

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Brenda Melo Maijo

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA  
MICROESTRUTURA E DUREZA DO FERRO FUNDIDO NODULAR**

Cachoeira do Sul, RS  
2020

**Brenda Melo Maijo**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA MICROESTRUTURA E  
DUREZA DO FERRO FUNDIDO NODULAR**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dra. Camila Torres.

Cachoeira do Sul, RS  
2020

**Brenda Melo Maijo**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA MICROESTRUTURA E  
DUREZA DO FERRO FUNDIDO NODULAR**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

**Aprovado em 18 de dezembro de 2020**

---

**Camila Torres, Dra. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Gustavo Roberto Ramos, Dr. (UFSM)**

---

**Ederval de Souza Lisboa, Dr. (UFSM)**

Cachoeira do Sul, RS  
2020

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço aos meus pais Everaldo Peres Maijo e Marta Melo Maijo e meu irmão Bernardo Melo Maijo por todo esforço, apoio e carinho durante toda caminhada. Também, pelos ensinamentos e incentivos aos estudos.*

*A minha professora orientadora Camila Torres pelos conselhos, ajuda e motivação nos momentos difíceis. Também pela confiança e todos os ensinamentos proporcionados.*

*Aos professores Inácio Limberger e Natalia Daudt por todo auxílio no Laboratório de Metalurgia Física.*

*Ao meu amigo Gabriel Quinhones por toda ajuda e incentivo no desenvolvimento dos experimentos do meu trabalho.*

*Aos meus amigos e familiares por todo carinho e compreensão.*

*Por fim a todos os professores da graduação pela dedicação e auxílio para o meu aprendizado.*

## RESUMO

### INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA MICROESTRUTURA E DUREZA DO FERRO FUNDIDO NODULAR

AUTOR: Brenda Melo Maijo  
ORIENTADOR: Prof. Dra. Camila Torres

A análise e caracterização de materiais é uma área em crescimento em virtude da necessidade de seleção apropriada do material de acordo com o desempenho dos componentes, podendo contribuir com a diminuição de falhas em projetos. O ferro fundido nodular fornece um amplo espectro de propriedades mecânicas que podem ser obtidas alterando determinadas variáveis de processamento ou através de tratamentos térmicos que apresentam diferentes e melhores combinações de propriedades para aplicação com requisitos especiais. O presente trabalho visa estudar a influência da variação de parâmetros dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido, e os efeitos nas propriedades mecânicas e microestruturais do ferro fundido nodular FE 45012. Foram utilizados ensaios de dureza, microdureza e análise metalográfica para caracterização do material. O trabalho foi realizado em parceria com o Laboratório de Metalurgia Física, localizado no campus sede da UFSM. Comparando as amostras analisadas, a amostra 5 tratada termicamente pela têmpera a 950°C e revenido a 480°C obteve maior aumento de dureza resultando no valor de 413 HV. A amostra 2 tratada termicamente apenas pela têmpera a 900°C obteve menor valor de dureza de 327 HV analisados na microestrutura da perlita.

**Palavras-chave:** Ferro fundido nodular, têmpera e revenido,

## ABSTRACT

### INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT IN MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF NODULAR CAST IRON

AUTHOR: Brenda Melo Maijo.  
ADVISOR: Prof. Dra. Camila Torres.

The analysis and characterization of materials is a growing subject due to an appropriate selection of the material according to the needed performance of the components, which can contribute to the reduction of failures in projects. Nodular cast iron provides a wide spectrum of mechanical properties that can be obtained by changing certain variables at the processing or through heat treatments that present different and better combinations of properties for the application with special requirements. The present work aims to study the influence of the variation at parameters of heat treatments known as temper and tempering, and the effects on the mechanical and microstructural properties of the nodular cast iron FE 45012. Hardness, microhardness and metallographic analysis tests were used to characterize the material. The work was carried out in partnership with the Laboratório de Metalurgia Física, located on the UFSM campus. Comparing the analyzed samples, sample number 5 which was heat treated by tempering at 950°C and tempering at 480°C increased hardness in the amount of 413 HV. Sample number 2 heat treated only by quenching at 900°C, had a lower hardness, with 327 HV due to the microstructure of the pearlite.

**Keywords:** Nodular cast iron, temper and tempering.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	14
Figura 2 - Ferro fundido cinzento.....	15
Figura 3 - Ferro fundido branco hipoeutético.....	16
Figura 4 - Ferro fundido maleável de núcleo branco (a) e preto (b).....	17
Figura 5 -Ferro fundido nodular com grafita em forma de esferas, sem ataque.....	19
Figura 6 - Indentadores utilizados para medição de dureza (a) Vickers, (b) Rockwell e (c) Brinell.....	23
Figura 7 - Imagem ilustrativa do Ensaio Vickers.....	24
Figura 8 - Impressão obtida pelo Ensaio Vickers.....	24
Figura 9 - Dispositivo de corte Mesotom marca Panambra (a) fechado e (b) aberto...	27
Figura 10 - Equipamento de corte sem especificação ou marca.....	27
Figura 11 - Forno Mufla utilizado nos tratamentos térmicos de têmpera e revenido... .....	2829
Figura 13 - Microdurômetro utilizado para realização do ensaio Vickers.....	30
Figura 14 - Durômetro utilizados para a realização dos testes de macrodureza Vickers. .....	31
Figura 15 - Amostra em estado bruto de fusão. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.....	32
Figura 16 - Amostra com tratamento térmico de têmpera a 900°C. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.....	33
Figura 17 - Amostra com tratamento térmico de têmpera a 950°C. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.....	34
Figura 18 - Amostra com tratamento térmico de têmpera a 900°C e revenido a 480°C. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.....	35
Figura 19 - Amostra com tratamento térmico de têmpera a 950°C e revenido a 480°C. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.....	36



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição química do ferro fundido nodular FE45012.....	26
Quadro 2: Normas equivalentes.....	26
Quadro 3: Valores de Microdureza e Macrodureza Vickers das amostras.....	37
Quadro 4: Valores de dureza.....	37

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
2.1	FERROS FUNDIDOS .....	13
2.1.1	Nodularização e inoculação .....	14
2.1.2	Ferros fundidos cinzentos .....	15
2.1.3	Ferros fundidos brancos .....	16
2.1.4	Ferros fundidos maleáveis.....	16
2.1.5	Ferros fundidos nodulares .....	18
2.2	TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	19
2.2.1	Têmpera .....	20
2.2.2	Revenido .....	21
2.3	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO .....	21
2.3.1	Metalografia .....	21
2.3.2	Dureza e microdureza .....	22
2.3.3	Ensaio Vickers .....	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>26</b>
3.1	AMOSTRA .....	26
3.2	CORTE DAS AMOSTRAS .....	26
3.3	TRATAMENTOS TÉMICOS .....	28
3.4	EMBUTIMENTO E ACABAMENTO SUPERFICIAL .....	29
3.5	ENSAIOS DE DUREZA E MICRODUREZA.....	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>32</b>
4.1	ANÁLISE DE IMAGEM.....	32
4.2	DUREZA E MICRODUREZA.....	377
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Mesmo com o descobrimento e progresso de materiais avançados, os ferros fundidos continuam sendo amplamente utilizados em muitos setores da indústria. Devido à características como resistência ao desgaste, baixo custo e boas propriedades mecânicas, sendo uma alternativa para aplicações em indústrias de energia, automobilística e maquinário (CHUANG, 2015). A introdução de elementos de liga e aplicação de tratamentos térmicos resultaram no aperfeiçoamento do ferro fundido nodular, e seu emprego tem sido viável há algumas aplicações que antes eram somente dos aços (CHIAVERINI, 2005).

Sabe-se que a morfologia da grafita e outras características microestruturais dos ferros fundidos exercem influência direta em suas propriedades mecânicas. A morfologia predominantemente esférica da grafita nos ferros fundidos nodulares, por exemplo, apresenta menor efeito de concentração de tensões, dessa forma, nódulos de grafita esféricos em uma matriz ferrítica constituem um ferro fundido com boa combinação de resistência ao impacto e ductilidade. Se a matriz for predominantemente perlítica, o material apresentará, por sua vez, elevada resistência mecânica e resistência ao desgaste (COLPAERT, 2008; GONZAGA, 2013).

Considerando um sistema estável, a grafita irá crescer na forma lamelar. O tratamento de nodularização, tem como principal objetivo mudar a forma de crescimento da grafita para uma forma esferoidal ou nodular, geralmente, através da adição de silício e magnésio (elementos de liga). Já a inoculação, é um processo térmico que objetiva a formação de grafita. O mesmo é realizado antes do vazamento nos moldes de fundição, adicionando-se altos teores de elementos de liga como silício, por exemplo. A inoculação aumenta o poder nucleante do metal, e diminui a probabilidade de formação de outros ferros fundidos. A composição química do ferro fundido nodular é semelhante à dos ferros fundidos cinzentos. A adição de determinados elementos no metal a ser fundido, permite a formação de grafita em formato esferoidal. O processo de nodularização produz a forma desejada de grafita, contudo existe alguns elementos químicos que interferem neste processo, como por exemplo o chumbo, titânio e telúrio. Os principais agentes nodularizantes são geralmente magnésio, ferro e silício. Logo a composição química de um ferro fundido tem influência na grafitização (CHIAVERINI, 2005).

Os ferros fundidos que apresentam microestrutura austenítica possuem uma taxa de endurecimento por deformação mais elevada que os de microestrutura ferrítica e são mecanicamente instáveis, transformando-se, durante a deformação plástica, em martensita (PUTATUNDA et al., 2006). Segundo Keough (2002), em alguns componentes mecânicos utilizados na indústria automobilística, tais como engrenagens, eixos, etc., essa transformação

pouco interfere na vida útil do componente. Entretanto, em componentes externos ao motor, como componentes de direção e componentes de suspensões, essa transformação resulta em um decréscimo na vida útil do componente, pois esses estão sujeitos a impactos.

De fato, o ferro fundido nodular fornece um amplo espectro de propriedades mecânicas que podem ser obtidas alterando determinadas variáveis de processamento ou através de tratamentos térmicos que apresentam diferentes e melhores combinações de propriedades para aplicação com requisitos especiais (OMOLE et al., 2020).

Diante disto, o presente trabalho visa analisar o efeito dos tratamentos térmicos têmpera e revenido na microestrutura e dureza de um ferro fundido nodular originalmente de matriz ferrítica. Serão realizados ensaios de dureza, microdureza e análise metalográfica para traçar um comparativo das propriedades e microestrutura antes e após os tratamentos térmicos.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento microestrutural e mecânico do ferro fundido nodular sob diferentes condições de tratamentos térmicos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a microestrutura do ferro fundido nodular antes e após o tratamento térmico de têmpera e revenido.
- Identificar as fases presentes no ferro fundido nodular obtido a partir dos tratamentos térmicos.
- Medir a dureza e microdureza em escala Vickers.
- Realizar um comparativo entre os resultados obtidos antes e após cada tratamento térmico.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os conceitos essenciais relacionados ao trabalho.

### 2.1 FERROS FUNDIDOS

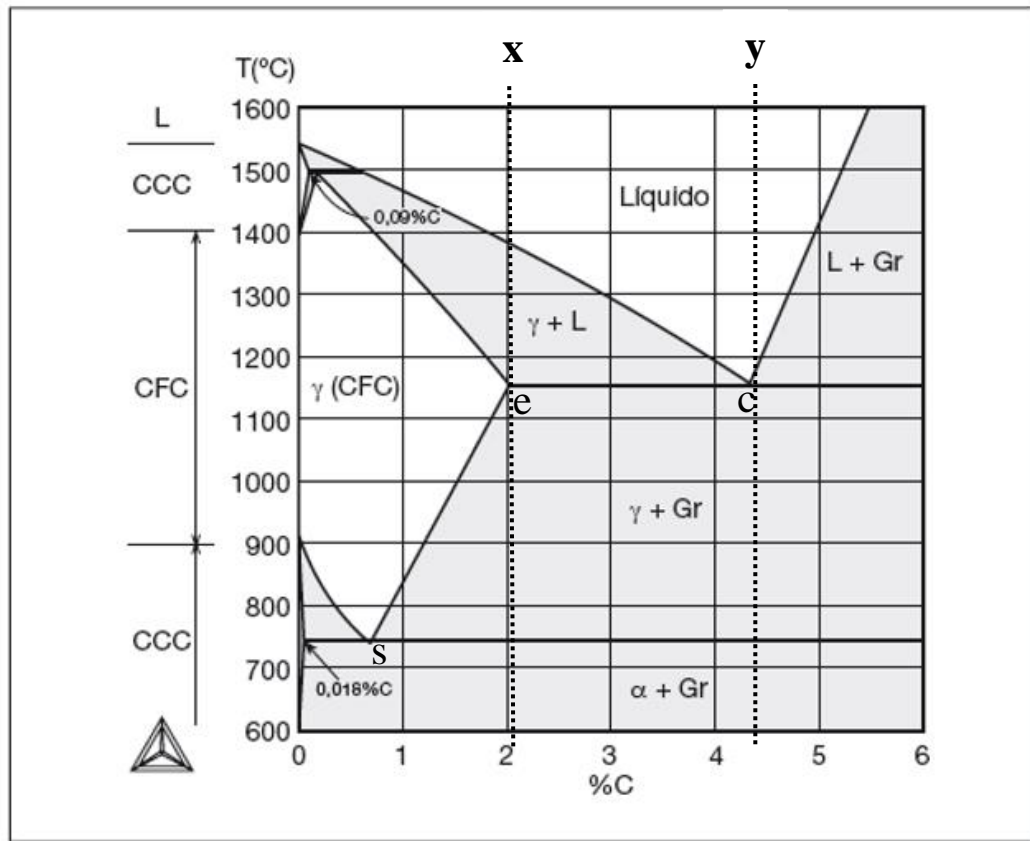
Ferros fundidos são ligas ternárias compostas por ferro, silício (de 1% a 3%) e carbono (de 2% a 4%). Muito utilizados para produção de peças em geral, na área automobilística, agrícola, peças de tubulações e produtos submetidos à grandes esforços mecânicos (SOUZA, 2017).

A quantidade em excesso de carbono neste tipo de material, faz com que o mesmo fique parcialmente livre na forma de nódulos de grafita, veios, entre outros, fazendo desta variação de formato o fator que define que tipo de ferro fundido o material será (RODRIGUES, 2016).

Chiaverini (2005) enfatiza a existência de diversos tipos de ferros fundidos. Sua classificação é dada de acordo com a estrutura final obtida, isto é, dependem de sua matriz metálica, da morfologia, quantidade e distribuição de grafita na matriz do material.

O ferro fundido FE 45012 ao que consta na literatura sobre a sua composição, a porcentagem de carbono é em torno de 3,3% a 4% de carbono. As ligas entre 2% e 4,3% de carbono são chamadas hipoeutéticas, acima de 4,3%, são hipereutéticas e com 4,3% são chamadas de eutéticas. No ponto C deste diagrama, temos uma temperatura de aproximadamente 1100°C que corresponde a liga de mais baixo ponto de fusão. Ao resfriar lentamente uma liga binária, no caso Fe-C, verifica-se a partir do ponto C o equilíbrio de duas fases. Essas duas fases são cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) e austenita ( $\gamma$ ) e essa cristalização eutética é chamada de ledeburita. A ledeburita é constituída de um fundo de cementita com aproximadamente, pela literatura, 6,5% de carbono e cristais dedtríticos de austenita. Dando continuidade ao resfriamento, o teor de carbono da austenita vai reduzindo, isso ocorre até a temperatura de 727°C. Abaixo da linha de 727°C até a temperatura ambiente, a austenita será transformada em perlita, assim a ledeburita será constituída de glóbulos de perlita sobre uma matriz de cementita (CHIAVERINI, 2005).

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.



Fonte: Colpaert (2008).

### 2.1.1 Nodularização e inoculação

A grafita forma-se inicialmente lamelar, considerando um sistema estável de solidificação. O tratamento de nodularização, interfere na forma de crescimento da grafita transformando-se para esferoidal ou nodular (VIDAL, 2013).

Inoculação é o tratamento que se efetua pouco antes do vazamento nos moldes de fundição, a qual é adicionado compostos de função grafitizante. Segundo Silva (2005) a inoculação provoca um aumento no número de células eutéticas e uma diminuição do super resfriamento necessário à solidificação, reduzindo, portanto, a velocidade de crescimento. Assim, este processo tem o efeito de aumentar o poder nucleante do metal líquido minimizando, para uma dada velocidade de extração de calor, a tendência à formação de ferro fundido branco.

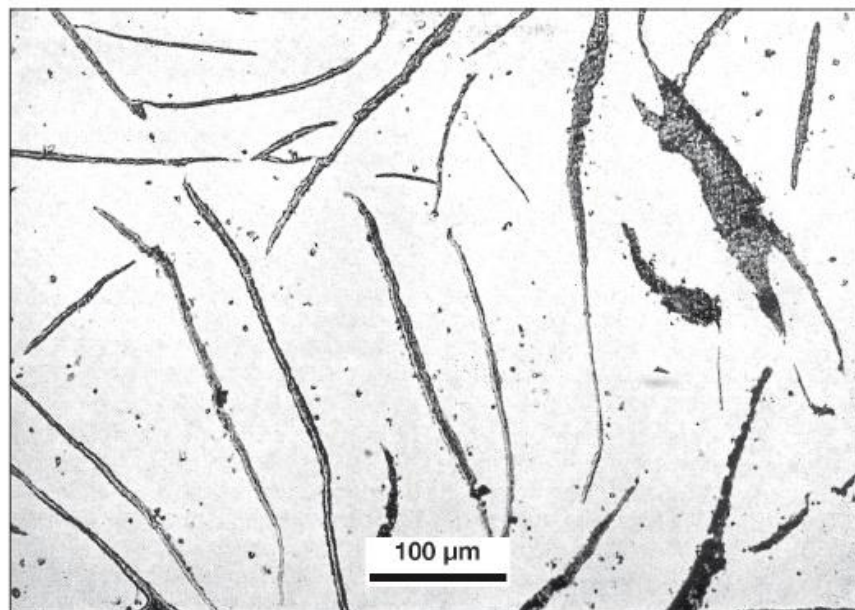
### 2.1.2 Ferros fundidos cinzentos

Os ferros fundidos cinzentos são o tipo mais comum de ferro fundido devido à suas características como boa resistência mecânica, excelente usinabilidade, fácil fusão e moldagem, boa resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento (CHIAVERINI, 2005). O ferro fundido cinzento apresenta carbono na forma livre como, grafita em veios, que na metalografia ótica aparecem como partículas isoladas. Sua superfície de fratura apresenta coloração cinza escuro, originando seu nome (GUESSER, 2009).

Quando comparado com outros ferros fundidos, o ferro fundido cinzento apresenta-se mecanicamente fraco e frágil quando submetido a tração, pois possui lamelas de grafita pontiagudas, servindo como ponto de concentrador de tensões (CALLISTER, 2002).

O ferro fundido cinzento possui diversas aplicações, como principais podemos citar componentes onde não exige maleabilidade por conta de esforços aplicados: bases de máquinas pesadas, virabrequins, engrenagens, placas de embreagens, pistões hidráulicos, blocos de motor, polias, tambor de freio, sapatas, tampas. (KACK, 2014). A Figura 2 apresenta a microestrutura de um ferro fundido cinzento sem ataque químico, onde podemos observar os veios da grafita.

Figura 2 - Ferro fundido cinzento.



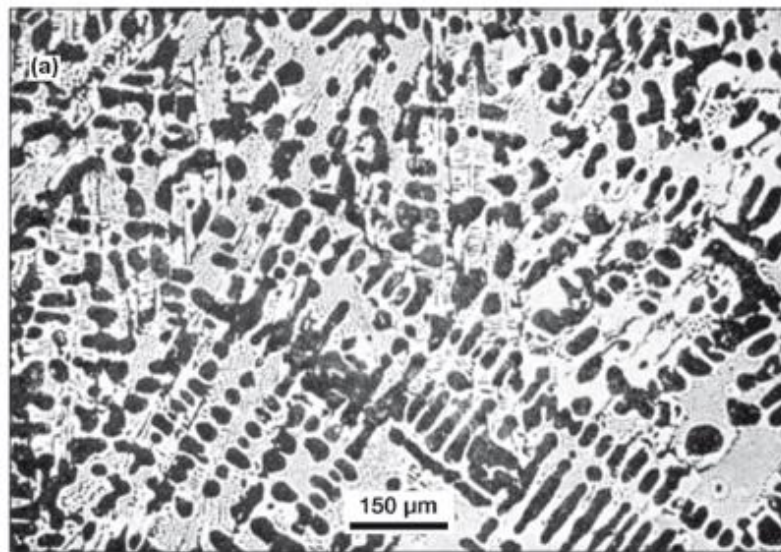
Fonte: Colpaert (2008).

### 2.1.3 Ferros fundidos brancos

O ferro fundido branco é duro e quebradiço, também possui menor teor de silício e baixo ponto de fusão. A fase rica em carbono que se forma é a cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) que aumenta a dureza desse ferro fundido. O ferro fundido branco é resistente a abrasão, além de econômico, sendo útil em várias aplicações, como barras de elevação e revestimentos em moinhos, superfícies de desgaste de bombas, esferas e anéis de pulverizadores de carvão. (CALMET, 2016). De acordo com Chiaverini (2005) devido à alta quantidade de cementita, sua dureza e resistência ao desgaste são elevadas, porém, sua usinabilidade é prejudicada.

De forma geral, o ferro fundido branco pode ser distinguido em três estruturas, em função de sua composição química em comparação com a composição do líquido eutético: hipoeutéticas, eutéticas e hipereutéticas (COLPAERT, 2008). Na Figura 3 podemos ver a microestrutura de um ferro fundido hipoeutético.

Figura 3 - Ferro fundido branco hipoeutético.



Fonte: Colpaert (2008).

### 2.1.4 Ferros fundidos maleáveis

O ferro fundido maleável surgiu da necessidade de se obter uma liga que possuísse valores apreciáveis de ductilidade em comparação aos ferros fundidos brancos e cinzentos, permitindo maior tenacidade e ductilidade, aliadas a boas propriedades de resistência a tração,

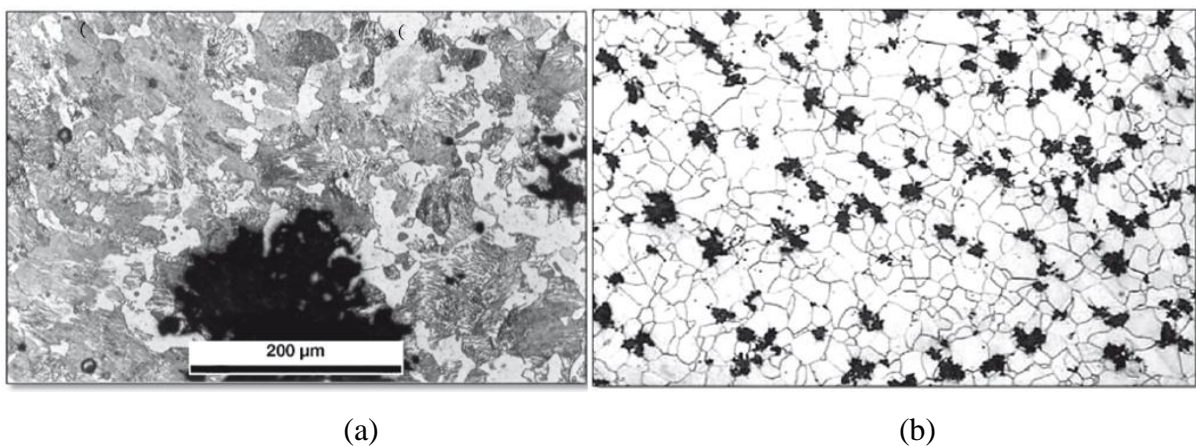


dureza e resistência à fadiga, resistência ao desgaste, e usinabilidade necessárias para as aplicações industriais (CHIAVERINI, 2005).

É obtido a partir do ferro fundido branco através do tratamento térmico de maleabilização, de composição bem definida, com carbono na forma inicial de cementita e perlita. O tratamento consiste num aquecimento prolongado, em condições previamente estabelecidas de temperatura, tempo e meio, de modo a provocar transformação de parte ou da totalidade do carbono combinado em grafita, ou em certos casos eliminar completamente uma parte do carbono, dando origem aos chamados ferros maleáveis de núcleo preto (ou americano), ou é removida parcialmente por descarbonetação, com a formação de alguma grafita, sendo então chamado ferro maleável de núcleo branco (ou europeu). Possuem como características a melhor usinabilidade comparada entre os ferros fundidos branco e cinzento e à alguns aços como SAE 1022, 1112 e 1035. Sua ductilidade é 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 (VIDAL, 2013).

Os ferros fundidos maleáveis, são materiais de engenharia importantes pois têm boas propriedades tais como: facilidade de vazamento, boa usinabilidade, resistência mecânica moderada, tenacidade e resistência à corrosão para certas aplicações. (CALLISTER, 2002). A Figura 4 apresenta a microestrutura do ferro fundido maleável de núcleo branco e preto, possibilitando a visualização dos nódulos de grafita.

Figura 4 - Ferro fundido maleável de núcleo branco (a) e preto (b).



Fonte: Colpaert (2008).

### 2.1.5 Ferros fundidos nodulares

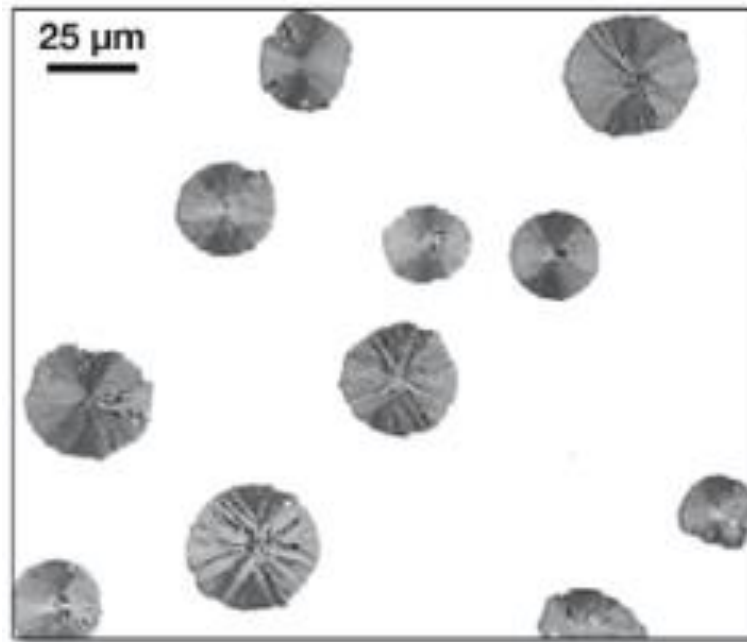
Entre os demais ferros fundidos citados anteriormente, o ferro fundido nodular vem ocupando cada vez mais espaço na engenharia, devido a uma combinação favorável de boa resistência ao desgaste, elevada elasticidade e ductilidade, sendo suas aplicações especialmente onde exijam resistência, combinado com baixo custo e controle da matriz (FERRO; LAZZARIN; BERTO, 2012). Muitas vezes é utilizado em substituição à componentes de ferro fundido cinzento, maleável, aço fundido e forjado e estruturas soldadas (GUESSER, 2009).

Devido à característica da grafita, apresentada em nódulos, os ferros fundidos nodulares possuem uma atratividade comparados com os aços por possuírem uma menor densidade ou massa específica, resultando em uma diminuição em torno de 8% de seu peso. Essa característica torna o ferro fundido nodular uma ótima escolha para aplicações que tenham como demanda principal a redução de peso dos itens, sendo usado em larga quantidade em indústrias automotivas e de geração de energia eólica (SOUZA, 2015).

As propriedades do ferro fundido nodular são influenciadas essencialmente pela microestrutura esferoidal da grafita (GUESSER, 2009). Quanto mais a forma da grafita se desvia da forma esférica ideal, mais baixa é a ductilidade e a resistência, isso devido ao surgimento de regiões tensionadas em torno dos nódulos (FERRO; LAZZARIN; BERTO, 2012).

De acordo com Chiaverini (2005) a forma da grafita é obtida através de adição de elementos de liga no metal, podendo ser magnésio ou cério que agem como inibidores, retardando a formação inicial da grafita, possibilitando a solidificação do ferro fundido nodular, com a formação de cementita. Após cessar os efeitos dos inibidores, a cementita formada se decompõe produzindo assim a grafita nodular, desenvolvida igualmente em todas as direções, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Ferro fundido nodular com grafita em forma de esferas, sem ataque.



Fonte: Colpaert (2008).

O ajuste da composição química e a inoculação, inserção de uma liga metálica em um metal líquido, são características fundamentais de modo a favorecer a formação da grafita em nódulos ao invés de veios (COLPAERT, 2008).

## 2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos dos aços e ferros fundidos são muito utilizados para alteração das propriedades mecânicas dos componentes de acordo com a aplicação a que lhes são destinadas. A obtenção de um melhor desempenho das propriedades mecânicas, pode ocorrer através da otimização dos tratamentos térmicos aplicados à peça, sabendo-se que a velocidade de resfriamento, a temperatura, o tempo e o meio de resfriamento são os parâmetros principais de um tratamento térmico (GRACIOSO, 2003).

Pode-se denominar tratamento térmico como conjunto de operações de aquecimento e resfriamento controlados sob condições de tempo, velocidade, atmosfera e temperatura com finalidade de alterar as características dos materiais. Dessa forma obtém-se uma variedade de propriedades que permitem que as ligas sejam adequadas a diversas aplicações, conseguindo-se tais efeitos e reduzindo gastos financeiros (CHIAVERINI, 2015; SILVA, 2010).

### 2.2.1 Têmpera

A têmpera é um dos processos de tratamento térmico mais importantes aplicados aos aços e ferros fundidos, o objetivo desse processo é melhorar a resistência (RASHIDI; MOSHREFI-TORBATI, 2000).

Este método consiste no resfriamento do material, após a austenitização, com velocidade rápida o suficiente para evitar as transformações perlíticas e bainíticas no material em questão. Assim é possível obter uma estrutura metaestável martensítica (SILVA, 2010).

A busca pelo endurecimento superficial é mais conveniente que seu endurecimento total nesse tratamento, pois a profundidade de endurecimento e a distribuição de dureza ao longo da seção de uma peça, depende da temperabilidade - profundidade de penetração à têmpera - do tamanho e forma da peça e do meio onde ocorre a têmpera (COLPAERT, 2008). A temperabilidade do material necessária para obter a têmpera plena em todo material, pode aumentar usando elementos de liga como o manganês, níquel, molibdênio se utilizado no ferro fundido nodular. Existem meios para realizar a têmpera, que facilitam o controle de resfriamento com diferentes capacidades de retirada de calor. Os meios mais utilizados são: água (podendo conter adição de polímeros ou sal), óleo e ar, embora ainda exista outros meios para realizar esse processo (SILVA, 2010).

A água possui características desejáveis pois é de baixo custo, não tóxica, possui grande disponibilidade e é não inflamável, porém o poder de resfriamento da água decresce rapidamente com o aumento da temperatura. As salmouras são soluções aquosas de cloreto de sódio ou cálcio, combinadas com aditivos. A velocidade de resfriamento dessas soluções é maior que a da água pois, os minúsculos cristais de sal presentes na salmoura que entram em contato com a peça, fragmentam-se violentamente, causando maior agitação que acaba com o filme de vapor na superfície da peça, o que resulta em velocidades de resfriamento maiores. Os óleos de resfriamento rápido, são óleos que possuem aditivos para aumentar a taxa de resfriamento, chegando próximo ao resfriamento da água, os aditivos também melhoram a resistência a oxidação (DE SOLSA, 2007).

Quando uma peça tratada possui geometria simples e pode ser tolerado uma maior distorção da peça, o meio de têmpera normalmente utilizado é a água. Caso a peça tratada necessite de um cuidado maior, sem distorções ou trincas, deve-se utilizar meios de têmpera menos severos, como o óleo ou ar. Durante esses resfriamentos surgem acúmulos de tensões internas, por essa razão podem ocorrer fenômenos de deformações plásticas do material,

aparecimento de trincas e tensões residuais. Portanto, torna-se de suma importância a aplicação do tratamento de revenimento após a têmpera, com intuito de reduzir ou eliminar estes problemas (FREITAS, 2016).

### **2.2.2 Revenido**

Como a martensita formada durante a têmpera deixa o material frágil na temperatura ambiente, após a têmpera é recomendado executar o revenimento. O revenido alivia as tensões internas, minimiza a fragilidade e a instabilidade dimensional da estrutura (SCHLATTER, 2012).

Este processo consiste em aquecer uniformemente até uma temperatura abaixo daquela de austenitização, mantendo o material por um tempo suficiente para obtenção das propriedades desejadas (SILVA, 2010).

Segundo Freitas (2016), o tempo e a temperatura de aquecimento durante o revenimento influenciam na alteração das propriedades do material. Nos primeiros dez minutos de tratamento, a queda da dureza é significativa, e a partir de duas horas de aquecimento, essa redução de dureza já não é mais expressivo. Caso haja necessidade de continuar a redução da dureza, é usual aumentar a temperatura do forno do que mantê-lo numa temperatura inferior por um período mais longo.

## **2.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO**

O entendimento do comportamento microestrutural depende muito das técnicas metalográficas, estas são capazes de revelar os microconstituintes presentes no material. A microestrutura possui uma forte relação com as propriedades do material, e assim o exame metalográfico se faz necessário e é de grande importância para a análise e a compreensão destas microestruturas (ALMEIDA, 2018).

### **2.3.1 Metalografia**

A metalografia das amostras é essencial para analisar a morfologia e estrutura do material. O ensaio metalográfico deve relacionar a estrutura do material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação e o desempenho de suas funções (ALMEIDA, 2018).

A análise da estrutura pode ser tanto para aumentos maiores de milhares de vezes utilizando microscópios eletrônicos (micrográfico) quanto para pequenos aumentos como inspeção a olho nu ou com auxílio de lupa (macrográfico) (LIMA FILHO, 2013).

A análise da estrutura pode ser feita tanto macroscopicamente quando microscopicamente. A macrografia consiste no exame de uma seção plana devidamente polida, em geral atacada por um reagente apropriado, com ampliação máxima de 10X, para ampliações maiores podemos utilizar o termo micrografia (COLPAERT, 2008).

Para facilitar a caracterização de um material foram criadas técnicas para preparação da amostra. A escolha da técnica a ser utilizada vai depender do objetivo da análise, a amostra passará por um processo de preparação específico para o objetivo. Esses preparos podem ser citados como: escolha da seção a ser estudada, corte metalográfico, preparação da superfície (lixamento e polimento), ataque químico e visualização via microscopia (LIMA FILHO, 2013).

### **2.3.2 Dureza e microdureza**

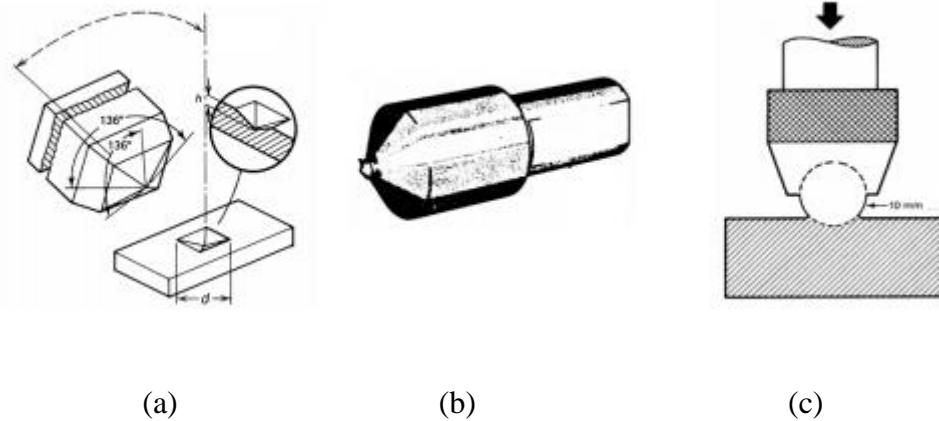
Os testes de dureza são comumente empregados na análise de materiais e consistem em um método quantitativo de análise, que permite a avaliação e identificação das fases presentes na amostra em função da medição de seus respectivos valores de dureza (ALMEIDA, 2018).

A dureza dos materiais está relacionada diretamente à pressão aplicada para deformar a superfície em teste. Essa deformação é resultado da penetração de indentadores que podem ser de diferentes formatos como esféricos, cônicos ou piramidais (BERTOL, 2009).

Já o termo microdureza se refere à indentações estáticas provocadas por cargas menores. Este procedimento de teste é muito semelhante ao de dureza, exceto que é feito em escala microscópica, com instrumentos de alta precisão. A superfície testada geralmente requisita um acabamento metalográfico. Quanto menor for a carga de teste, maior o grau de acabamento superficial necessário. Os microscópios são usados para medir as indentações; eles comumente têm aumentos de 500x e fazem a medição com precisão de  $\pm 0,5$  microns (ALMEIDA, 2018).

Dentre os diversos testes de dureza, os mais utilizados para materiais metálicos são Vickers, Rockwell e Brinell. Para cada teste é utilizado uma ponta de indentador diferente que são comumente fabricados de aço temperado, diamante ou metal duro (BERTOL, 2009). Na Figura 6 a seguir, podemos visualizar as pontas dos indentadores para cada tipo de teste.

Figura 6 - Indentadores utilizados para medição de dureza (a) Vickers, (b) Rockwell e (c) Brinell.



Fonte: Bertol (2009).

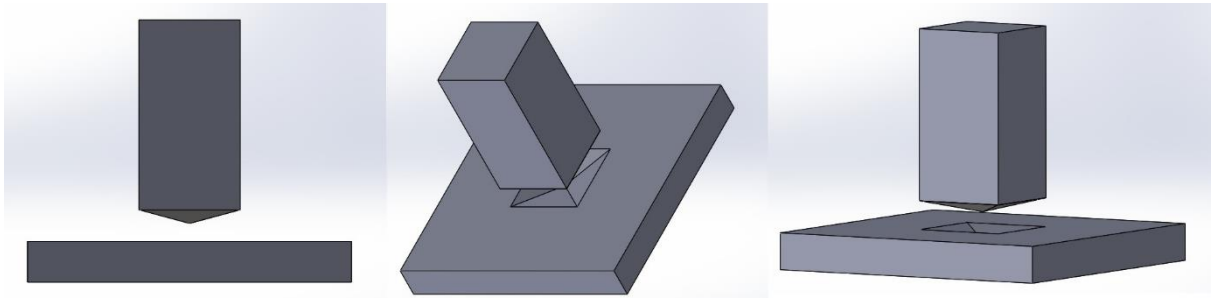
Como o ensaio de dureza não requer uma preparação elaborada da amostra, é o teste mais simples e de baixo custo utilizado para caracterização de materiais. Levando em consideração o baixo custo dos equipamentos comparados a outros utilizados para caracterização, torna-se o estudo mais viável economicamente (BERTOL, 2009).

### 2.3.3 Ensaio Vickers

O ensaio consiste na aplicação de uma carga sobre a superfície plana previamente preparada de um material, utilizando-se de um penetrador piramidal padronizado. Após a remoção do penetrador da superfície da amostra, tem-se uma impressão remanescente no local (RIOS, M. C. G; FARIA, G. A; FARIA, G. L, 2016).

Esse teste pode ser realizado para macro e microindentações, definidos por normas. Segundo a norma ASTM E 92 para macroindentações são aplicadas cargas de 1 a 120 kgf. No caso de microindentações varia de 1 a 1000 gf conforme norma ASTM E 384 (BERTOL, 2009). Na Figura 7, podemos visualizar o ensaio Vickers em vista lateral e isométrica em imagens ilustrativas, demonstrando o penetrador piramidal e a impressão que o mesmo apresenta após a carga aplicada na amostra.

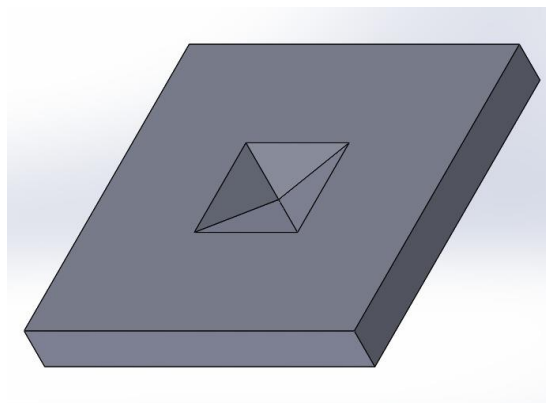
Figura 7 - Imagem ilustrativa do Ensaio Vickers.



Fonte: Autora (2020).

Na Figura 8, podemos visualizar a impressão obtida pelo penetrador após a aplicação da carga desejada no Ensaio Vickers. Nessa impressão, estão dispostas as duas diagonais utilizadas para o cálculo de dureza Vickers.

Figura 8 - Impressão obtida pelo Ensaio Vickers.



Fonte: Autora (2020).

A equação representa a relação utilizada para determinar a dureza Vickers:

$$HV = \frac{2F \operatorname{sen}\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = \frac{1,8544F}{d^2}$$

*Sendo:*  $HV = \text{Dureza Vickers};$

$F = \text{Carga (kgf)};$

$d = \text{Média aritmética das duas diagonais (mm)}.$



Entre as vantagens da medida de dureza Vickers estão o fato de que apenas um tipo de penetrador é utilizado para diversos tipos de metais e tratamentos de superfícies e a possibilidade de realizar leituras precisas (BERTOL, 2009).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 AMOSTRA

Para realização deste estudo foi utilizado o ferro fundido nodular classe FE 45012 de matriz ferrítica. Este ferro fundido apresenta boa usinabilidade, bom acabamento superficial e excelente estanqueidade. Na condição bruta de fusão, esta classe de ferro fundido apresenta limites de resistência à tração e escoamento similares ao aço SAE 1030 laminado a quente (FRITSCH, 2018). O Quadro 1 apresenta a composição química das amostras utilizadas, seguidas do Quadro 2 com suas normas equivalentes.

Quadro 1: Composição química do ferro fundido nodular FE45012.

Elementos (%)	C	Si	Mn máx.	S máx.	P máx.	Mg
<b>FE45012</b>	3,30-4,00	2,20-3,10	0,25	0,020	0,10	0,03-0,06

Fonte: Fritsch (2018).

Quadro 2: Normas equivalentes.

NORMAS	ABNT/NBR 6916	ASTM A 536	SAEJ434
<b>FE 45012</b>	FE 42012	65-45-12	D4512

Fonte: Fritsch (2018).

#### 3.2 CORTE DAS AMOSTRAS

Para o corte das amostras foi utilizado o dispositivo de corte Mesotom, da marca Panambra, apresentado na Figura 9, onde inicialmente foi realizado o corte ao meio da amostra, pois esse equipamento possibilita o corte de peças maiores, já que o tarugo disponível para o estudo tinha grandes dimensões. Em seguida, outro equipamento de corte (sem marca ou identificação de modelo) foi utilizado, para particionar as amostras em tamanhos menores, como pode ser visto na Figura 10. Nesta etapa foram cortadas 14 amostras ao todo para dar seguimento ao trabalho.

Figura 9 - Dispositivo de corte Mesotom marca Panambra (a) fechado e (b) aberto.



(a)

(b)

Fonte: Autora (2020).

Figura 10 - Equipamento de corte sem especificação ou marca.



Fonte: Autora (2020).

Deve-se levar em conta que o corte nunca deve ser contínuo, de modo que não ocorra excessivo aquecimento, pois pode ocorrer uma modificação da estrutura da amostra. Nos dois equipamentos foram utilizados água como fluido refrigerante de corte.

Como o presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar as amostras antes e após cada etapa dos tratamentos térmicos, foram separadas algumas amostras que não passaram por nenhum tratamento, essas amostras passaram direto para o embutimento e polimento.

### 3.3 TRATAMENTOS TÉMICOS

Com as amostras cortadas, iniciou-se os tratamentos térmicos de têmpera e revenido. Para a realização dos mesmos, foi utilizado um forno industrial Mufla RVT MFL com capacidade de alcançar  $1200^{\circ}\text{C}$ , que pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Forno Mufla utilizado nos tratamentos térmicos de têmpera e revenido.



Fonte: Autora (2020).

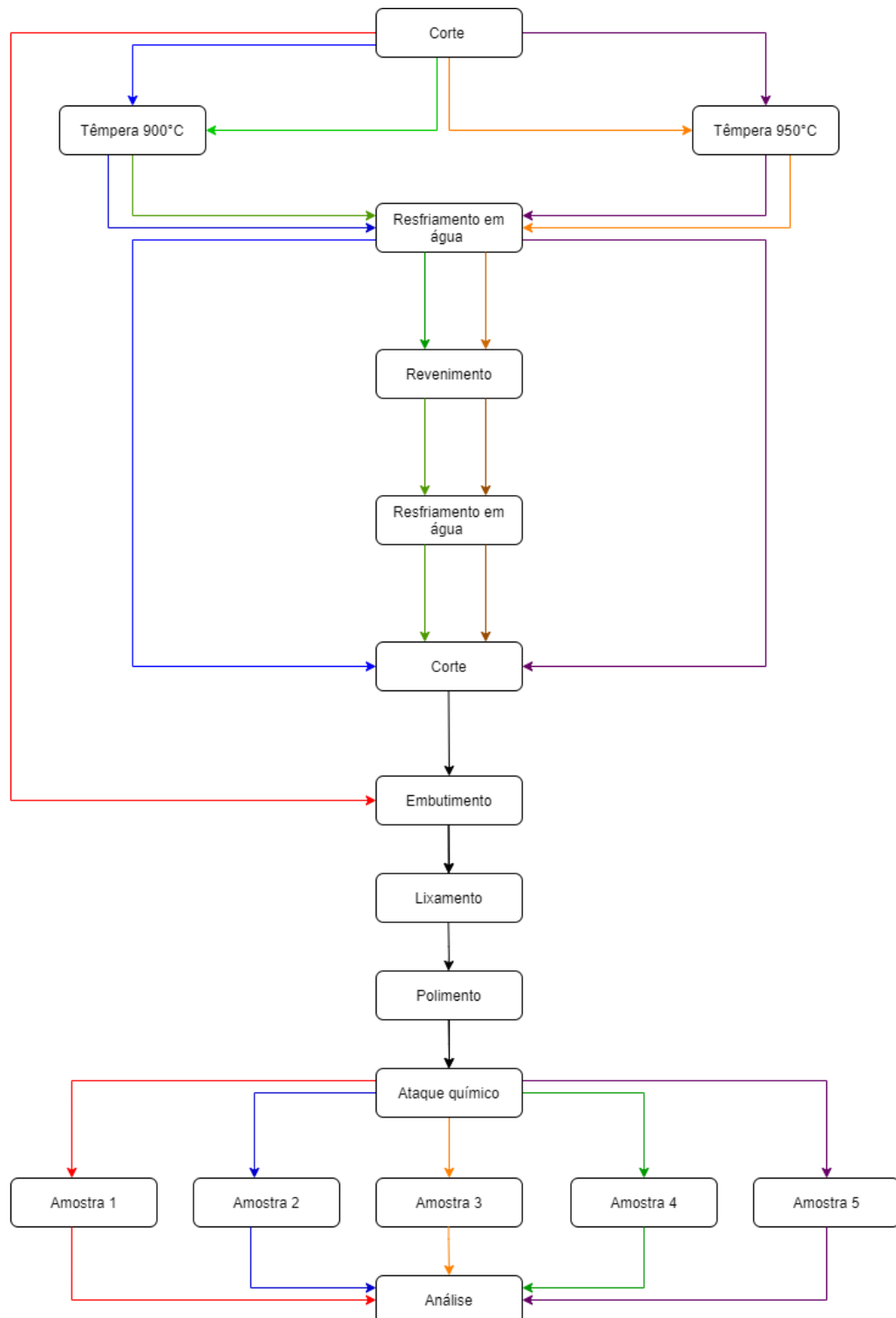
Foram aplicadas duas temperaturas distintas para o tratamento térmico de têmpera, sendo  $T_1 = 900^{\circ}\text{C}$  e  $T_2 = 950^{\circ}\text{C}$ , para realizar um comparativo entre essas duas temperaturas, o tempo de encharque foi de 20 min. As amostras foram resfriadas instantaneamente em água fria (temperatura de aproximadamente  $16^{\circ}\text{C}$ ).

Para análise da evolução microestrutural e dureza das amostras, foram reservadas amostras tratadas termicamente pelo processo de têmpera, tanto na temperatura  $T_1 = 900^{\circ}\text{C}$  quanto  $T_2 = 950^{\circ}\text{C}$  para realização dos testes. As amostras que após o processo de têmpera seguiram para o revenimento foram ao forno a uma temperatura de  $T_{rev} = 480^{\circ}\text{C}$  e 20 min de encharque.

### 3.4 EMBUTIMENTO E ACABAMENTO SUPERFICIAL

Para um melhor entendimento, a Figura 12 mostra o fluxograma das etapas realizadas durante a execução deste trabalho.

Figura 12 - Fluxograma das etapas realizadas para cada amostra.



Fonte: Autora (2020).

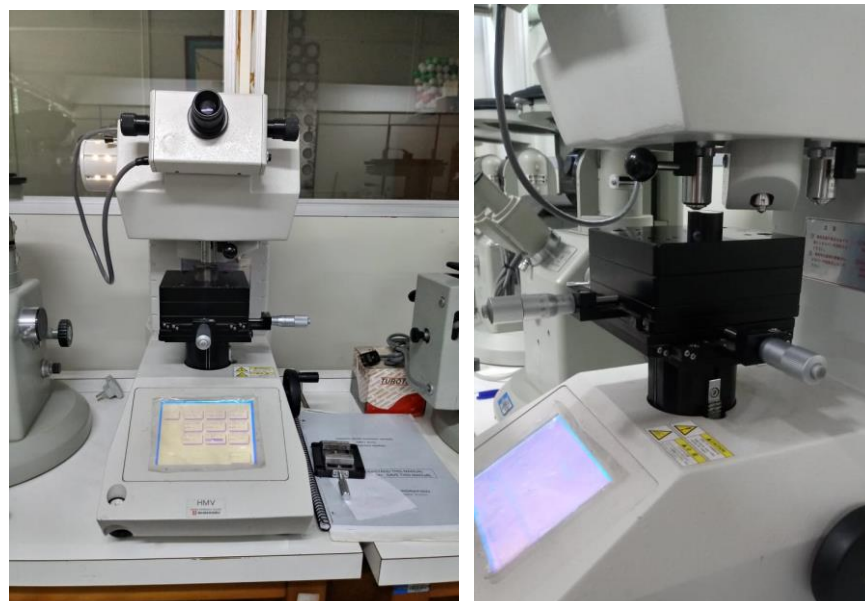
Foi adotado o embutimento a frio das amostras. Com as amostras embutidas iniciou-se o acabamento superficial, esta etapa de preparação foi realizada cautelosamente, pois tem como objetivo eliminar riscos e marcas profundas possibilitando um acabamento superficial, preparando-a para o polimento. Diante disso, a técnica de lixamento utilizada foi manual, lixando as amostras sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menores, mudando a direção (90°) em cada lixa subsequente. Foram utilizadas lixas de granulometria diferentes, de 80, 120, 240, 400, 600 e 1200. Em seguida, após o lixamento foi realizado o polimento em alumina e pasta diamantada. As amostras foram atacadas quimicamente com Nital 2% (2 ml  $\text{HNO}_3$  + 98 ml álcool etílico) para a visualização da microestrutura.

Os experimentos acima foram realizados no Laboratório de Metalurgia Física, localizado no campus sede da UFSM.

### 3.5 ENSAIOS DE DUREZA E MICRODUREZA

Foi adotado o ensaio de dureza Vickers para ambas escalas, macro e microdureza. Inicialmente foi realizado a microdureza em um microdurômetro marca Shimadzu, modelo HMU-2 com uma carga aplicada de 200 gf, que foi convertido para Newton, resultando numa carga de 1,961 N ou 0,2 HV aplicada sobre as amostras. Esse microdurômetro digital é apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Microdurômetro utilizado para realização do ensaio Vickers.



Fonte: Autora (2020).

Para realizar a análise de macrodureza, o equipamento utilizado foi o durômetro marca WPM, modelo HPO 250. Foi utilizado uma carga de 50 HV para a realização dos testes em 5 locais distintos obtendo-se portanto, a dureza Vickers das amostras. O durômetro pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 - Durômetro utilizado para a realização dos testes de macrodureza Vickers.



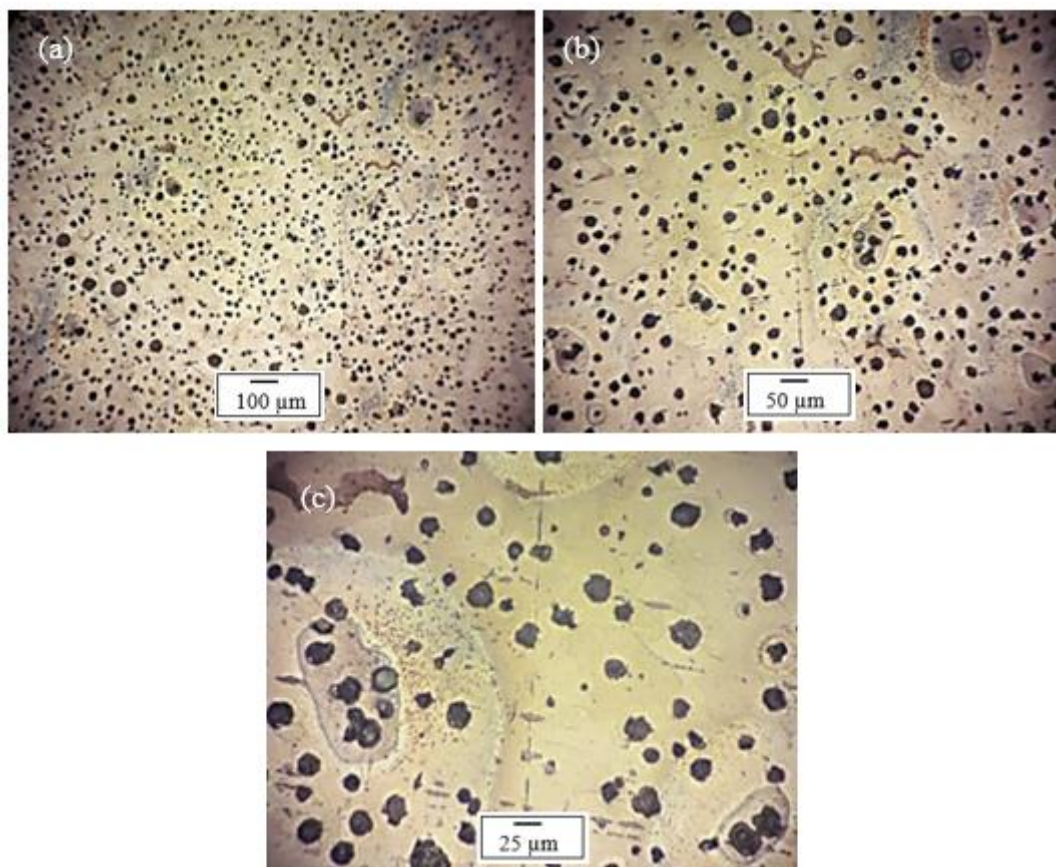
Fonte: Autora (2020).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DE IMAGEM

A figura 15 apresenta imagens por microscopia óptica do material em seu estado bruto de fusão, onde é possível observar os nódulos de grafita regulares e irregulares presentes em uma matriz ferrítica (região clara).

Figura 15 - Amostra em estado bruto de fusão. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.



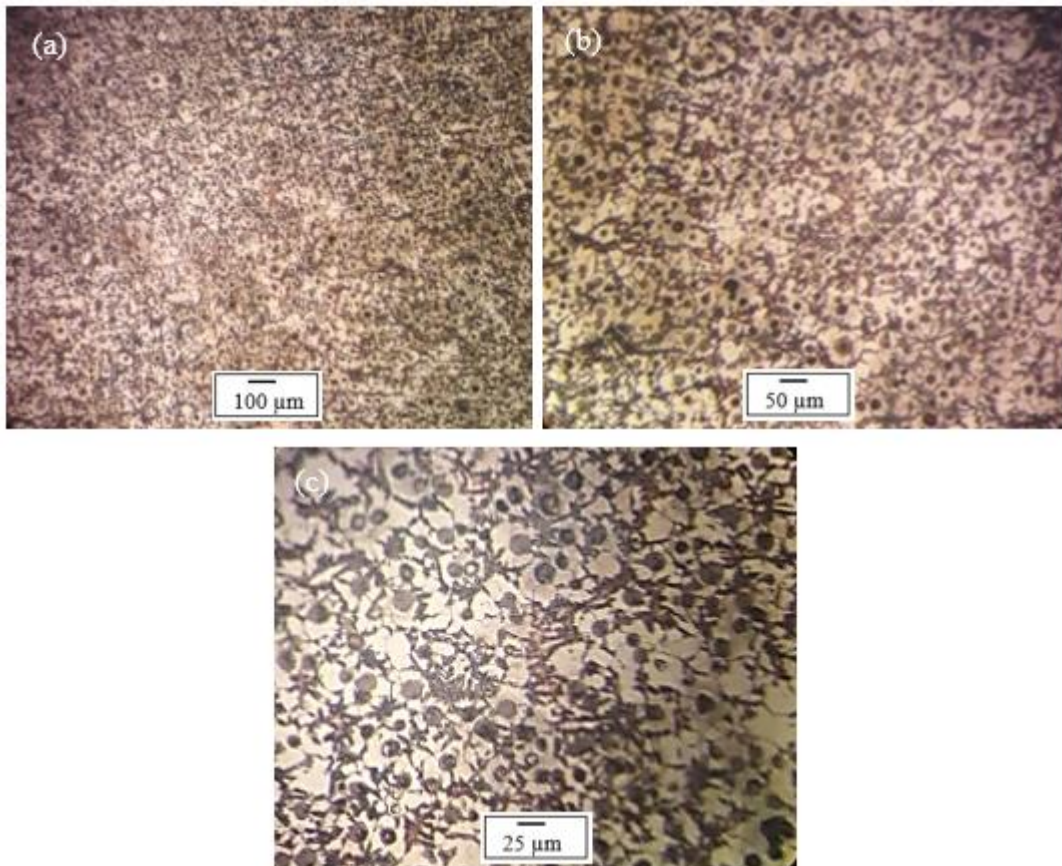
Fonte: Autora (2020).

A imagem a seguir se trata da amostra tratada termicamente pela têmpera a 900°C e está disposta na Figura 16. É possível notar, além dos nódulos de grafita existem regiões claras e escuras. Essas regiões são denominadas ferrita e perlita respectivamente. Em maioria, nota-se



um aumento da região escura se comparada a amostra em seu estado bruto de fusão. Esse aumento ocorre devido a têmpera, a matriz que antes era ferrítica, torna-se em parte perlítica.

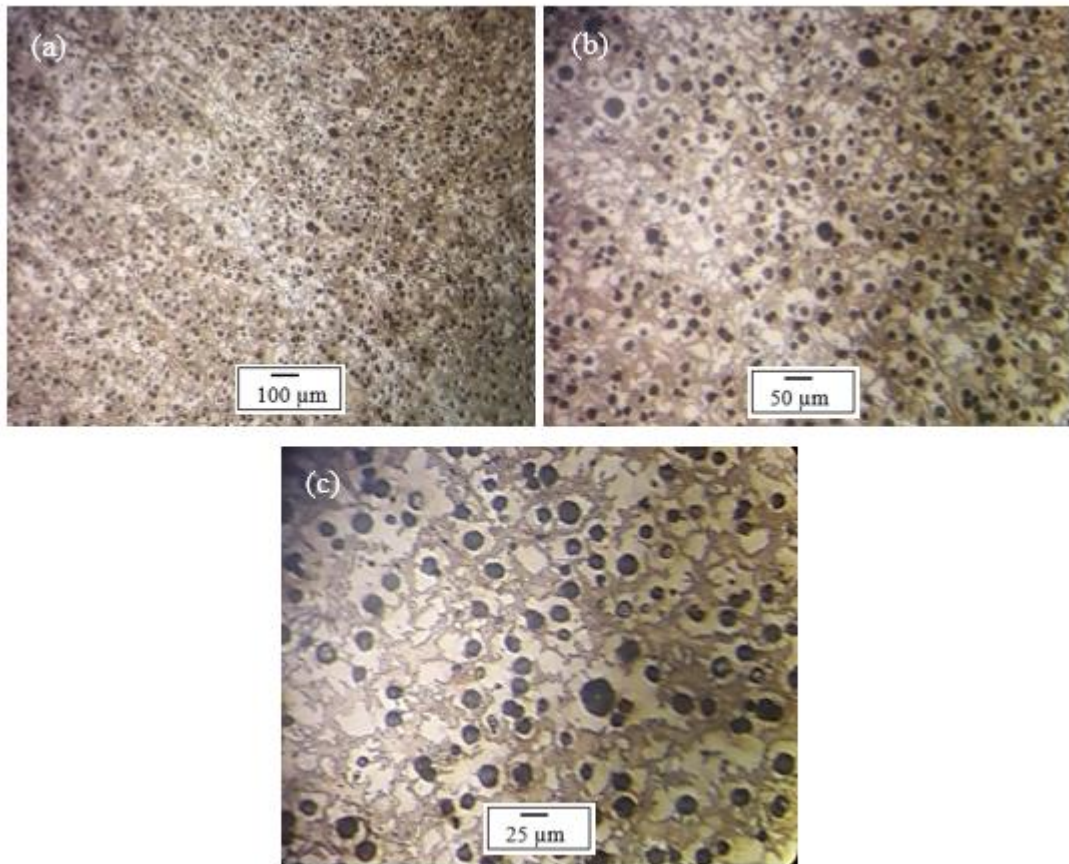
Figura 16 - Amostra com tratamento térmico de têmpera a 900°C. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autora (2020).

Na amostra 3, foi realizado o tratamento térmico de têmpera na temperatura de 950° C, nota-se que a matriz antes totalmente ferrítica, transformou-se parcialmente em perlita. Mesmo com o aumento da temperatura da têmpera, a matriz da amostra não se tornou totalmente perlítica como pode ser visto na Figura 17.

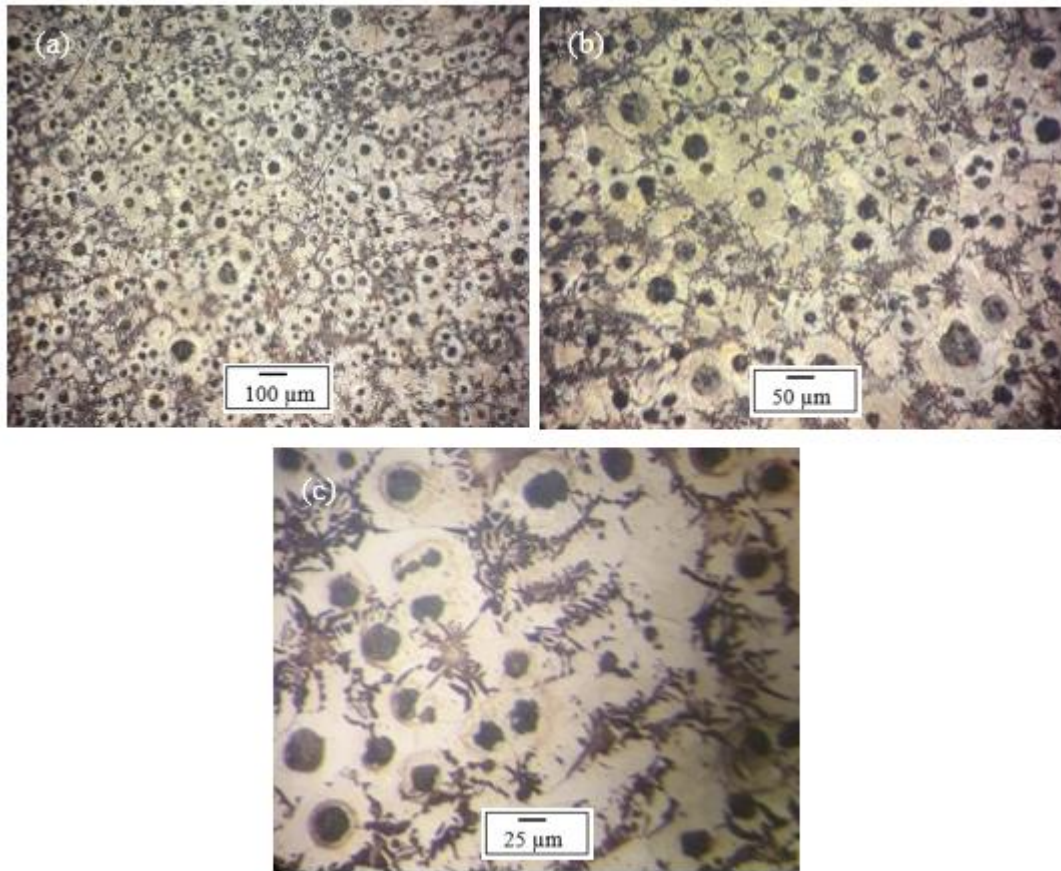
Figura 17 - Amostra com tratamento térmico de têmpera a 950°C. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autora (2020).

Com a realização do tratamento do revenimento logo após as têmperas é possível notar além dos nódulos de grafita na matriz ferrítica, obteve formações de perlita. A perlita é constituída por lamelas de ferrita e cementita intercaladas, onde a cementita é oriunda da decomposição da grafita.

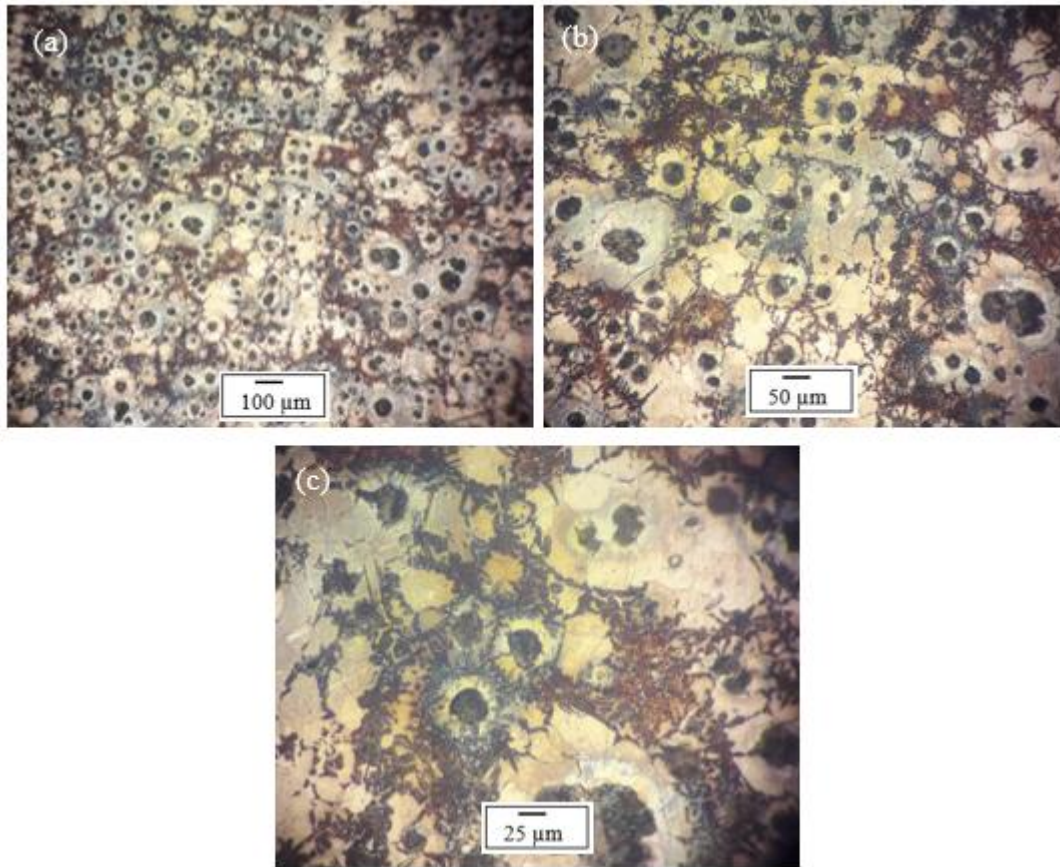
Figura 18 - Amostra com tratamento térmico de têmpera a 900°C e revenido a 480°C. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autora (2020).

A amostra que antes possuía uma matriz totalmente ferrítica, após passar pelo tratamento térmico da têmpera a 950°C e revenido a 480°C torna-se uma amostra com uma matriz ferrita + perlita. O ferro fundido nodular tratado termicamente, agora apresenta uma estrutura conhecida como “olho de boi” onde os nódulos de grafita estão envoltos por ferrita e perlita como pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 - Amostra com tratamento térmico de têmpera a 950°C e revenido a 480°C. Aumento (a)100x, (b) 200x e (c) 400x. Ataque Nital 2%.



Fonte: Autora (2020).

## 4.2 DUREZA E MICRODUREZA

A microdureza dos microconstituintes presentes no ferro fundido nodular foi obtida através de medidas na microestrutura da, ferrita e perlita de cada amostra, aplicando uma carga de 0,2 HV e para a macrodureza foi aplicada uma carga de 50 HV em lugares aleatórios e realizado uma média. O Quadro 3 apresenta os valores obtidos de macrodureza e microdureza das amostras.

Sendo:

Amostra 1: amostra no estado bruto de fusão;

Amostra 2: amostra com tratamento térmico de têmpera a 900°C;

Amostra 3: amostra com tratamento térmico de têmpera a 950°C;

Amostra 4: amostra com tratamento térmico de têmpera a 900°C e revenido a 480°C;

Amostra 5: amostra com tratamento térmico de têmpera a 950°C e revenido a 480°C;

Quadro 3 – Valores de microdureza e macrodureza Vickers das amostras.

Ensaio	Microestrutura	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
<b>Microdureza (HV)</b>	Ferrita	217	248	228	356	331
	Perlita	-	327	405	448	413
<b>Macroductura (HV)</b>	Média	202 ± 4,79	299 ± 4,52	233 ± 3,39	348 ± 2,34	381 ± 5,52

Fonte: Autora (2020).

Com base na literatura, segundo Silva (2013), as durezas das microestruturas ferrita, perlita e cementita estão dispostas no Quadro 4.

Quadro 4 – Valores de dureza

Microestrutura	Ferrita	Perlita	Cementita
<b>Dureza (HV)</b>	100	200	700 a 800

Fonte: SILVA (2013).

Realizando um comparativo dos dados coletados das amostras com o encontrado na literatura, notamos que os tratamentos foram eficazes nas amostras, pois ocorreu um aumento nos valores de dureza. Como a microdureza foi realizada o mais próximo possível da microestrutura da grafita, pode ter ocorrido uma diferença de valores pois a indentação não foi posicionada exatamente sobre a microestrutura da grafita.

Já a microestrutura da ferrita e perlita, ambas tiveram um aumento significativo de dureza nas duas temperaturas de têmpera comparando com Silva (2013).

Da mesma forma, as amostras 4 e 5 passaram pelo tratamento térmico da têmpera a 900°C e 950°C respectivamente seguidos de um revenimento na temperatura de 480°C. Essas amostras aumentaram seus valores de dureza, analisando ambos valores de macro e microdureza.

A partir disso, é possível notar a importância do tratamento térmico do revenimento após a têmpera, pois o mesmo auxilia na formação de perlita e conseqüentemente um aumento de dureza.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado a aplicação de tratamentos térmicos para a modificação das propriedades de um ferro fundido nodular de matriz ferrítica.

Devido a temperatura de 900°C que a amostra 2 foi submetida, esta obteve o valor mais baixo de dureza em comparativo as demais amostras na microestrutura da perlita, com um valor de 327 HV e  $299 \pm 4,52$  HV de média feitas na macrodureza.

A amostra 5 que foi tratada termicamente por têmpera a 950°C e revenimento a 480°C obteve maior dureza comparada as demais amostras, devido a maior formação de perlita em sua microestrutura. Essa amostra obteve a microdureza de 413 HV na microestrutura da perlita e  $381 \pm 5,52$  HV de média para a análise feita na macrodureza.

A diferença morfológica observada nas amostras tratadas termicamente contribuiu para a diferença nos valores de dureza e microdureza medidos.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Um intervalo maior entre as temperaturas de têmpera, possibilitando uma mudança mais significativa na microestrutura do material em questão;
- Inserir outros meios de resfriamento do material após os tratamentos térmicos, como por exemplo o óleo.



## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Monica Santos. **Análise comparativa da microestrutura e da dureza do aço ASTM A182 F22**. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384-17**: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. EUA, 2017. 40 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E92-17**: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. EUA, 2017. 27 p.

BERTOL, Helton Claudio. **Determinação de critérios para aceitação de medições de dureza realizadas com durômetros portáteis em regiões de soldas**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós Graduação em Engenharias de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**. 2° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002; p.295,402 e 403. 437

CALMET (EUA). **Different Types Of Cast Iron**, 2016. Disponível em: <<http://www.calmet.com/different-types-of-cast-iron/>>. Acesso em: 30 ago. 2019.

CHUANG, C. **3D Quantitative analysis of graphite morphology in high strength cast iron by high-energy X-ray tomography**. Scripta Materialia, 2015. Volume 106, Pages 5-8

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed. São Paulo: ABM, 2005. 518 p

COLPAERT, Hunbertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos**. 4. ed. São Paulo: Villares Metals, 2008. 652 p. ATUALIZADO POR ANDRÉ LUIZ V. DA COSTA E SILVA

DE SOUSA, Ester. C. Estudo da Oxidação do Óleo de Soja com diferentes concentrações de Aditivos Antioxidantes, para uso em Tratamentos Térmicos de Têmpera. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007;

FRITSCH, Rudolf. **Ferro Fundido: FE 45012 (Nodular)**. Cachoeirinha, RS: Favorit, 2018. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/ferro-fundido/fe-45012-nodular>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

FERRO, P.; LAZZARIN, P.; BERTO, F. **Fatigue properties of ductile cast iron containing chunky graphite**. In: LAVERNIA, E.J. (ed.). *Materials Science and Engineering: A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*. Vicenza, Itália: Elsevier, 2012. v. 554, p. 122-128. ISBN 0921-5093.

FREITAS, B. J. M. **Estudo da Influência das Temperaturas de Austenitização na Dureza dos Aços AISI D6 e SAE 1045**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

GONZAGA, R.A. **Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons**. *Materials Science & Engineering A*. Vol. 567, pp. 1-8, 2013.

GRACIOSO, José F. F. **Efeito das Condições de Têmpera na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Martensítico Fundido CA6NM**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

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

KACK, Sirnei César. **Estudo das tensões residuais do ferro fundido em um componente pantográfico de semeadora para agricultura de precisão**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Agricultura de Precisão, Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

KEOUGH, J.R. **ADI developments in north america** – Revised 2002. Applied Process Inc., 2002.

LIMA FILHO, Helilton Morais Rego. **Análise de ataques químicos para revelação de microestrutura de soldas dissimilares de aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos**. TCC

(Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica., Departamento de Engenharia Metalúrgica de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

OMOLE, Sylvester O. OYETUNJI, Akinlabi. ALANEME, Kenneth K. OLUBAMBI, Peter A. **Structural characterization and mechanical properties of pearlite – Enhanced micro-alloyed ductile irons.** Journal of King Saud University - Engineering Sciences, Volume 32, Issue 3, March 2020, Pages 205-210.

PUTATUNDA, S.K.; KESANI, S.; TACKET, R.; LAWES, G. **Development of austenite free ADI (austempered ductile cast iron).** Materials Science and Engineering A, v. 435-436, p. 112-122, 2006.

RASHIDI, Ali M.; MOSHREFI-TORBATI, M. **Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure.** Materials Letters, Kermanshah, p.203-207, 2000.

RIOS, M. C. G; FARIA, G. A; FARIA, G. L. **Faria. Estudo da Influência de Parâmetros de Medição sobre a Representatividade e Dispersão dos Resultados do Ensaio de Microdureza Vickers.** In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016, Natal.

RODRIGUES, R. B. **Microestrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular ao Cu e Ni+Cu sob condições variáveis de Austêmpera.** 105 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Centro Universitário Sociesc – Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville, 2016.

SCHLATTER, Djeison. **Efeito da têmpera e revenido nas propriedades mecânicas e microestruturais de aços rápidos obtidos por processos convencionais e metalurgia do pó.** 137 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais.** 3. ed. São Paulo: Villares Metals, 2010. 645 p.

SILVA, Clênio. **Influência do número de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular austemperado**. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Metalurgia Física, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, Lucas Filipe Martins da; ALVES, Fernando Jorge Lino; MARQUES, Antônio Torres. **Materiais de Construção**. [s.l]: Publindústria - Edições Técnicas, 2013.

SOUZA, Bruno Vaz. **Desenvolvimento de Ferro Fundido Austemperado (ADI) em Banho de Zinco-Alumínio**. 2015. 70 p. Dissertação em Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SOUZA, Gabrielle Costa. **Ferro Fundido. Mostra de Materiais**, 12 dez. 2017. Disponível em: <<http://www.encimat.cefetmg.br/2017/12/12/ferro-fundido/>>. Acesso em: 30 ago. 2019.

VIDAL, Douglas Ferreira. **Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino**. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.