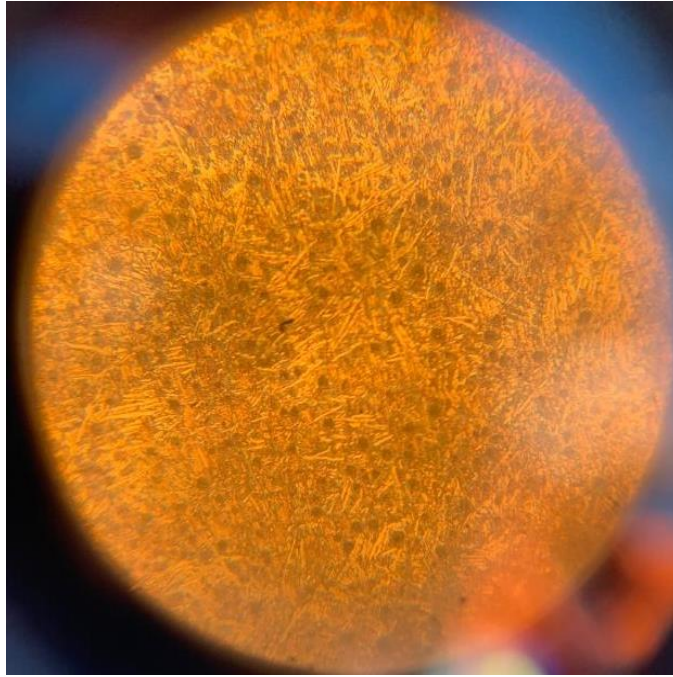


Figura 31 – Amostra com 50% de Cementita

Fonte: Autor

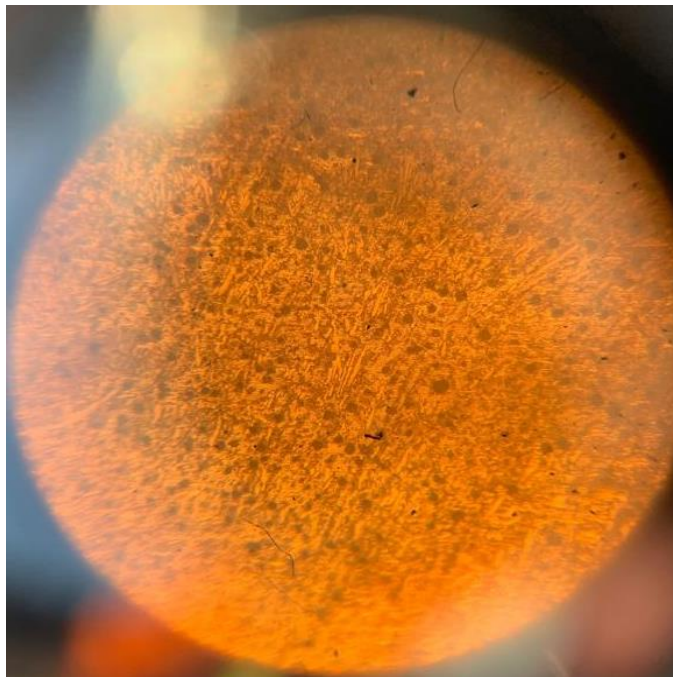


Figura 32 – Amostra com 60% de Cementita

Fonte: Autor

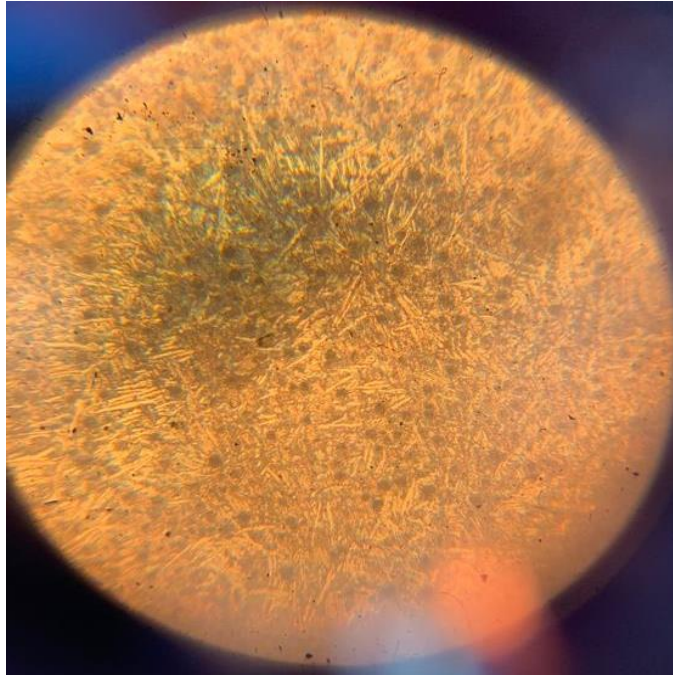


Figura 33 – Amostra com 70% de Cementita

Fonte: Autor

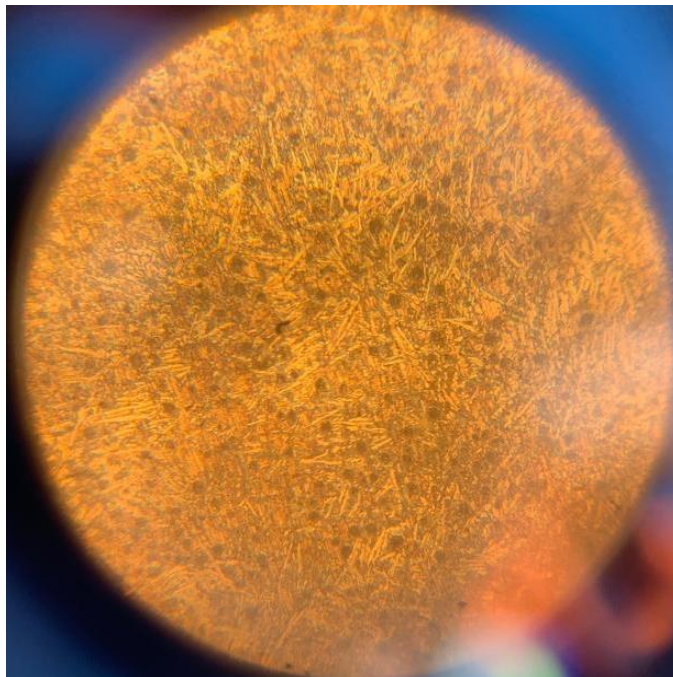


Figura 34 – Amostra com 80% de Cementita

Fonte: Autor

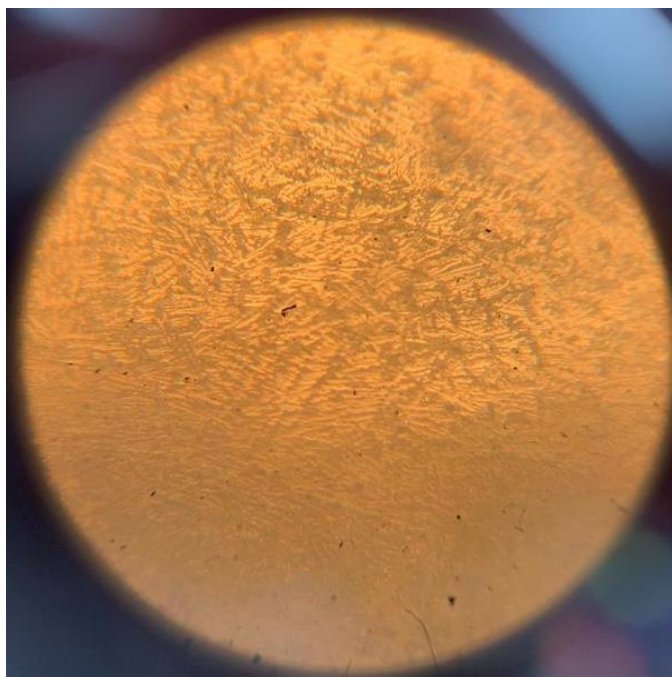


Figura 35 – Amostra com 90% de Cementita

Fonte: Autor

#### 4.2 Ensaio de Dureza

Para a obtenção dos resultados de dureza, foram realizados o total de 10 (dez) ensaios em cada amostra e, com a média desses valores, podemos obter o resultado da dureza medida na superfície da determinada amostra. A tabela 15 abaixo mostra os resultados das durezas de acordo com cada percentual de cementita contida nas amostras.

Tabela 15 – Comparação entre Cementita e Dureza

Nº Amostra	Cementita (%)	Dureza (HB)
1	10%	182,86
2	20%	197,99
3	30%	201,60
4	40%	221,53
5	50%	233,98
6	60%	235,96
7	70%	245,11
8	80%	247,07
9	90%	265,96

Fonte: Autor

Com estes resultados, é possível observar que, a cada aumento no percentual de cementita, a dureza também sofre um aumento. Como ilustrado no gráfico 01 abaixo, concluímos que, com o aumento do percentual de cementita, a dureza do ferro fundido nodular tende a se elevar.

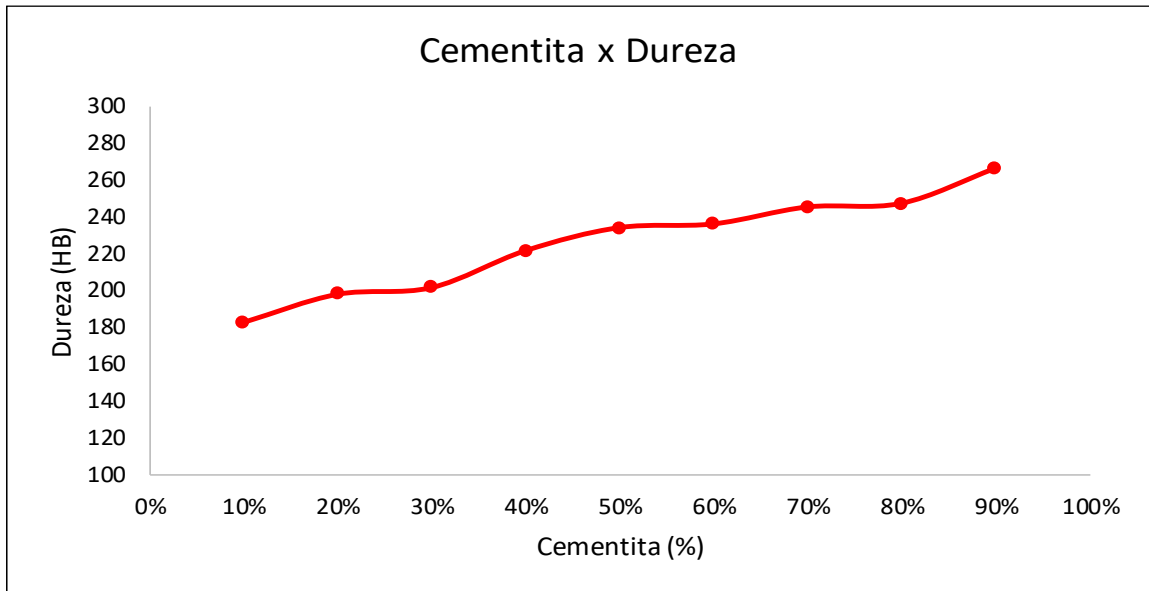


Gráfico 01 – Relação da Cementita com a Dureza

Fonte: Autor

### 4.3 Ensaio de Tração

A tabela 16 mostra os resultados de tração que foram obtidos através do ensaio, onde é possível fazer uma relação com o percentual de cementita de cada amostra. Pode-se observar que, com o aumento da cementita no ferro fundido nodular, a sua resistência à tração diminui, tornando o material mais frágil e incapaz de realizar suas funções adequadamente.

Tabela 16 – Comparação entre Cementita e Resistência à Tração

Nº Amostra	Cementita (%)	Dureza (HB)	Resistência à Tração (MPa)
1	10%	182,86	528,7
2	20%	197,99	515,6
3	30%	201,60	510,9
4	40%	221,53	485,5
5	50%	233,98	471
6	60%	235,96	464,1
7	70%	245,11	446,5
8	80%	247,07	426,8
9	90%	265,96	421,3

Fonte: Autor

O gráfico 02 ilustra os resultados obtidos de cementita e resistência à dureza, mostrando a relação de decaimento da resistência à tração com o aumento no percentual de cementita no material.

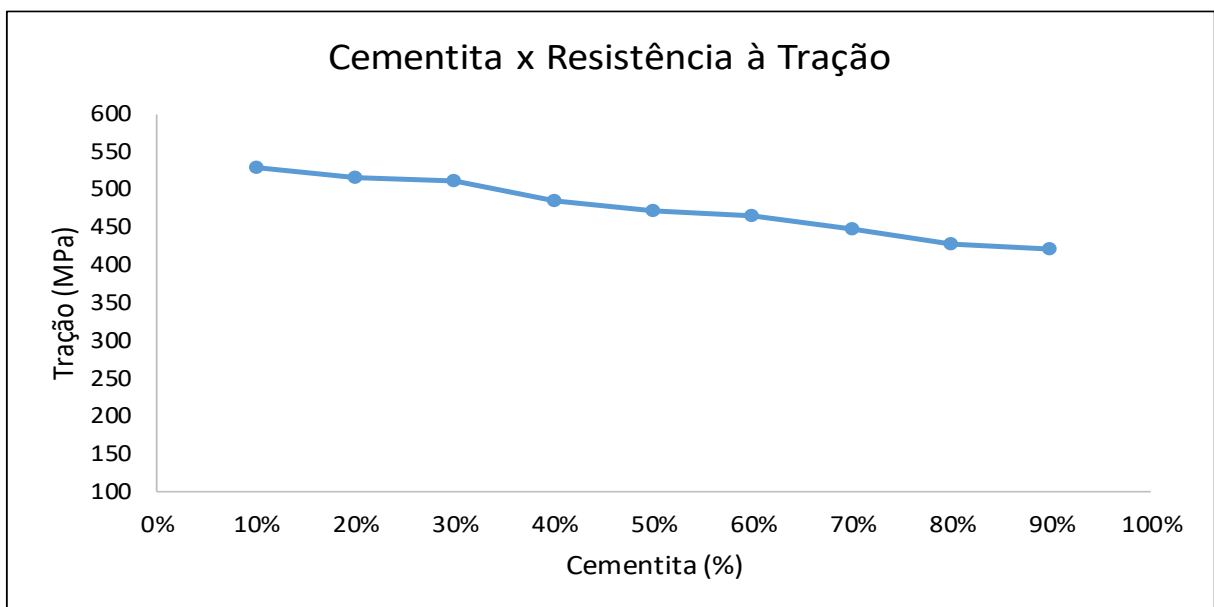


Gráfico 02 – Relação da Cementita com a Resistência à Tração

Fonte: Autor

#### 4.4 Ensaio de Alongamento

O ensaio de tração permite também a obtenção do percentual de alongamento do material. Ao final de cada ensaio, o computador conectado ao equipamento plota o gráfico de tensão-deformação, além também de informar qual foi a carga máxima imposta no corpo de prova e seu percentual de alongamento. Com base nisto, os resultados de alongamento das amostras ensaiadas são mostrados pela tabela 17.

Tabela 17 – Comparação entre Cementita e Alongamento

Nº Amostra	Cementita (%)	Dureza (HB)	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
1	10%	182,86	528,7	23,1
2	20%	197,99	515,6	21,7
3	30%	201,60	510,9	19,9
4	40%	221,53	485,5	17,6
5	50%	233,98	471	15,8
6	60%	235,96	464,1	14,2
7	70%	245,11	446,5	13,8
8	80%	247,07	426,8	12,7
9	90%	265,96	421,3	10,4

Fonte: Autor

Baseado no gráfico 03, podemos observar a proporcionalidade entre o percentual de cementita do material com o seu alongamento, evidenciando que, o ferro fundido nodular contendo altos percentuais de cementita, perde o seu percentual de alongamento e, assim como a resistência à tração, restringe o seu uso a determinadas aplicações.

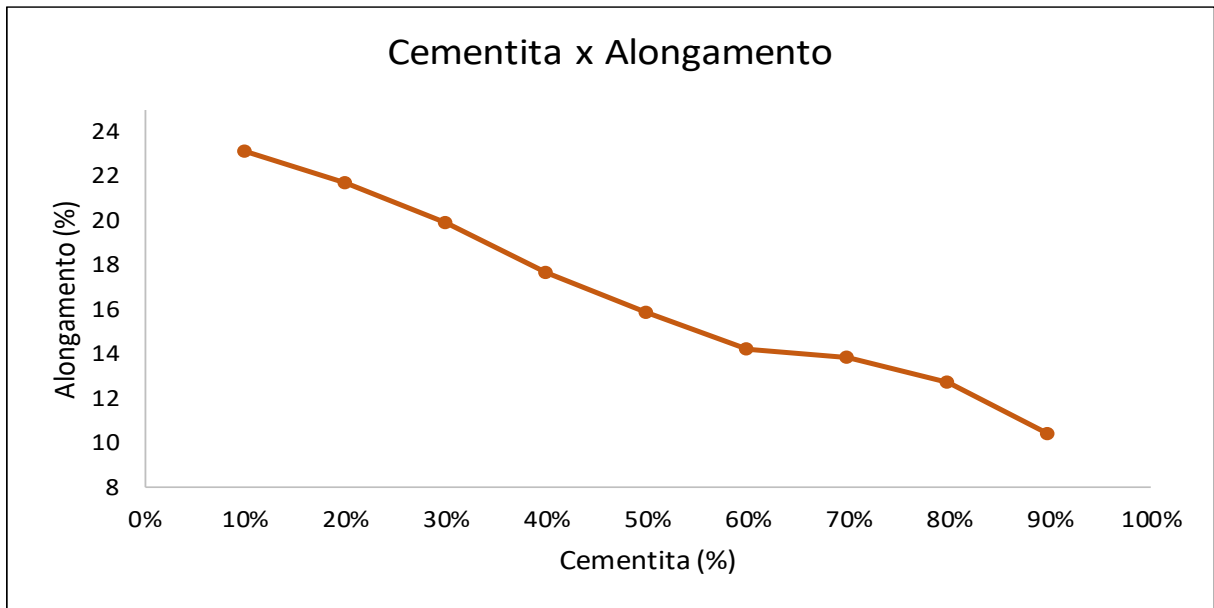


Gráfico 03 – Relação da Cementita com o Alongamento

Fonte: Autor

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados valores reais de propriedades mecânicas do ferro fundido nodular quando o mesmo contém em sua microestrutura um percentual de cementita.

Ao analisar os dados e gráficos, é possível observar que, com a presença da cementita na microestrutura, o ferro fundido nodular perde as suas características mecânicas mais comuns, como por exemplo a ductilidade, propriedade no qual é tão importante para o material nos esforços sofridos durante sua utilização.

Como conclusão, alguns pontos importantes devem ser levados em consideração:

- As propriedades mecânicas do ferro fundido são essenciais para o seu desempenho;
- O controle de processo das indústrias precisa ser apurado a fim de obter dados confiáveis para o acompanhamento de elementos químicos e processos de fabricação;
- A microestrutura do material necessita ser avaliada antes de seu uso, a fim de evitar problemas durante o funcionamento do equipamento ou estrutura;
- Falhas no controle de fabricação dos materiais podem gerar transtornos para a indústria, como por exemplo o tempo para se realizar testes de comprovação, custo de se manter um produto parado em estoque e deslocamento de mão de obra especializada para realizar as atividades de ensaio.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GUESSER LUIZ, Wilson, Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos, 1a ed., São Paulo, Editora Blucher, 2009.

CALLISTER JR., William D., Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução, 1ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2000.

CALLISTER JR., William D., Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução, 2ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002.

CALLISTER JR., William D.; Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 7ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2007.

CALLISTER JR., William D., Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução, 9ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2016.

COLPAERT, Hubertus, Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns, 4ª ed., São Paulo, Editora Blucher, 2008.

GUESSER, L. W.; Ferro Fundido com Grafita Compactada. Metalurgia e Materiais. 2002

ASTM A247-10; Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings, 2006.

ISO 945-1; Microstructure of cast irons - Part 1: Graphite classification by visual analysis, 2008.

JIS G 5502; Spheroidal graphite iron castings, 2001.

Ensaio Mecânico: Dureza, por InfoSolda. Disponível em: <<https://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos-livros-senai/212-ensaio-mecanico-dureza>> Acesso em 15 de agosto de 2019.

Ferro: um dos elementos mais abundantes do Universo. Disponível em: <<https://www.estudopratico.com.br/a-historia-do-ferroferro-o-elemento-mais-abundante-do-universo/>> Acesso em 27 de agosto de 2019.