

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

BRENO CÉSAR MARÇAL RIBEIRO

**EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO TÉRMICO NA
MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR**

BELO HORIZONTE

2015

BRENO CÉSAR MARÇAL RIBEIRO

**EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO TÉRMICO NA
MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Co-orientadora: Eng. Suzanny Cristina Soares Martins

BELO HORIZONTE

2015

BRENO CÉSAR MARÇAL RIBEIRO

**EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DE TRATAMENTO TÉRMICO NA
MICROESTRUTURA E NA DUREZA DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa (orientadora)

Eng. Suzanny Cristina Soares Martins (co-orientadora)

Prof. Dr. Wellington Lopes

Profa. MSc. Luciana Boaventura Palhares

BELO HORIZONTE

2015

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa pela orientação dedicada, confiança e ensinamentos durante toda a graduação.

À Co-orientadora Eng. Suzanny Cristina Soares Martins pela disponibilidade e contribuições fundamentais para realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Wellinton Lopes pelos ensinamentos, suporte e incentivos.

Ao Prof. Dr. Augusto César Bezerra pela confiança em disponibilizar o equipamento de microscopia eletrônica de varredura.

Às alunas de mestrado Aline Magalhães e Grazielle Braga, pelo suporte técnico, paciência e disponibilidade.

A todos os professores e colegas do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pelos vastos ensinamentos.

A todos os profissionais da TEKSID que com dedicação contribuíram para minha formação como Engenheiro de Materiais, em especial ao Gerente Otto Mol e ao Gestor Antenor José de Souza por todos os ensinamentos e supervisão. Agradeço, também, o responsável pelo Laboratório Metalográfico da TEKSID, Afrânio de Souza Miranda, por disponibilizar o laboratório para o ensaio de dureza Brinell.

Agradeço aos meus pais, Breno e Maria do Carmo, que me ensinaram que nenhum obstáculo é grande demais quando lutamos e confiamos em DEUS. Obrigado por todo amor, dedicação e por terem me dado a melhor irmã. Érica, você é um exemplo de sabedoria e coragem.

À Gabi, por estar ao meu lado durante toda a graduação. Obrigado por sempre me motivar e alegrar os meus dias. Sou muito feliz por crescer ao seu lado.

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se as propriedades gerais dos ferros fundidos nodulares, investigando e relacionando as microestruturas formadas, morfologia da grafita e composição química com a possível redução de dureza, após o tratamento térmico de recozimento de ferritização e decomposição de carbonetos, envolvendo a análise dos parâmetros de tempo, temperatura e taxa de resfriamento.

A realização da parte experimental iniciou com a fabricação do material pelo processo de fundição onde os parâmetros metalúrgicos e químicos foram acompanhados tanto na preparação do metal quanto após o vazamento das peças. Os efeitos das diferentes condições de tratamento térmico em relação à amostra inicial foram avaliados por meio de ensaios de dureza e análise metalográfica, essa última utilizando microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. A influência desses tratamentos térmicos no aumento do nódulo de grafita e na redução de dureza da matriz do ferro fundido nodular foi verificada e analisada.

Palavras-chaves (04): Ferro Fundido Nodular, Tratamentos Térmicos, Comportamento Mecânico, Recozimento de Esferoidização.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	07
2. OBJETIVO.....	09
2.1. Objetivos Gerais.....	09
2.2. Objetivos Específicos.....	09
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. Características Gerais dos Ferros Fundidos.....	10
3.1.1. Composição Química.....	10
3.1.2. Taxa de Resfriamento.....	10
3.1.3. Formação da Grafita.....	11
3.2. Grupos de Ferros Fundidos.....	14
3.2.1. Ferro Fundido Branco.....	14
3.2.2. Ferro Fundido Cinzento.....	15
3.2.3. Ferro Fundido Maleável.....	16
3.2.4. Ferro Fundido Vermicular.....	17
3.3. Ferro Fundido Nodular.....	18
3.3.1. Fabricação dos Ferros Fundidos Nodulares.....	18
3.3.2. Microestrutura dos Ferros Fundidos Nodulares.....	18
3.3.3. Propriedades dos Ferros Fundidos Nodulares.....	20
3.4. Tratamentos Térmicos nos Ferros Fundidos Nodulares.....	22
3.4.1. Tratamento Térmico para Alívio de Tensões.....	22
3.4.2. Tratamento Térmico de Normalização.....	22
3.4.3. Tratamento Térmico de Austêmpera.....	23
3.4.4. Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento.....	24
3.4.5. Tratamento Térmico de Decomposição de Carbonetos.....	25
3.4.6. Tratamento Térmico de Recozimento de Ferritização.....	26

4. METODOLOGIA.....	29
4.1.Fabricação do Material.....	29
4.1.1. Medição de Temperatura.....	30
4.1.2. Retirada de Amostra para Análise Química.....	31
4.1.3. Correção Química do Metal.....	32
4.1.4. Vazamento do Metal.....	33
4.2. Preparação do Material.....	33
4.2.1. Tratamentos Térmicos.....	34
4.2.2. Análise Metalográfica.....	35
4.2.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	38
4.2.4. Ensaio de Dureza.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1. Ferro Fundido Nodular no Estado Inicial.....	41
5.2. Ferro Fundido Nodular Tratado Termicamente.....	43
6. CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos são usados com frequência devido à combinação de propriedades importantes para a engenharia trazendo vantagens que antes eram encontradas apenas nos aços. São utilizados em diferentes segmentos industriais e aplicados principalmente na indústria automobilística em vários componentes do motor e peças (CHIAVERINI, 2005). Como o próprio nome já diz, o ferro fundido é comumente obtido por meio da fundição, processamento que possibilita a obtenção de peças com formas complexas e de tamanhos muito variados (FERREIRA, 2002). Nos tópicos a seguir serão discutidas as influências da composição química, taxa de resfriamento e morfologia da grafita nas propriedades apresentadas em diferentes classes dos ferros fundidos.

Dependendo da composição química, taxa de resfriamento, e forma da grafita é possível classificar os ferros fundidos em cinco famílias: ferro fundido branco; ferro fundido cinzento; ferro fundido maleável; ferro fundido vermicular e ferro fundido nodular (GUESSER, 2009).

A morfologia da grafita irá influenciar diretamente nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos, por exemplo, a grafita na forma esférica terá menor efeito em relação à concentração de tensões, enquanto que as formas mais agudas irão resultar em concentração de tensão mais alta (COLPAERT, 2008). Neste trabalho, serão abordadas as diferentes morfologias da grafita e a sua influência nas propriedades mecânica.

Os ferros fundidos nodulares, tema principal desse trabalho, são utilizados em diferentes aplicações em vários setores da engenharia por aliar propriedades importantes como alta tenacidade, resistência mecânica e ductilidade. Dependendo da composição química ou tratamentos térmicos subsequentes, o ferro fundido apresentará diferentes propriedades mecânicas, podendo ser dividido em subclasses de acordo com os valores de limite de resistência, alongamento e limite de escoamento (ASM HANDBOOK, 2004).

Um aspecto muito importante para o estudo dos ferros fundidos nodulares é a microestrutura, esta influenciará diretamente nas propriedades e aplicações do mesmo. É possível observar matrizes perlíticas ou ferríticas nas diferentes aplicações da engenharia, mas a partir de diferentes tratamentos térmicos, também pode obter-se outras microestruturas.

Parte do trabalho experimental que será apresentado foi desenvolvido na TEKSID do Brasil, empresa em que o aluno Breno César Marçal Ribeiro realiza estágio. O aluno participou, assim, de todas as etapas de produção da peça de ferro fundido nodular que foi utilizada nesse trabalho.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi analisar os efeitos dos tratamentos térmicos de recozimento de ferritização e de decomposição de carbonetos na microestrutura e nas propriedades desenvolvidas em um ferro fundido nodular.

2.2. Objetivos específicos

As metas ou objetivos específicos deste trabalho são descritos a seguir:

- a) Produção da liga;
- b) Caracterização microestrutural do material utilizado no trabalho;
- c) Análise da influência do tratamento térmico na microestrutura;
- d) Verificar a influência do tempo e da temperatura de encharque na microestrutura e propriedades mecânicas do material.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Características Gerais dos Ferros Fundidos

3.1.1. Composição química

Quanto à composição química, o ferro fundido é uma liga que apresenta ferro-carbono (Fe-C) em sua composição, podendo conter ainda outros elementos como, por exemplo, silício (Si), manganês (Mn), fósforo (P) e o enxofre (S). Dentre esses elementos, de maneira geral, os que exercem maior influência na microestrutura dos ferros fundidos são: o Si, o Mn e o C (ASM HANDBOOK, 2004).

O Si atua como elemento grafitizante durante a solidificação, propiciando a formação de grafita e ferrita durante a reação eutetóide, também reduzindo a estabilidade da cementita. Quando em pouca ou nenhuma quantidade, o ferro fundido apresenta, normalmente, fratura branca, ou seja, com matriz rica em cementita. O Mn, por sua vez, tem o efeito de contrapor parte da ação grafitizante do Si, já que durante a solidificação apresenta fraca tendência carbonetante. Além disso, durante a reação eutetóide, o Mn é um forte perlitzante, sendo muito utilizado para a produção de peças com matriz perlítica. (CHIAVERINI, 2005; COLPAERT, 2008). Geralmente, a porcentagem de carbono encontrada varia de 2,1 a 4,5% e parte deste carbono pode ser encontrado na estrutura na forma de grafita.

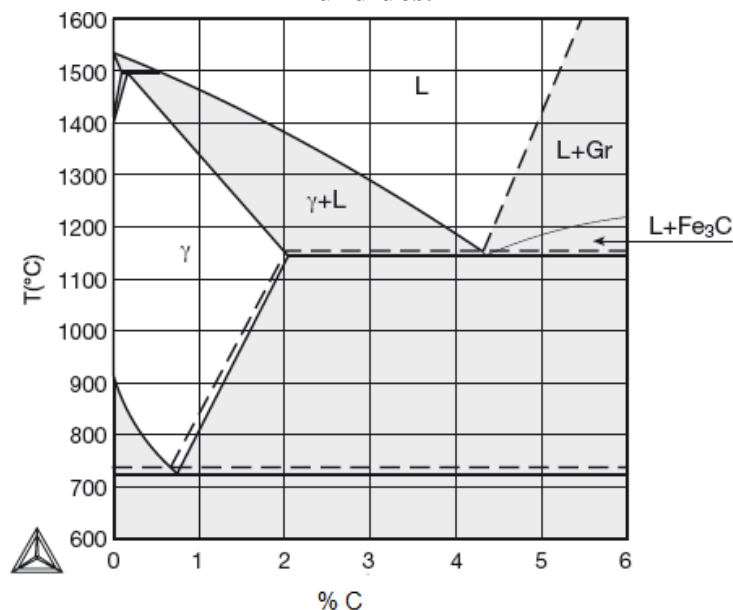
3.1.2. Taxa de resfriamento

Dependendo da composição química e velocidade de resfriamento, o ferro fundido pode se solidificar de duas maneiras, na forma metaestável e na forma estável. Para teores baixos de Si e carbono aliados a alta taxa de resfriamento, é mais provável ocorrer uma solidificação segundo a forma metaestável, favorecendo a formação de cementita, que é caracterizada por ser muito dura e frágil. Para ligas com altos teores de C e Si, aliados à baixa taxa de resfriamento, o mais provável é observar uma solidificação segundo a forma estável. Neste caso, observa-se formação de um eutético grafítico, ou seja, formação de carbono livre na forma de grafita. (CHIAVERINI, 2005).

A taxa de resfriamento aliada à composição química também é muito importante para controlar as proporções de ferrita e perlita na matriz do material fundido. Para taxas de resfriamento lentas, é mais provável a formação de ferrita, ao contrário, para taxas de resfriamento superiores e com a adição de elementos perlitizante, é mais provável a formação de perlita na matriz do ferro fundido (GONZAGA, 2012).

Observando o diagrama de equilíbrio Fe-C, na Figura 01, referente à faixa que corresponde aos ferros fundidos, pode-se entender melhor as duas formas de solidificação. A solidificação metaestável se dá na linha contínua do diagrama, na temperatura de 1148°C, podendo ser exemplificada pela equação $L(4,30\%C) = \gamma(2,11\%C) + Fe_3C(6,67\%C)$. Neste caso, observa-se o equilíbrio com a cementita. A solidificação estável se dá na linha tracejada do diagrama, na temperatura de 1154°C, podendo ser exemplificada pela equação $L(4,26\%C) = \gamma(2,08\%C) + C_{grafita}(100\%C)$. Neste caso, observa-se o equilíbrio com a grafita (COLPAERT, 2008).

Figura 1 - Diagrama de equilíbrio Fe-C, referente à faixa que corresponde aos ferros fundidos.



Fonte: COLPAERT, 2008

3.1.3. Formação da grafita

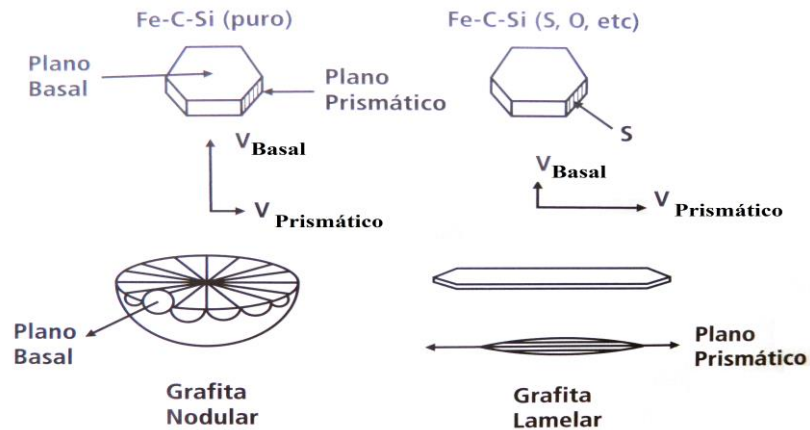
Segundo Chiaverini (2005), a formação da grafita está associada a alguns fatores, dentre os quais podem ser destacados teores de carbono e silício associados à taxa de resfriamento. Aumentando apenas o teor de Si, observa-se uma quantidade maior de grafita que, por sua vez se apresentará

em veios de maiores dimensões. Diminuindo apenas o teor de C, observa-se uma menor proporção de grafita, exibindo ainda veios menores. Além disso, taxas de resfriamento elevadas não são favoráveis à decomposição da cementita, neste caso espera-se pouca grafitação quando usados baixos teores de C e Si.

Outro fator relacionado à grafitação é a inoculação, que tem como objetivo formar núcleos propícios para o início da formação da grafita. Na inoculação, adiciona-se ao banho de ferro fundido uma pequena quantidade de produtos, como grafita ou ferro silício, que irão atuar na formação de germens heterogêneos, propiciando a precipitação da grafita (FERREIRA, 2002). Além desses inoculantes, é comum o uso de Ca-Si, Ca-Si-Ti e Si-Ba, que também apresentam efeito grafitante quando adicionados às ligas. É importante destacar que temperaturas elevadas de fusão, acima de 1700 °C, tendem a destruir núcleos de grafita, sendo prejudicial à formação da mesma (CHIAVERINI, 2005). Para a realização da inoculação deve-se considerar o *fading*, que se refere ao tempo máximo a partir do qual o inoculante perde a eficiência. Dessa forma, o vazamento deve ocorrer o mais rápido possível após ser realizada a inoculação, com *fading* inferior a seis minutos (LABRECQUE & GAGNE, 1998).

A grafita possui estrutura hexagonal com possibilidade de crescimento seguindo dois planos, o plano basal e o plano prismático. O crescimento segundo o plano basal favorece a formação da grafita em nódulos, já o crescimento segundo o plano prismático favorece a formação da grafita na forma lamelar, como pode ser observado na **Figura 2**. O que irá definir a morfologia da grafita serão os fenômenos superficiais modificados pela presença ou ausência de elementos tensoativos, como o oxigênio e enxofre. A presença considerável de elementos tensoativos tornará mais favorável, em termos de tensão superficial, o crescimento segundo o plano prismático, obtendo grafita lamelar. Quando em quantidade reduzida a presença de agentes tensoativos, observa-se um crescimento mais favorável segundo o plano basal. Quando o objetivo é obter grafita nodular, é comum a utilização de certo teor de magnésio (Mg) no banho. O Mg se combina facilmente com o enxofre e oxigênio formando, respectivamente, MgO e MgS. Esta reação reduzirá o percentual de elementos tensoativos, favorecendo a formação da grafita nodular (GUESSER, 2009; COLPAERT, 2008).

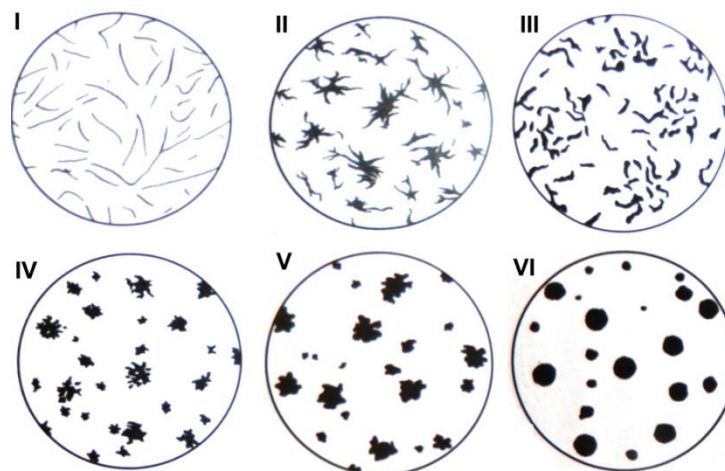
Figura 2 - Mecanismos de crescimento da grafita segundo os planos prismático e basal.



Fonte: GUESSER, 2009.

A morfologia da grafita irá influenciar diretamente nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos, por exemplo, a grafita na forma esférica terá menor efeito em relação à concentração de tensões, enquanto que as formas mais agudas irão resultar em concentração de tensão mais alta. Por outro lado, a grafita em forma de veios irá proporcionar ao material uma maior capacidade em absorver vibrações (GUESSER, 2009). Segundo a norma ISO 945 (2008), a grafita presente nos ferros fundidos pode ser dividida em 6 classes, de acordo com a sua forma. Essas classes podem ser vistas na **Figura 3**.

Figura 3 - Classes de grafita comumente encontrada nos ferros fundidos, de acordo com a norma ISO 945.



Fonte: NORMA ISO 945, 2008.

3.2. Grupos de Ferros Fundidos

Segundo Guessser (2009), é possível classificar os ferros fundidos em cinco famílias: ferro fundido branco; ferro fundido cinzento; ferro fundido maleável; ferro fundido vermicular e ferro fundido nodular. Essa classificação leva em conta diferentes fatores como a forma da grafita para os ferros fundidos nodular e vermicular, o tipo de fratura para os ferros fundidos branco e cinzento e a propriedade mecânica, no caso do ferro fundido maleável.

Especificamente para as ligas com a presença do carbono de forma isolada, além da morfologia da grafita, os ferros fundidos podem ser classificados em relação à matriz metálica e aspecto da fratura. Em relação à matriz, esta será normalmente constituída de ferrita e/ou perlita. Quando constituída em maior parte de ferrita, o material apresentará valores mais baixos de resistência mecânica, apresentando ainda maior ductilidade e tenacidade. Quando a matriz metálica for constituída principalmente por perlita, o material apresentará bons valores de resistência mecânica e baixos valores de ductilidade. Pode-se ainda, encontrar a matriz com estrutura martensítica revenida ou ausferrítica (GUESSER, 2009). Já em relação à classificação pelo aspecto da fratura, pode-se observar dois tipos, a fratura branca e a cinza. Na primeira não há a presença de grafita e o carbono está combinado na forma de cementita, verificando-se uma fratura de cor clara. Na fratura cinza há a presença de grafita e a fratura apresenta-se escura (COLPAERT, 2008).

A classe dos ferros fundidos nodulares, tema do presente trabalho, será abordada com maior nível de detalhes no tópico 3.3.

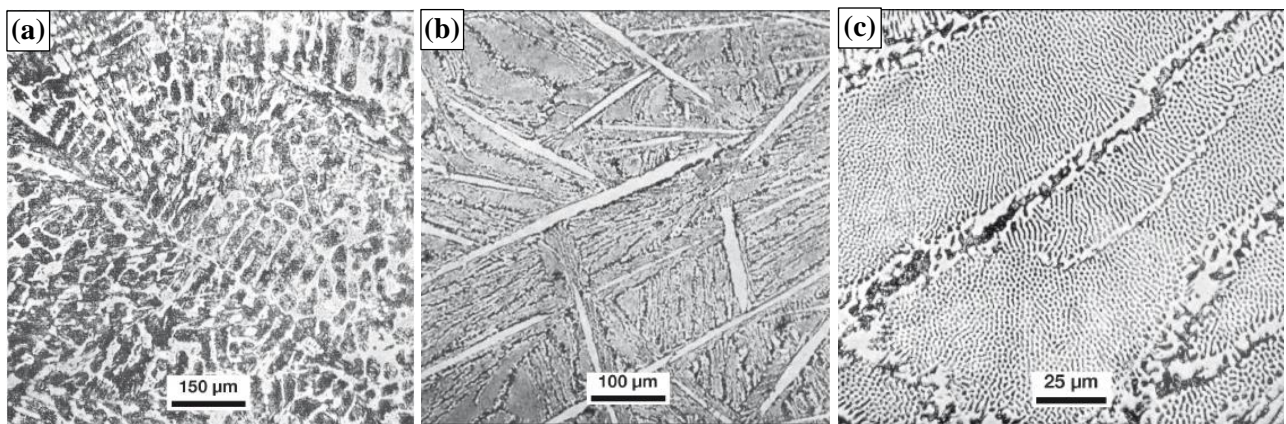
3.2.1. Ferro fundido branco

No ferro fundido branco o carbono se encontra principalmente na forma de cementita, devido à solidificação que se dá na forma metaestável, não possuindo grafita livre em sua microestrutura. Neste caso, a liga formada apresentará elevada dureza e resistência ao desgaste e, conseqüentemente, baixa usinabilidade. Por isso são fundidas próximas às formas finais, evitando o acabamento por usinagem. Devido a essas propriedades, são comumente utilizados em equipamentos de mineração e moagem onde a resistência ao desgaste é muito importante. No

caso da fratura, verifica-se um aspecto claro, conhecido como fratura branca o que dá o nome a esta classe dos ferros fundidos (CHIAVERINI, 2005).

Os ferros fundidos brancos podem ainda ser divididos em hipoeutéticos, eutéticos e hipereutéticos, uma vez que a porcentagem de carbono terá influência na microestrutura formada. Na **Figura 4**, podem-se observar as diferentes microestruturas que o ferro fundido branco poderá apresentar. Para o hipoeutético, observa-se uma microestrutura de cristais de perlita envolvida por ledeburita. Na microestrutura de um ferro fundido eutético, pode-se verificar a ledeburita constituída de glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita. Para o hipereutético, observa-se cristais de cementita sobre um fundo de ledeburita (COLPAERT, 2008).

Figura 4 - Microestruturas do ferro fundido branco.



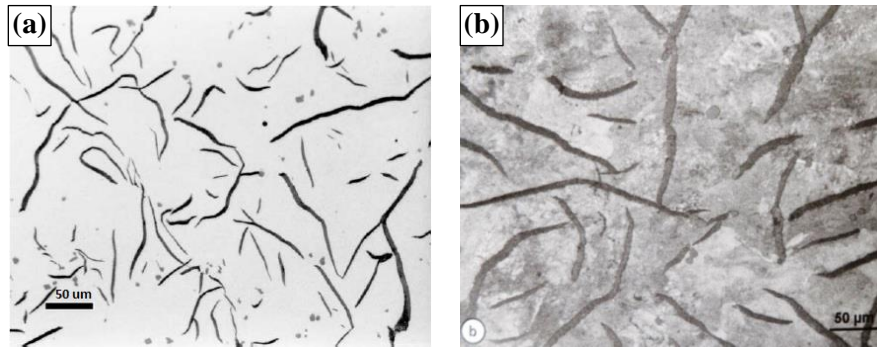
(a) Ferro fundido branco hipoeutético, (b) hipereutético e (c) eutético.

Fonte: COLPAERT, 2008.

3.2.2. Ferro fundido cinzento

Os ferros fundidos cinzentos, geralmente contêm de 2,5 a 4 % de C e de 1 a 3 % de Si, podendo conter ainda manganês, fósforo e enxofre. Devido à sua composição química, o mais provável é observar uma solidificação segundo a forma estável verificando o equilíbrio com a grafita. A grafita apresenta morfologia normalmente lamelar, conforme apresentado na **Figura 5**. Essa morfologia contribui para o aumento da resistência mecânica e da ao ferro fundido cinzento a capacidade de absorver vibrações (ASM HANDBOOK, 2004).

Figura 5 - Microestrutura de ferro fundido cinzento revelando a morfologia da grafita.



(a) Sem ataque químico. (b) Com ataque químico

Fonte: RADZIKOWSKA, 2005.

Fonte: GUESSER, 2009.

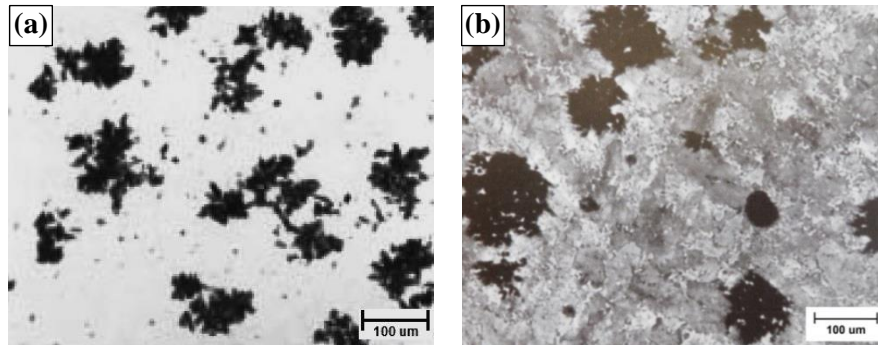
Dentre os ferros fundidos, a classe dos cinzentos é a mais utilizada devido às propriedades de boa resistência mecânica e desgaste, capacidade de absorver vibrações e boa usinabilidade, além disso, o custo de produção é muito baixo. No caso da fratura, verifica-se uma estrutura escura, sendo conhecida como fratura cinza, o que dá o nome a esta classe dos ferros fundidos (CHIAVERINI, 2005).

3.2.3. Ferro fundido maleável

Quando o ferro fundido branco é submetido a um tratamento térmico denominado maleabilização, visando melhorias na ductilidade e tenacidade, forma-se uma nova classe denominada ferro fundido maleável. A principal característica desta classe é justamente a ductilidade. Com isso, menciona-se que o ferro fundido maleável apresenta propriedades intermediárias entre o ferro fundido cinzento e os aços, podendo ultrapassar 10% de alongamento uniforme em um ensaio de tração uniaxial (CHIAVERINI, 2005).

O tratamento térmico de maleabilização atuará basicamente na decomposição da matriz de cementita, formando manchas irregulares de grafita na microestrutura, conforme pode ser observado na **Figura 6**. No entanto, o alto custo e o elevado tempo de fabricação referente ao tratamento térmico de maleabilização é uma desvantagem na utilização dessa classe de ferro fundido (LABRECQUE & GAGNE, 1998).

Figura 6 - Microestrutura de ferro fundido maleável revelando a morfologia da grafita.



(a) Sem ataque químico. (b) Com ataque químico

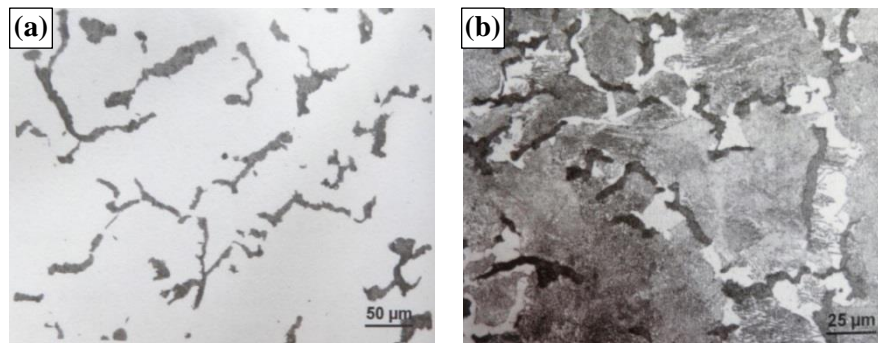
Fonte: ASM HANDBOOK, 2004.

Fonte: COLPAERT, 2008

3.2.4. Ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular é conhecido também como ferro fundido de grafita compacta, justamente pela morfologia da grafita, apresentando-se arredondada e mais grosseira. Essa morfologia é intermediária à da grafita presente nos ferros fundidos cinzento e nodular (COLPAERT, 2008). Em relação às aplicações, essa liga é utilizada por apresentar maior resistência à tração, ductilidade e tenacidade do que o ferro fundido cinzento e melhor usinabilidade, fundibilidade e capacidade de amortecimento do que o ferro fundido nodular, sendo empregada em aplicações onde propriedades intermediárias às duas classes são requeridas (CHIAVERINI, 2005). Na **Figura 7**, observa-se a morfologia da grafita e a microestrutura de um ferro fundido vermicular.

Figura 7 - Microestrutura de ferro fundido vermicular revelando a morfologia da grafita.



(a) Sem ataque químico. (b) Com ataque químico

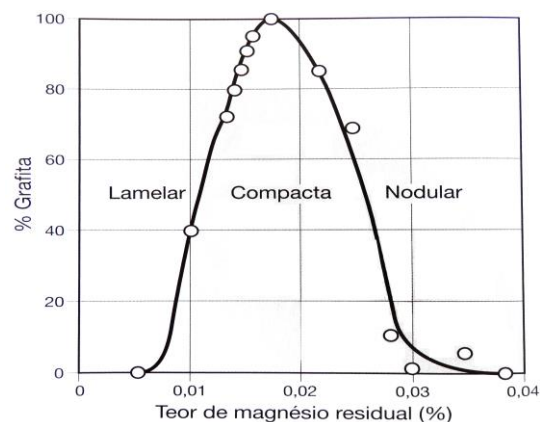
Fonte: GUESSER, 2009.

3.3. Ferro Fundido Nodular

3.3.1. Fabricação dos ferros fundidos nodulares

Para a obtenção do ferro fundido nodular é importante envolver etapas de ajuste da composição química e taxa de resfriamento, por isso, na sua fabricação, é comum a adição de alguns elementos de liga. Adicionam-se ao metal fundido elementos que favorecem a formação da grafita com morfologia nodular, que são denominados nodularizantes. Esses favorecem a forma esférica da grafita, geralmente apresentando magnésio em sua composição. O magnésio é caracterizado por ser um forte desoxidante e dessulfurante, uma vez que ao entrar em contato com o metal fundido provoca uma reação violenta se ligando ao enxofre e oxigênio, auxiliando na remoção dos mesmos da liga (GUESSER, 2009). Como já discutido, o oxigênio e o enxofre são elementos tensoativos que favorecem a formação da grafita lamelar. Por isso, quando o objetivo é obter grafita nodular, é comum a utilização de certo teor de magnésio no banho, o que favorece o crescimento da grafita segundo o plano basal, obtendo o ferro fundido nodular. Na **Figura 8** é possível observar a influência do teor de magnésio na morfologia da grafita. Verifica-se que o aumento do teor de Mg até certo valor favorece a grafita na forma nodular.

Figura 8 - Influência do teor de magnésio na quantidade de grafita formada



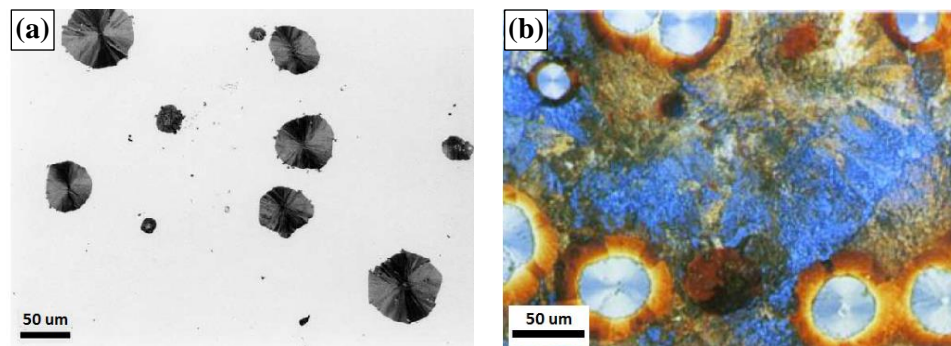
Fonte: COLPAERT, 2008.

3.3.2. Microestrutura dos ferros fundidos nodulares

Além da morfologia nodular da grafita, a matriz metálica possuirá grande influência nas propriedades dos ferros fundidos nodulares. É comum observar ferros fundidos nodulares com matrizes perlíticas e/ou ferríticas nas diferentes aplicações da engenharia.

A matriz ferrítica nos ferros fundidos nodulares inicialmente era obtida apenas por tratamentos térmicos, mas a busca por novas maneiras de obtê-la levou ao ajuste da composição química, permitindo que a ferrita fosse formada em peças fundidas sem tratamentos térmicos posteriores. Assim, para obter uma matriz ferrítica, procura-se controlar os teores de elementos como o cobre, o manganês e estanho, uma vez que esses favorecem a formação de uma matriz perlítica. Conforme pode ser observado na **Figura 9**, é possível obter uma matriz mista, ou seja, com ferrita e perlita.

Figura 9 - Microestrutura do ferro fundido nodular revelando a morfologia da grafita.



(a) Sem ataque químico. (b) Com ataque químico

Fonte: RADZIKOWSKA, 2005.

Fonte: ASM HANDBOOK, 2004.

Uma matriz ferrítica em um ferro fundido nodular garante boa ductilidade e resistência ao impacto, já uma matriz perlítica é caracterizada, principalmente, pela maior resistência mecânica. Assim, uma matriz com as duas fases é requerida para obter um material com propriedades intermediárias. Analisando os valores de dureza Brinell apresentados na **Tabela 1**, pode-se constatar a influência da proporção de ferrita e perlita no aumento de dureza da matriz metálica. (GONZAGA, 2012).

Tabela 1- Dureza Brinell para um ferro fundido nodular com matriz ferrítica e matriz ferrítica/perlítica em diferentes proporções.

Ferro Fundido Nodular	HB 1	HB 2	HB 3	HB 4	HB (Média)
100% Ferrita	83,5	83,0	82,5	83,5	83,0
60% Ferrita e 40% Perlita	78,0	77,5	77,5	80,0	78,0
30% Ferrita e 70% Perlita	90,0	93,5	89,5	93,5	92,0

Fonte: GONZAGA, 2012. Adaptado pelo autor.

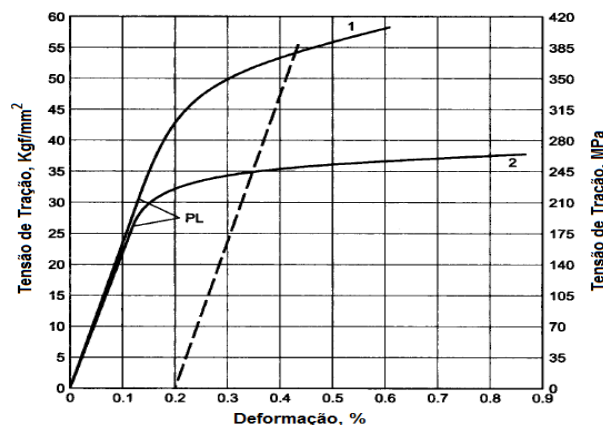
Além das microestruturas composta por diferentes proporções de ferrita e perlita, é possível, a partir de diferentes tratamentos térmicos, obter o ferro fundido nodular com matriz de bainita e austenita retida ou ferro fundido nodular com matriz martensítica. Os tratamentos térmicos comuns utilizados para diferentes microestruturas serão abordados no tópico 3.4.

3.3.3. Propriedades dos ferros fundidos nodulares

Os ferros fundidos nodulares, também conhecidos como ferros dúcteis ou ferros de grafita esferoidal, são utilizados em diferentes aplicações na engenharia por aliar a alta tenacidade, resistência mecânica e ductilidade. Ao contrário dos ferros fundidos cinzentos, a forma esférica da grafita minimiza as propriedades mecânicas influenciadas pela mesma, assim as propriedades são controladas principalmente pela matriz metálica. (ASM HANDBOOK, 2004).

Quando a matriz for constituída principalmente por perlita, o material apresentará valores mais significativos no que diz respeito à resistência mecânica, alcançando limite de resistência de até 900 MPa para valores de alongamento de 2 %. O contrário é esperado quando a matriz metálica for basicamente ferrítica, onde é encontrado um limite de resistência de 380-450 MPa para valores de alongamento de 10-12 %. (CHIAVERINI, 2005; GUESSER, 2009). Na **Figura 10**, observa-se que o ferro fundido nodular com matriz perlítica, representado pela curva 1, apresentou maior resistência a tração do que o ferro fundido nodular com matriz ferrítica, representado pela curva 2.

Figura 10 - Curva de tensão-deformação para dois tipos de ferro fundido nodular, com matriz perlítica (1) e matriz ferrítica (2).



Fonte: (ASM HANDBOOK, 2004).

De acordo com a norma ABNT NBR 6916/1981 é possível dividir os ferros fundidos nodulares em classes, conforme os valores encontrados de limites de resistência, alongamento e limite de escoamento. Na **Tabela 2** é apresentada essa classificação. Observa-se que o nome designado a cada classe está associado aos valores mínimos de limite de resistência e alongamento, respectivamente. Além disso, pode-se verificar que as classes com maior valor no que diz respeito ao limite de resistência e escoamento são as que possuem estrutura perlítica. Por outro lado, microestruturas ferríticas apresentam maior alongamento.

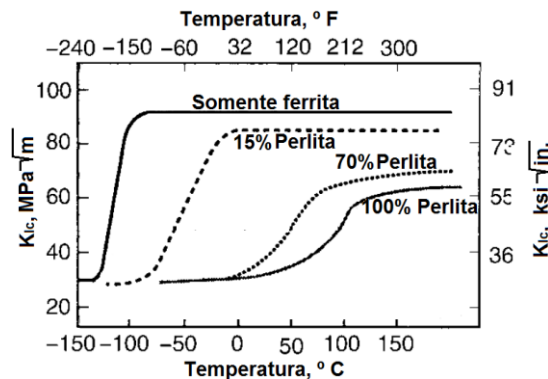
Tabela 2- Diferentes classes de ferro fundido nodular.

Classe	LR min [MPa]	LE min [MPa]	Alongamento min [%]	Dureza HB	Microestrutura Predominante
FE38017	380	240	17,0	140-180	Ferrítica
FE42012	420	280	12,0	150-200	Ferrítica
FE50007	500	350	7,0	170-240	Ferrítica e Perlítica
FE60003	600	400	3,0	210-280	Perlítica
FE70002	700	450	2,0	240-310	Perlítica
FE80002	800	500	2,0	240-310	Perlítica

Fonte: ABNT NBR 6916/1981

A microestrutura também apresentará efeitos significativos em relação à capacidade de absorver impactos. Conforme pode ser observado na **Figura 11**, os ferros fundidos nodulares com maior porcentagem de perlita apresentam menor capacidade de absorver impactos, oposto das microestruturas formadas predominantemente por ferrita, que apresentam melhor resposta na absorção de impacto.

Figura 11 - Resposta de diferentes microestruturas na absorção de impacto.



Fonte: ASM HANDBOOK, 2004.

3.4. Tratamentos Térmicos nos Ferros Fundidos Nodulares

A realização de tratamentos térmicos nos ferros fundidos visa atender algumas propriedades no que diz respeito à melhoria da tenacidade, aumento da resistência mecânica, maior resistência ao desgaste e à fadiga, melhor usinabilidade e eliminação de tensões residuais. (ASM HANDBOOK, 2004). Para alcançar tais objetivos, os tratamentos mais aplicáveis aos ferros fundidos nodulares são: tratamento para alívio de tensões; normalização; austêmpera, têmpera e revenimento, recozimento de decomposição de carbonetos e recozimento de ferritização (GUESSER, 2009).

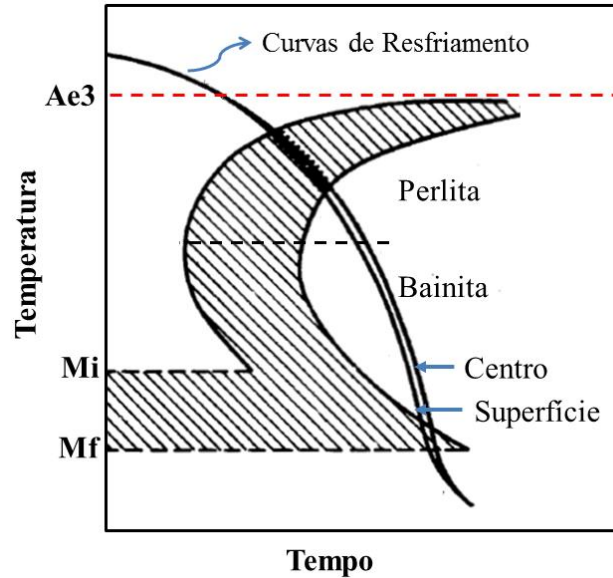
3.4.1. Tratamento térmico para alívio de tensões

O tratamento para alívio de tensões é normalmente utilizado para peças que apresentam grandes dimensões e espessuras complexas e irregulares. Assim, o principal objetivo deste tratamento é reduzir as tensões residuais presentes nas peças, provocadas pelo resfriamento irregular nas diferentes seções. Consiste em elevar a temperatura do material à aproximadamente 600°C em um tempo de 20 minutos por centímetro de seção. O resfriamento é feito dentro do forno para garantir uma pequena taxa de resfriamento, garantindo uma peça com pouca tensão residual (COLPAERT, 2008).

3.4.2. Tratamento térmico de normalização

Outro tratamento térmico é a normalização, muito utilizada quando o objetivo é homogeneizar as propriedades mecânicas da peça ao longo de toda a estrutura. Consiste em elevar o material a uma temperatura que permita a austenitização completa, acima de 850°C, mantendo a essa temperatura por 2 horas quando o material tiver até uma polegada e somando uma hora para cada polegada adicional. A microestrutura resultante é normalmente perlítica com ferrita em torno dos nódulos de grafita, o que faz essa estrutura ser conhecida como “olho de boi”. A proporção de ferrita e perlita é influenciada pela taxa de resfriamento, onde para um resfriamento com ar moderado é comum obter uma matriz predominantemente perlítica enquanto para um resfriamento lento é mais comum obter uma matriz predominantemente ferrítica (GUESSER, 2009). Na **Figura 12** pode ser observada a curva TTT de um tratamento térmico de normalização, onde durante o resfriamento a curva passa pela região de formação da perlita.

Figura 12 - Curva TTT do tratamento térmico de normalização.



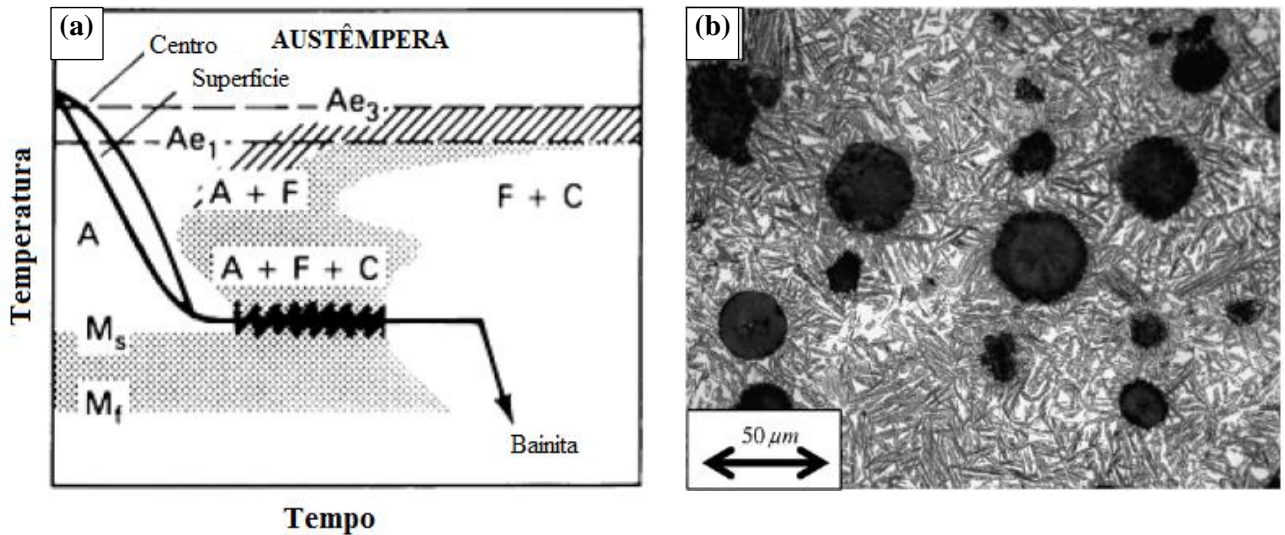
Fonte: CHIAVERINI, 2005

3.4.3. Tratamento térmico de austêmpera

A austêmpera é um tratamento isotérmico que consiste, basicamente, em elevar o material a temperatura de austenitização, em um tempo que garanta a difusão do carbono para a matriz austenítica. Após esse procedimento, o material é resfriado em duas etapas, a primeira consiste em resfriá-lo rapidamente até a temperatura de austêmpera onde a austenita será transformada em bainita. Após o tempo suficiente da transformação bainítica, inicia-se a segunda etapa de resfriamento até ser atingida a temperatura ambiente (CHIAVERINI, 2005; GUESSER, 2009).

O ferro fundido nodular austemperado permite obter peças com alta resistência ao impacto, ductilidade e tenacidade sem perda considerável da dureza (YOON-JUN, 2007). Assim, ao se comparar os ferros fundidos austemperados com os ferros fundidos nodulares com outras estruturas matriciais, verifica-se que os austemperados possuem maior resistência ao impacto e limite de escoamento daqueles com matrizes ferrítica, perlítica ou ferrítica e perlítica. (CHAENGKHAM & SRINCHANDR, 2011). Um exemplo de curva de tratamento térmico de austêmpera pode ser observado na **Figura 13 (a)**, onde A, F, C e M refere-se respectivamente a austenita, ferrita, cementita e martensita. Além disso, a microestrutura para uma amostra austemperada pode ser observada na **Figura 13 (b)**.

Figura 13 - Tratamento térmico de austêmpera.



(a) Curva TTT do tratamento térmico de austêmpera. (b) microestrutura do ferro fundido nodular austemperado.

Fonte: ASM HANDBOOK, 2004.

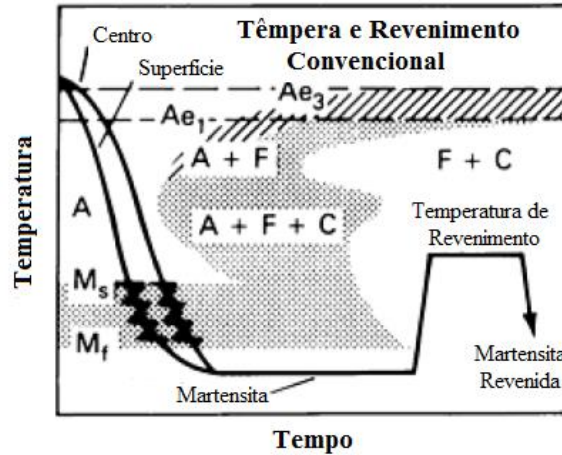
Fonte: YOON-JUN, 2007.

3.4.4. Tratamentos térmicos de têmpera e revenimento

Outros tratamentos térmicos muito utilizados são a têmpera e o revenimento, utilizados para obter materiais com elevada resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste. O tratamento consiste em elevar e manter a peça à temperatura de austenitização. Em seguida, a peça é resfriada de forma brusca, normalmente em óleo, visando a formação da estrutura martensítica (CHIAVERINI, 2005).

A martensita formada pela têmpera apresenta alta fragilidade, além da presença de elevadas tensões residuais devido ao resfriamento brusco e, por isso, para que a peça seja aplicada com segurança, apresentando menor risco de fratura, é importante um tratamento posterior à têmpera, denominado revenimento. Este tratamento deve ser realizado o mais rápido possível após a têmpera em temperaturas inferiores à da zona crítica. O revenimento permitirá aumentar a tenacidade, ductilidade e resistência mecânica da peça promovendo o alívio de tensões na peça temperada (COLPAERT, 2008). As curvas de tratamento térmico de têmpera e revenimento podem ser observadas na **Figura 14**, onde A, F, C e M refere-se respectivamente a austenita, ferrita, cementita e martensita.

Figura 14- Curva do tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento.



Fonte: ASM HANDBOOK, 2004.

3.4.5. Tratamento térmico de recozimento de decomposição de carbonetos

Este tratamento térmico é principalmente utilizado em ligas de ferro fundido nodular que devido a uma solidificação rápida houve a formação de carbonetos. A formação desses carbonetos é prejudicial por levar a redução do alongamento e da usinabilidade do material. A temperatura utilizada no tratamento térmico de recozimento de decomposição de carbonetos está na faixa entre 850°C e 950°C. O resfriamento pode ser feito no forno quando se deseja ferritizar ou ao ar. (GUESSER, 2009). Na **Tabela 3** podem ser observados os principais parâmetros utilizados nesse tratamento e o ciclo térmico utilizado

Tabela 3- Tratamento térmico de decomposição de carbonetos.

Decomposição de carbonetos	Cinzento	Nodular
Temperatura de recozimento (°C)	850 a 950°C	850 a 920°C
Velocidade de aquecimento	50 a 100°C/h	
Tempo de manutenção	2 h até 25 mm de espessura + 1 h por 25 mm que exceder	
Resfriamento	No forno (40 a 60°C/h, caso se deseje ferritizar) ou ar	
Ciclo Térmico		

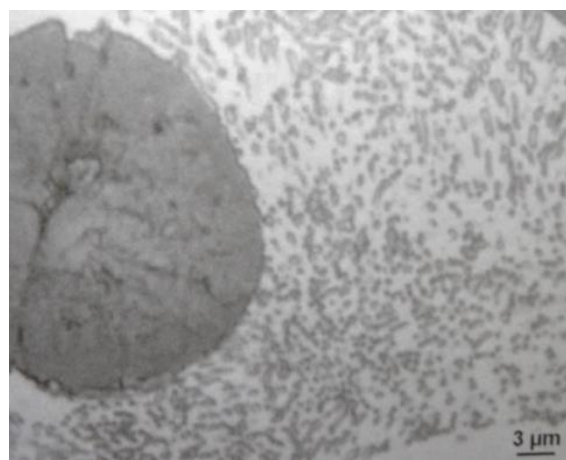
Fonte: GUESSER, 2009.

3.4.6. Tratamento térmico de recozimento de ferritização

Quando se deseja obter uma peça de ferro fundido nodular com boa ductilidade e usinabilidade, partindo de uma microestrutura perlítica, normalmente utiliza-se o tratamento térmico de recozimento de ferritização, também conhecido como recozimento para esferoidização. Nessa operação a microestrutura é convertida em ferrita, de forma que o excesso de carbono é difundido para os nódulos de grafita existentes na microestrutura (ASM HANDBOOK, 2004). Para adquirir tal objetivo é comum a utilização do recozimento subcrítico ou intercrítico.

No recozimento subcrítico ocorre à decomposição da cementita presente na perlita em ferrita mais grafita. Essa decomposição da cementita faz com que a peça tratada tenha um ganho no que diz respeito à ductilidade e usinabilidade. O tratamento térmico consiste em elevar a temperatura do material de 680 °C até antes da temperatura de austenitização. O tempo de recozimento dependerá de fatores como a composição química, a espessura da peça e o grau de decomposição da cementita que se quer atingir. O recozimento subcrítico também é utilizado para esferoidizar a perlita, sendo que essa prática permite ter um ganho na ductilidade, sem afetar significativamente a resistência mecânica do material. Além disso, pode-se observar uma redução da dureza do ferro fundido (GUESSER 2009). A perlita esferoidizada após o tratamento térmico de recozimento subcrítico pode ser observada na **Figura 15**.

Figura 15- Esferoidização e decomposição de perlita em recozimento subcrítico.

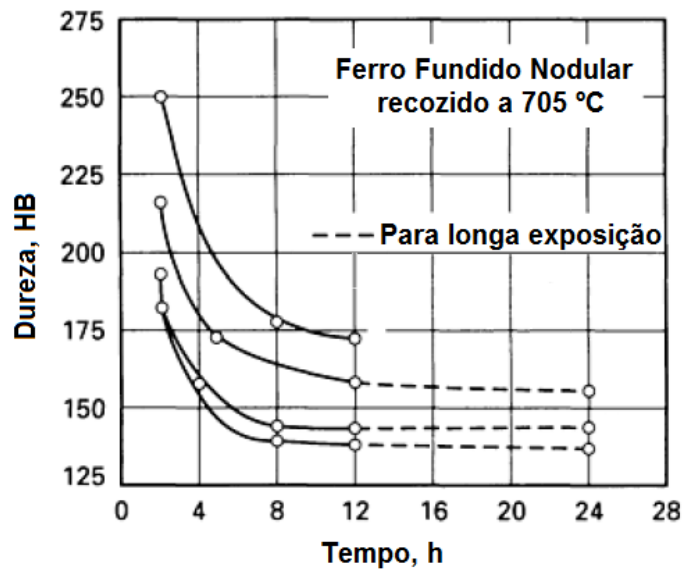


Fonte: GUESSER, 2009.

Durante o tratamento térmico de recozimento subcrítico, a proporção da perlita que sofrerá decomposição em ferrita e grafita será influenciada basicamente pelo tempo e temperatura. A

temperatura mais alta favorecerá uma maior decomposição da perlita com conseqüente redução da dureza da peça (ASM HANDBOOK, 2004). O mesmo comportamento é observado para tempos maiores de recozimento, conforme pode ser observado na **Figura 16**, onde o aumento do número de horas do recozimento provoca uma redução significativa na dureza.

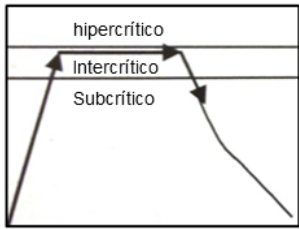
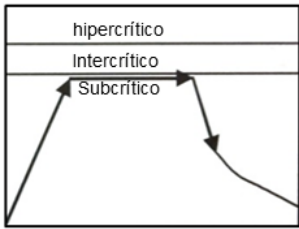
Figura 16- Influência do tempo de encharque na dureza do ferro fundido nodular para tratamento térmico recozimento subcrítico a 705° C.



Fonte: (ASM HANDBOOK, 2004).

Já o tratamento intercrítico consiste em elevar a temperatura do material na faixa de 740°C a 780°C. O resfriamento pode ser realizado ao ar ou dentro do forno e o objetivo é decompor a cementita da perlita com o aumento das regiões ferríticas levando ao final a redução da dureza média. Assim, os tratamentos térmicos de recozimento subcrítico e intercrítico são muito aplicados, para peças fundidas, quando a dureza encontra-se acima do limite superior especificado, devido a grande porcentagem de perlita, assim, este tratamento permite atingir os limites especificados de dureza sem comprometer o limite de resistência da peça. É importante destacar que a decomposição da perlita provocará um aumento do tamanho do nódulo de grafita, uma vez que a ferrita não comportará todo o carbono e esse será difundido para a grafita com conseqüente aumento da mesma, mas a dureza média da peça será reduzida (GUESSER 2009). Na **Tabela 4** podem ser observados os principais parâmetros utilizados nesses tratamentos, destaca-se que o resfriamento pode ser realizado ao ar ou no forno.

Tabela 4- Tratamento Térmico de decomposição de carbonetos.

Ferritização	Na zona crítica (intercrítica)	Subcrítica
Velocidade de aquecimento	50 a 100°C/h	
Temperatura de recozimento (°C)	740 a 780°C	680 a 700°C
Tempo de manutenção (conforme espessura da peça)	4 a 12 h	4 a 24 h
Resfriamento	Ao ar ou no forno (40 a 60°C)	No forno (20 a 50°C/h) até 580°C, então resfriado ao ar no forno (50 a 60°C/h)
Ciclo térmico		

Fonte: GUESSER, 2009.

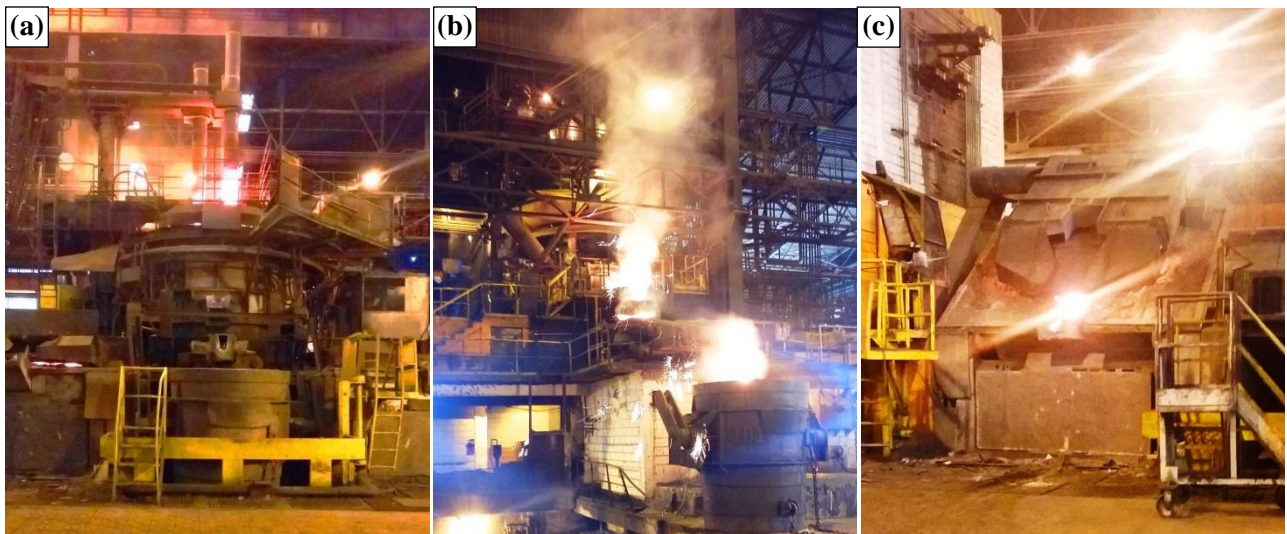
4. METODOLOGIA

Inicialmente, o trabalho desenvolvido consistiu na elaboração da revisão bibliográfica abordando assuntos importantes para a compreensão da classe dos ferros fundidos nodulares e dos tratamentos térmicos empregados. Para isso, foi observado como a composição química, a taxa de resfriamento, a morfologia da grafita e os tratamentos térmicos posteriores influenciam as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. Em seguida, foram realizadas as etapas experimentais e, por fim, o tratamento dos dados e a análise geral dos resultados.

4.1. Fabricação do Material

Nesta etapa, inicialmente, foi fabricado o material utilizado nos experimentos. As peças foram produzidas na empresa TEKSID do Brasil no setor Metalurgia/Fornos. O setor de Metalurgia/Fornos é responsável pela oferta de ferro fundido com composição química e temperatura adequadas para as linhas de vazamento, possuindo dois fornos fusores elétricos a arco da marca Brown Boveri, com capacidade aproximada de 50 toneladas, 21,6 MW, um forno Cubilô da marca Kuttner, com capacidade de 25 ton/h, e 12 fornos a indução da marca Crezense com capacidade de 25 toneladas, 1500 KVA. Esses fornos podem ser observados na **Figura 17**.

Figura 17- Fornos utilizados na TEKSID do Brasil.



(a) Forno elétrico a arco. (b) Forno Cubilô. (c) Forno a Indução.

Fonte: Próprio Autor.

Para obter as peças de ferro fundido com grafita de morfologia nodular e matriz perlítica foram utilizados parâmetros químicos e metalúrgicos pré-estabelecidos pela TEKSID. Dentre esses parâmetros, pode-se citar a composição química na **Tabela 03**, ou seja, após o vazamento o material deveria apresentar a composição dentro desses limites especificados. Os valores de composição química apresentados são referentes a um dos requisitos para a produção de algumas peças que possuem matriz predominantemente perlítica e grafita com morfologia nodular. Uma vez que o forno indução permite vaziar 25 toneladas de metal para cada corrida, parte do metal referente à produção dessas peças foi destinada para produção do material utilizado nesse trabalho.

Tabela 03- Composição Química especificada.

% CT	% Si	% Mn	% S	% Mo	% Sn	% Cr
3,60 a 3,70	2,60 a 2,70	0,40 a 0,50	Até 0,012	Até 0,05	0,065 a 0,070	Até 0,05
% Cu	% P	% Pb	% Ti	% Nb	% Ni	
1,10 a 1,15	Até 0,050	Até 0,0030	Até 0,03	Até 0,02	Até 0,05	

Fonte: TEKSID DO BRASIL, 2014.

Durante a preparação do metal nos fornos a indução, foram realizadas operações para atingir a composição química e condições metalúrgicas adequadas visando a qualidade do produto final. Para isso, foram realizadas etapas de controle e ajuste, dentre as quais são destacadas as fases descritas a seguir.

4.1.1. Medição de temperatura.

Essa operação foi realizada no acompanhamento da evolução da temperatura do metal até que se atingiu o valor adequado para o vazamento da liga, etapa conduzida com o auxílio de um termopar descartável, chamado de cartucho, acoplado a uma lança. Quando o termopar foi inserido no metal fundido e uma tensão na ordem de mV é gerada devido ao curto circuito provocado, essa tensão é digitalizada e traduzida em graus celsius. A faixa de temperatura de vazamento estabelecida pela TEKSID para o vazamento dessas peças foi 1460 a 1480°C. Na **Figura 18** verifica-se a operação de medição da temperatura realizada e o cartucho utilizado do fabricante Met Tec.

Figura 18- Medição da Temperatura



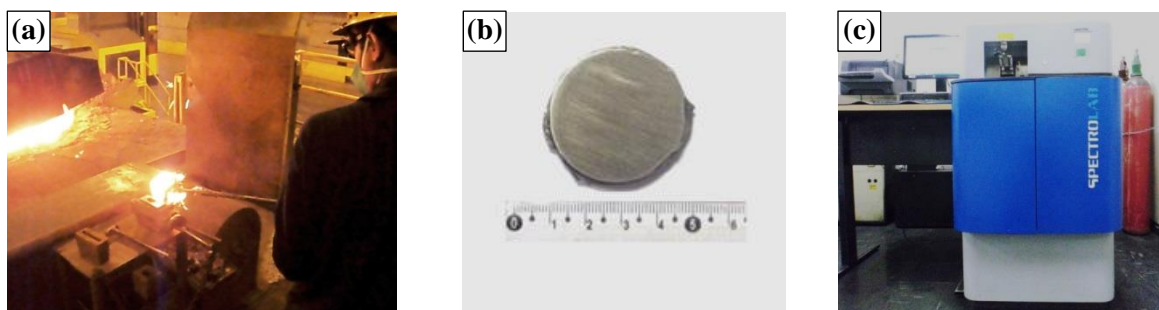
(a) Operação de medição da temperatura. (b) Modelo de cartucho.

Fonte: Próprio Autor.

4.1.2. Retirada de amostra para análise química:

Essa operação consistiu em retirar uma amostra para avaliação da composição química do metal durante a sua preparação. Assim, de acordo com o resultado, verificava-se a necessidade ou não de uma correção química. A amostra retirada também é conhecida como medalha e deve sofrer um resfriamento com uma taxa elevada para garantir que a microestrutura esteja coquilhada, ou seja, o resfriamento rápido fará com que a microestrutura formada seja como a do ferro fundido branco. Uma microestrutura coquilhada é importante quando se pretende analisar a composição química do ferro fundido por meio de espectrometria de emissão óptica, já que uma amostra não coquilhada apresenta uma microestrutura muito heterogênea dificultando a análise precisa da composição química. Na **Figura 19** observam-se as etapas de preparação e análise química das amostras: em (a) está representada a operação de vazamento do metal na coquilha (molde para confecção das amostras), em (b) está representada a amostra após o lixamento e em (c) apresenta-se o espectrômetro de emissão óptica do fabricante SpectroLab utilizado para a análise química.

Figura 19- Etapas de preparação e análise química da amostra.



(a) Vazamento do metal na coquilha. (b) Amostra após lixamento. (c) Espectrômetro de emissão óptica.

Fonte: Próprio Autor.

4.1.3. Correção química do metal

A etapa de correção química do metal ocorreu sempre após a análise química. Nesse caso, por meio do espectrômetro de emissão óptica, verificava-se que a composição se encontrava fora do especificado. A correção foi feita a partir da adição de elementos como C, Ni, Cu, Sn, Mn e Cr, quando estes se encontravam fora do especificado. O processo pode ser observado na **Figura 20**, onde o operador adiciona ao banho os elementos necessários para a correção da composição química do metal.

Figura 20- Etapas de correção química do metal.



Fonte: Próprio Autor.

O cálculo para adição desses elementos foi realizado considerando a quantidade de metal dentro do forno, a diferença do percentual especificado em relação ao encontrado na análise química e o rendimento metalúrgico do material utilizado na correção. Na **Equação 01** é exibida a fórmula utilizada na TEKSID do Brasil para realização desse cálculo.

$$Q_m = \frac{Q_f \times (\% \text{ espec.} - \% \text{ enc.})}{Y} \quad \text{Eq. 01}$$

Q_m: Quantidade de material a ser adicionado no forno para correção

Q_f: Quantidade de metal dentro do forno

%_{espc}: Percentual especificado de determinado elemento químico

%_{enc}: Percentual encontrado após a análise por meio do espectrômetro de emissão óptica.

Y: Rendimento metalúrgico do material adicionado

4.1.4. Vazamento do metal

Após verificar as condições metalúrgicas do metal, como a composição química e a temperatura, foi realizado o vazamento da liga em moldes feitos em areia de macho, conforme apresentado na **Figura 21**. O vazamento foi realizado respeitando um tempo máximo de cinco minutos pós-nucleação, esse tempo é conhecido como *fading* e se refere ao tempo máximo a partir do qual o inoculante perde a eficiência, dessa forma o vazamento deve ocorrer o mais rápido possível após ser realizada a inoculação. Após o vazamento, aguardou-se um tempo de desmoldagem de 120 minutos, garantindo uma taxa de resfriamento lenta.

Figura 21 - Vazamento do metal em moldes

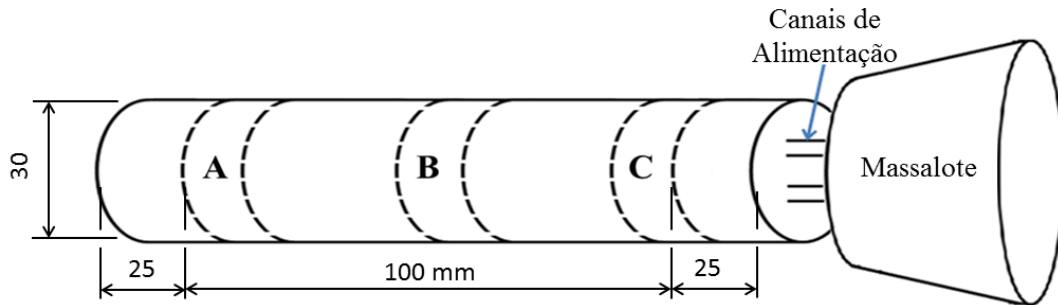


Fonte: Próprio Autor.

4.2. Preparação do Material

Após o vazamento do material, procurou-se verificar se a liga obtida apresentava microestrutura com matriz perlítica e grafita nodular. Para isso, utilizou-se apenas uma das dezenove peças, já que todas foram vazadas seguindo os mesmos parâmetros metalúrgicos e químicos. Assim, uma das peças foi escolhida aleatoriamente e cortada ao longo de sua seção com a finalidade de avaliar o tipo de microestrutura e se essa variava ao longo do comprimento. Assim, foi realizada a preparação metalográfica das três seções, A, B e C, apresentadas na **Figura 22**. As duas pontas foram descartadas, uma para desprezar a influência do massalote e a outra para desprezar a região que entrou em contato primeiro com o molde. A preparação metalográfica do material consistiu nas etapas de corte, embutimento a frio, lixamento, polimento com pasta de diamante em diferentes granulometrias e ataque químico, esse último realizado com o reagente Nital 3%.

Figura 22 - Seções avaliadas na etapa de caracterização do material



Fonte: Próprio autor.

4.2.1. Tratamentos térmicos

Após a avaliação do material, as outras peças foram utilizadas para a realização de tratamentos térmicos em diferentes temperaturas e tempos de encharque, avaliando a interferência desses tratamentos na microestrutura e propriedades do material. As temperaturas utilizadas foram de 690°C, 760°C, 860°C e 900°C e tempos de encharque de 30min, 60min, 120min e 240min, totalizando dezesseis condições distintas de tratamentos térmicos. As duas primeiras temperaturas compreenderam o tratamento térmico de recozimento de ferritização, um subcrítico e outro intercrítico. As demais temperaturas compreenderam o tratamento térmico de recozimento de decomposição de carbonetos. Destaca-se que todas as amostras foram resfriadas ao ar. Na **Figura 23** observa-se o forno de indução do fabricante Brasimet do CEFET-MG, utilizado na etapa de tratamentos térmicos.

Figura 23 - Forno Brasimet.



Fonte: Próprio autor.

Após a realização dos tratamentos térmicos, as dezesseis amostras obtidas foram preparadas seguindo o mesmo padrão de preparação metalográfica das amostras no estado inicial, ou seja: corte, embutimento, lixamento, polimento com pasta de diamante em diferentes granulometrias e o ataque químico com Nital 3%.

4.2.2. Análise Metalográfica

O procedimento de análise e aquisição de imagens por meio do microscópio óptico (MO) foi realizado em duas etapas. Inicialmente as amostras foram fotografadas sem a realização do ataque químico, com a finalidade de observar a morfologia e a dimensão dos nódulos de grafita. Após a realização das fotomicrografias sem o ataque químico, foram obtidas imagens da microestrutura com o ataque, analisando a interferência dos diferentes tratamentos térmicos na matriz perlítica do ferro fundido nodular. Foram realizadas trinta fotomicrografias sem ataque e trinta com ataque para cada condição de tratamento. Na **Figura 24** pode ser observado o microscópio óptico da marca Fortel com sistema de digitalização da marca Kontrol utilizados na aquisição das imagens.

Figura 24 - O microscópio óptico utilizado.

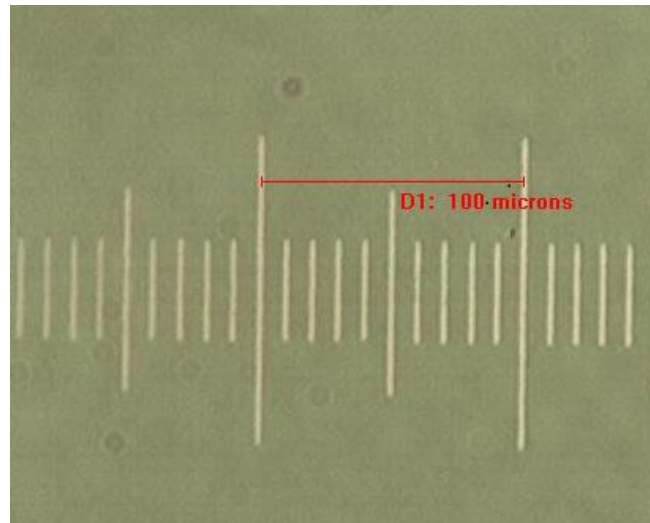


Fonte: Próprio autor.

Por meio de um *software* de análise de imagem, Image Pro Plus 6.0, foi realizada a análise da morfologia da grafita medindo a área dos nódulos presentes nas trinta imagens sem a realização de ataque químico. Esse procedimento foi realizado para cada condição de tratamento térmico e ainda para as amostras no estado inicial. Para essa análise, inicialmente foi necessário realizar a calibração do sistema por meio da escala apresentada na **Figura 25**, sendo que a distância entre

os traços maiores equivalem a 100 μm . Destaca-se que as imagens do ferro fundido nodular analisadas nesse software foram obtidas usando a mesma ampliação da escala apresentada, garantindo a proporcionalidade.

Figura 25 - Escala utilizada na calibração do software de análise de imagem

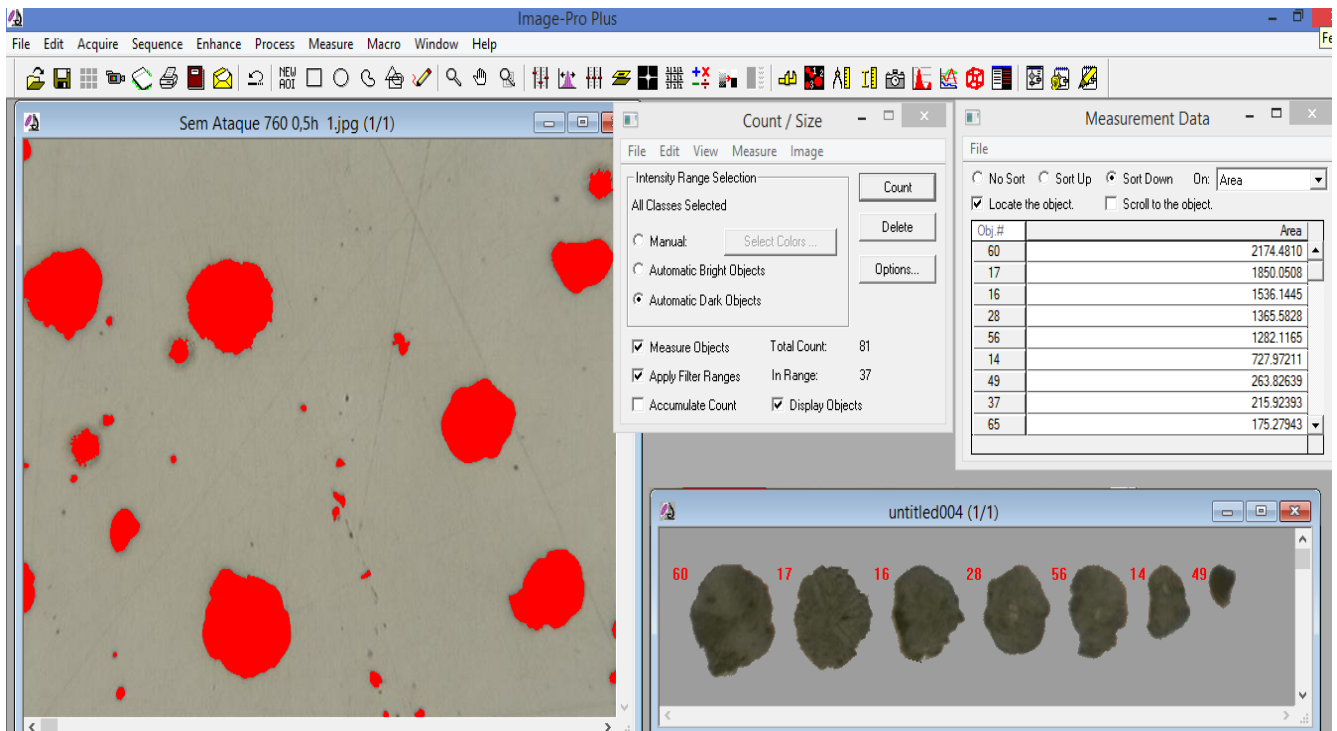


Fonte: Próprio autor.

Depois de realizada a calibração, foram utilizadas as fotomicrografias do ferro fundido nodular para realizar a medição da área média da grafita. O software utilizado permite destacar as regiões com maior contraste na imagem medindo a área de cada objeto de forma individual. Além disso, os objetos são ordenados em ordem crescente ou decrescente. Uma vez que as amostras foram analisadas sem ataque químico, esse contraste foi bem evidente, sendo possível medir cada objeto, conforme apresentado na **Figura 26**. Nota-se em vermelho os nódulos de grafita identificados pelo *software* e em preto os nódulos ordenados em ordem decrescente quanto ao valor da área.

Os valores referentes à área média dos nódulos de grafita foram analisados para as dezesseis condições de tratamentos térmicos (tanto para os recozimentos de ferritização como para os recozimentos de decomposição de carbonetos), confrontados por meio de um gráfico para avaliar em quais dessas condições ocorreram as maiores modificações no tamanho dos nódulos de grafita. Em adição a avaliação mencionada, foi medido o tamanho médio da grafita na amostra no estado inicial.

Figura 26 - Exemplo da utilização do software empregado para análise das imagens do ferro fundido nodular.



Fonte: Próprio autor.

4.2.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Além da microscopia óptica, foram realizadas imagens geradas a partir de elétrons retroespalhados, por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), em duas ampliações. Nesta etapa foram avaliadas as condições de tratamento térmico de recozimento de ferritização (690°C e 760°C), com os tempos de encharque de 30min, 60min, 120min e 240min. Apenas essas condições de tratamento foram avaliadas no MEV, uma vez que as demais não apresentaram variação significativa na microestrutura e na morfologia da grafita. O equipamento de MEV utilizado nos experimentos, do fabricante HITACHI, pode ser observado na **Figura 28**.

Figura 28- Microscópio eletrônico de varredura



(a) e (b) Microscópio eletrônico de varredura utilizado

Fonte: Próprio autor.

4.2.4. Ensaio de Dureza

Para avaliar a influência das diferentes condições de tratamento térmico na dureza do material, foram realizados ensaios de microdureza Vickers em todas as amostras, utilizando o microdurômetro do modelo SHIMADZU, apresentado na **Figura 29**. No ensaio foi empregada a carga de 1,0 kg com tempo de penetração de 15 s, sendo que cada amostra foi submetida a 10 medidas. As microdurezas foram realizadas na matriz do material em regiões livres de nódulos de grafita, justamente para verificar a influencia do tratamento térmico na dureza da matriz.

Figura 29- Microdurômetro Vickers utilizado no ensaio.



Fonte: Próprio autor.

Além dos ensaios de microdureza Vickers, foram conduzidos ensaios de dureza Brinell, utilizando o durômetro da marca Metro Com- *Macchine per Prove Material*, apresentado na **Figura 30**. Foi empregada uma carga de 750 kgf, com tempo de penetração de 15 s e penetrador de esfera de aço com 5 mm de diâmetro, sendo realizada 2 medidas em cada amostra. O ensaio Brinell foi realizado para verificar a influência dos diferentes tratamentos térmicos na dureza média do material. Os valores de microdureza e dureza encontrados foram confrontados por meio de gráficos para avaliar em quais das condições de tratamento foram observadas maiores modificações na propriedade do material.

Figura 30- Durômetro Brinell utilizado no ensaio



Fonte: Próprio autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Ferro Fundido Nodular no Estado Inicial

Em relação à caracterização inicial do material, foi retirada uma amostra durante o vazamento das peças para verificar a composição química. Essa caracterização foi importante para comparar se a composição química encontrada estava de acordo com a especificada para um material que deveria apresentar grafita com morfologia nodular e matriz perlítica. Como pode ser observado na **Tabela 04**, o material obtido apresentou composição química dentro dos limites especificados para todos os elementos químicos considerados.

Tabela 04 - Composição química (% em peso) especificada e encontrada.

	% CT	% Si	% Mn	% S	% Mo	% Sn	% Cr
Especificado:	3,60 a 3,70	2,60 a 2,70	0,40 a 0,50	Até 0,012	Até 0,05	0,065 a 0,070	Até 0,05
Encontrado:	3,60	2,61	0,419	0,09	0,00	0,070	0,01
	% Cu	% P	% Pb	% Ti	% Nb	% Ni	
Especificado:	1,10 a 1,15	Até 0,050	Até 0,0030	Até 0,03	Até 0,02	Até 0,05	
Encontrado:	1,10	0,049	0,0002	0,0293	0,00	0,0081	

Fonte: Próprio autor.

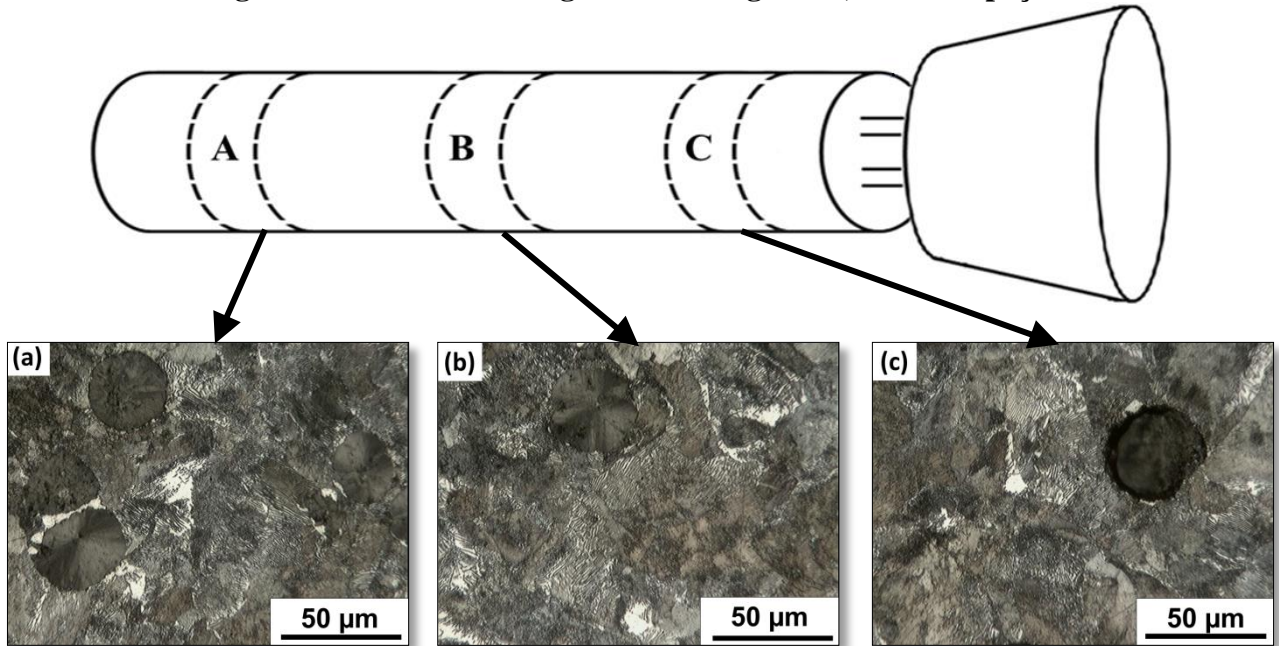
Realizou-se, ainda, a análise metalográfica em três seções ao longo do comprimento da peça, a fim de verificar se em todas as regiões do material a estrutura se apresentava com matriz predominantemente perlítica e com grafita nodular. Na **Figura 31** são observadas as microestruturas (MO) presentes nas seções A, B e C da peça. É possível verificar que as três regiões apresentam semelhança em relação à proporção de perlita e morfologia e dimensões da grafita.

Além da análise metalográfica, foram realizados ensaios de microdureza Vickers e dureza Brinell nas regiões A, B e C da peça no estado inicial, também para verificar se a dureza estava homogênea ao longo do comprimento da peça. Nas **Tabelas 05 e 06** são observados os valores de microdureza média encontrados ao longo da seção.

Com os resultados obtidos para as amostras no estado inicial, tanto em relação à metalografia/microscopia óptica quanto em relação à microdureza, verificou-se que a peça obtida

apresentava uma microestrutura homogênea entre as seções A e C. Dessa forma todas as outras peças utilizadas para realização dos tratamentos térmicos de recozimento foram cortadas respeitando os limites entre as seções A e C.

Figura 31- Análise metalográfica nas regiões A, B e C da peça.



(a) Seção A da peça. (b) seção B e (c) seção C da peça.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 05- Microdureza Vickers nas seções A, B e C da peça.

Seção:	A	B	C	Média
Microdureza Vickers (HV):	313	308	315	312

Fonte: Próprio autor.

Tabela 06- Dureza Brinell nas seções A, B e C da peça.

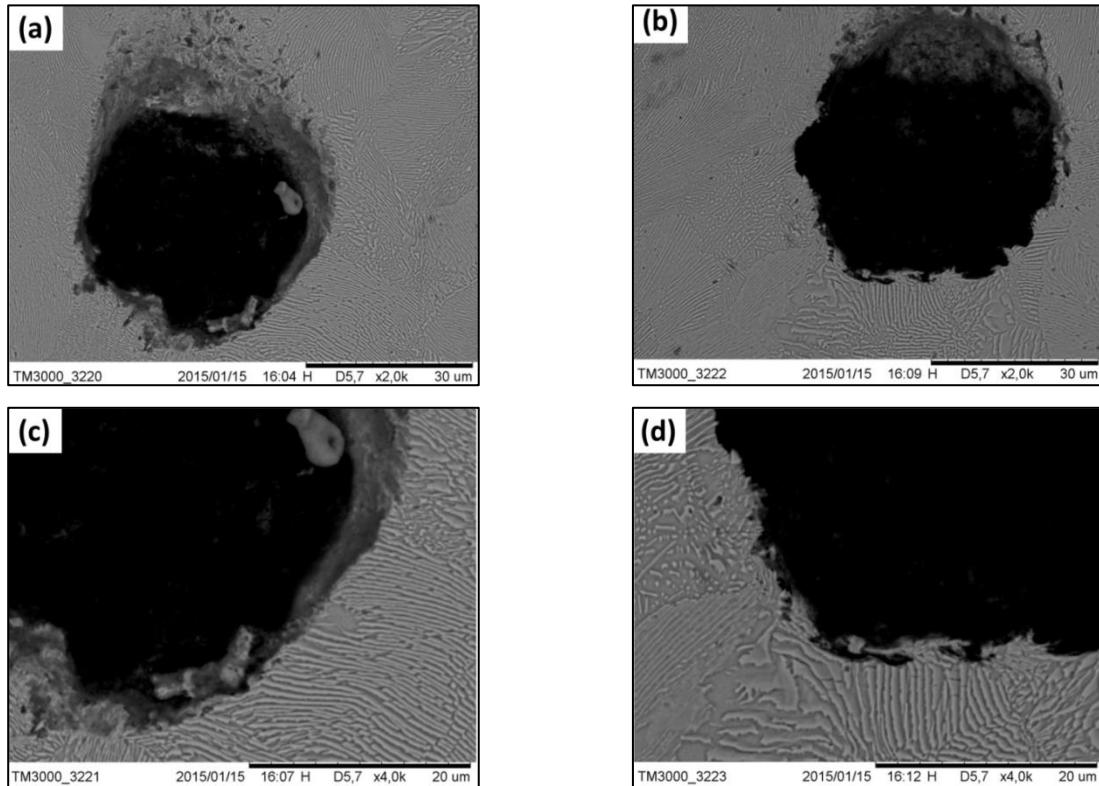
Seção:	A	B	C	Média
Dureza Brinell (HB):	315	306	312	311

Fonte: Próprio autor.

Uma vez que o material no estado inicial se mostrou homogêneo em relação às características microestruturais, foi realizada a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) apenas da seção B. As imagens realizadas podem ser observadas na Figura 32, obtidas com diferentes ampliações. Verifica-se, semelhante à análise por microscopia óptica, uma matriz

predominantemente perlítica e com grafita nodular. Outro resultado obtido foi em relação a área da grafita com valor de $988,853 \mu\text{m}^2$, esse valor refere-se também a amostra da seção B.

Figura 32- Análise da seção B da peça por microscopia eletrônica de varredura.



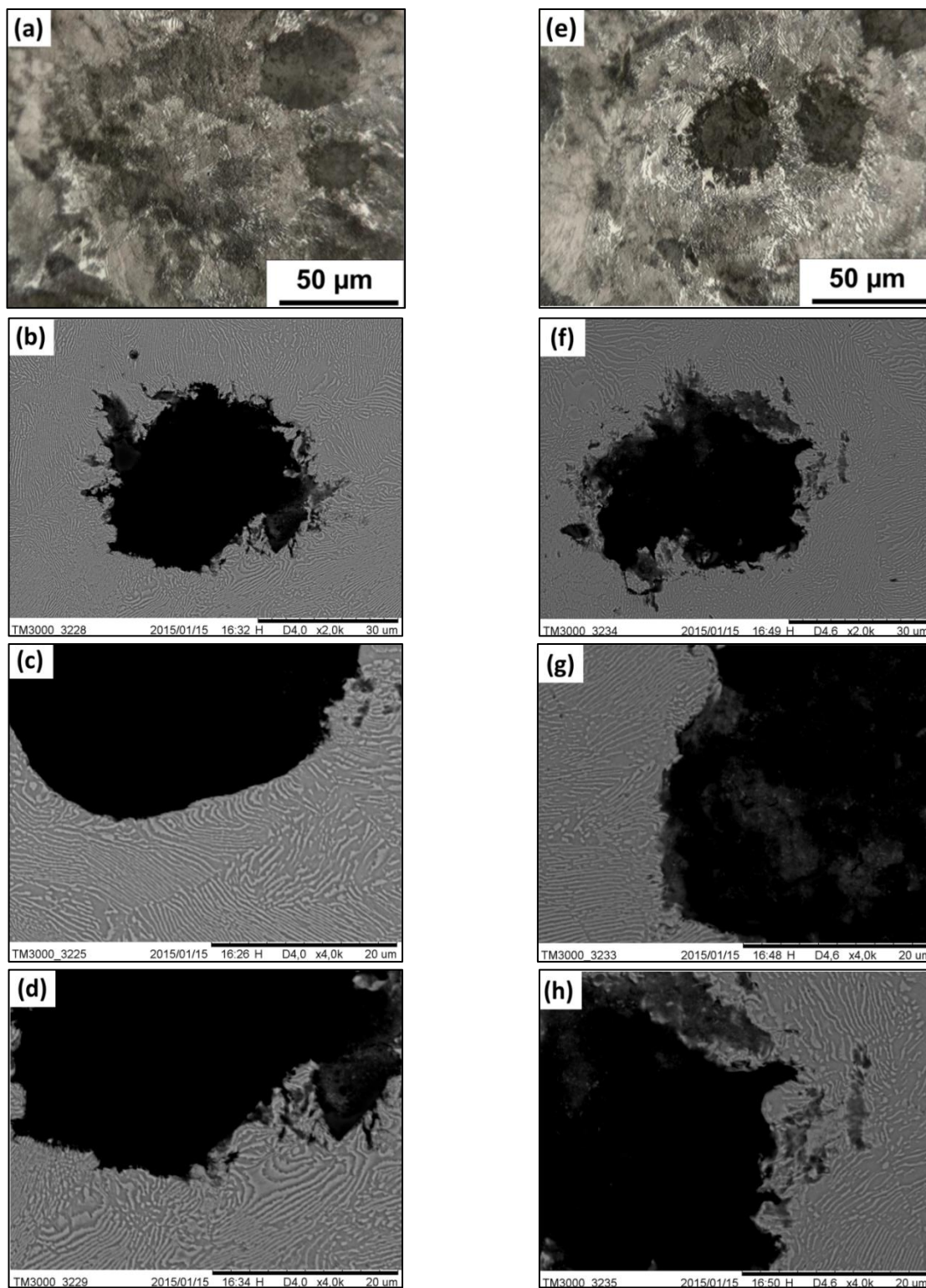
(a) e (b) Com ampliação de 2000 x. (c) e (d) Com ampliação de 4000 x.

Fonte: Próprio autor.

5.2. Ferro Fundido Nodular Tratado Termicamente

As dezesseis amostras tratadas termicamente também foram avaliadas mediante metalografia e ensaio de dureza. Analisando inicialmente as amostras tratadas a 690°C com os tempos de encharque de 30min, 60min, 120min e 240min, observou-se que, conforme apresentado nas **Figuras 33 e 34**, à medida que se aumentou o tempo de tratamento térmico, houve uma diminuição das regiões com perlita e conseqüentemente um aumento das regiões ferríticas, especialmente circundando os nódulos de grafita. Verificou-se ainda a ocorrência de esferoidização da perlita com o tratamento, especialmente para o tempo de 240 minutos, no qual ocorreu aumento mais acentuado de regiões ferríticas. Além disso, observou-se qualitativamente um discreto aumento do nódulo de grafita com o aumento do tempo de encharque.

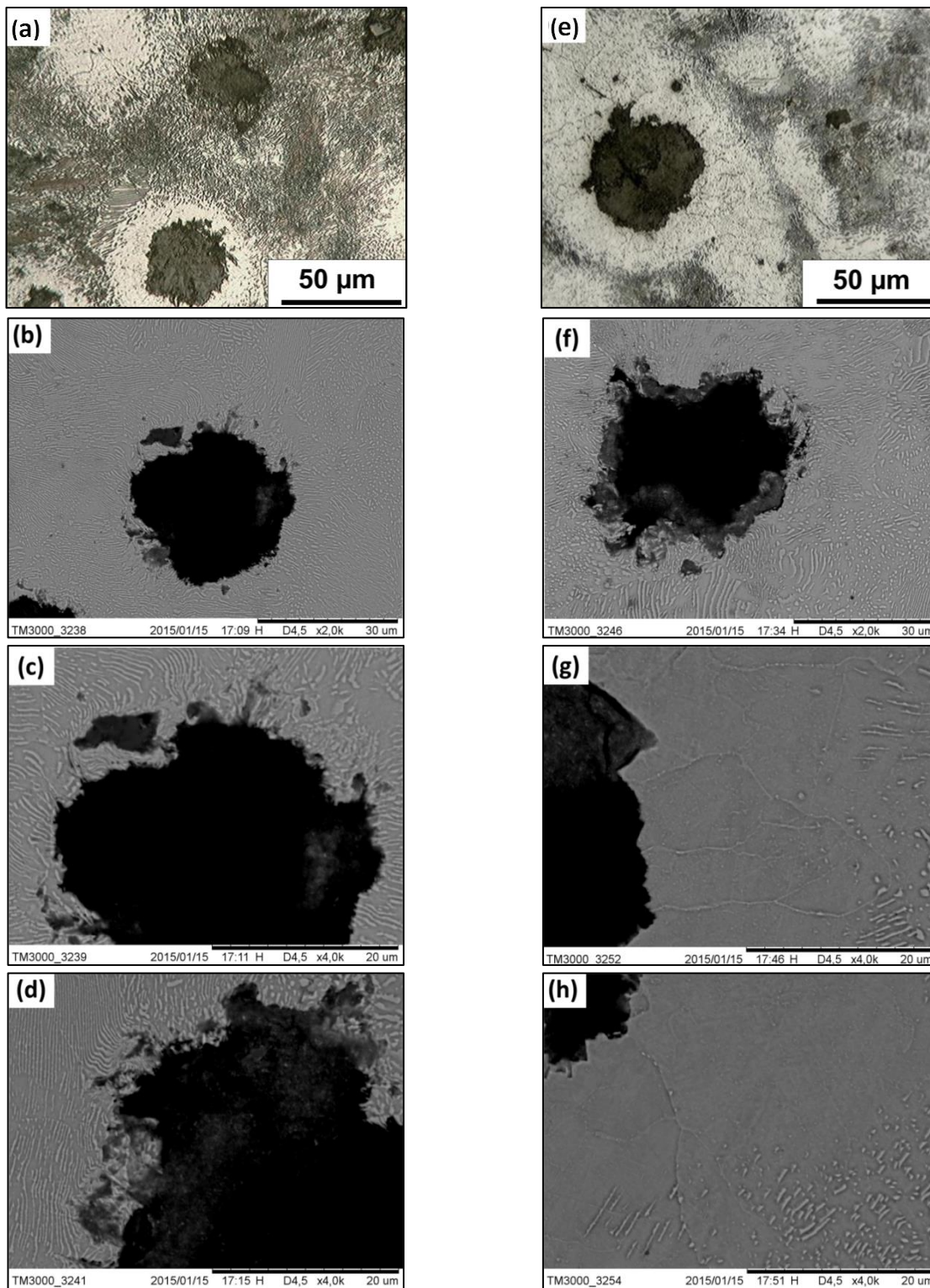
Figura 33 – Ferro fundido nodular tratado termicamente a 690°C.



(a), (b), (c) e (d) tempo de encharque de 30 min. (e), (f), (g) e (h) tempo de encharque de 60 min. As amostras (a) e (e) foram obtidas por microscopia ótica, as demais por MEV.

Fonte: Próprio autor.

Figura 34 - Ferro fundido nodular tratado termicamente a 690°C.



(a), (b), (c) e (d) tempo de encharque de 120 min. (e), (f), (g) e (h) tempo de encharque de 240 min.

As amostras (a) e (e) foram obtidas por microscopia ótica, as demais por MEV.

Fonte: Próprio autor.

No que diz respeito ao ensaio de microdureza Vickers e de dureza Brinell, as amostras tratadas termicamente a 690°C apresentaram redução da dureza média à medida que se aumentou o tempo de encharque, conforme pode ser observado na **Tabela 07 e 08**.

Tabela 07- Microdureza média das amostras tratadas termicamente a 690 °C.

Tempo de Encharque:	30 min	60 min	120 min	240 min
Microdureza Vickers (HV):	310,4	308,5	283,9	236,2

Fonte: Próprio autor.

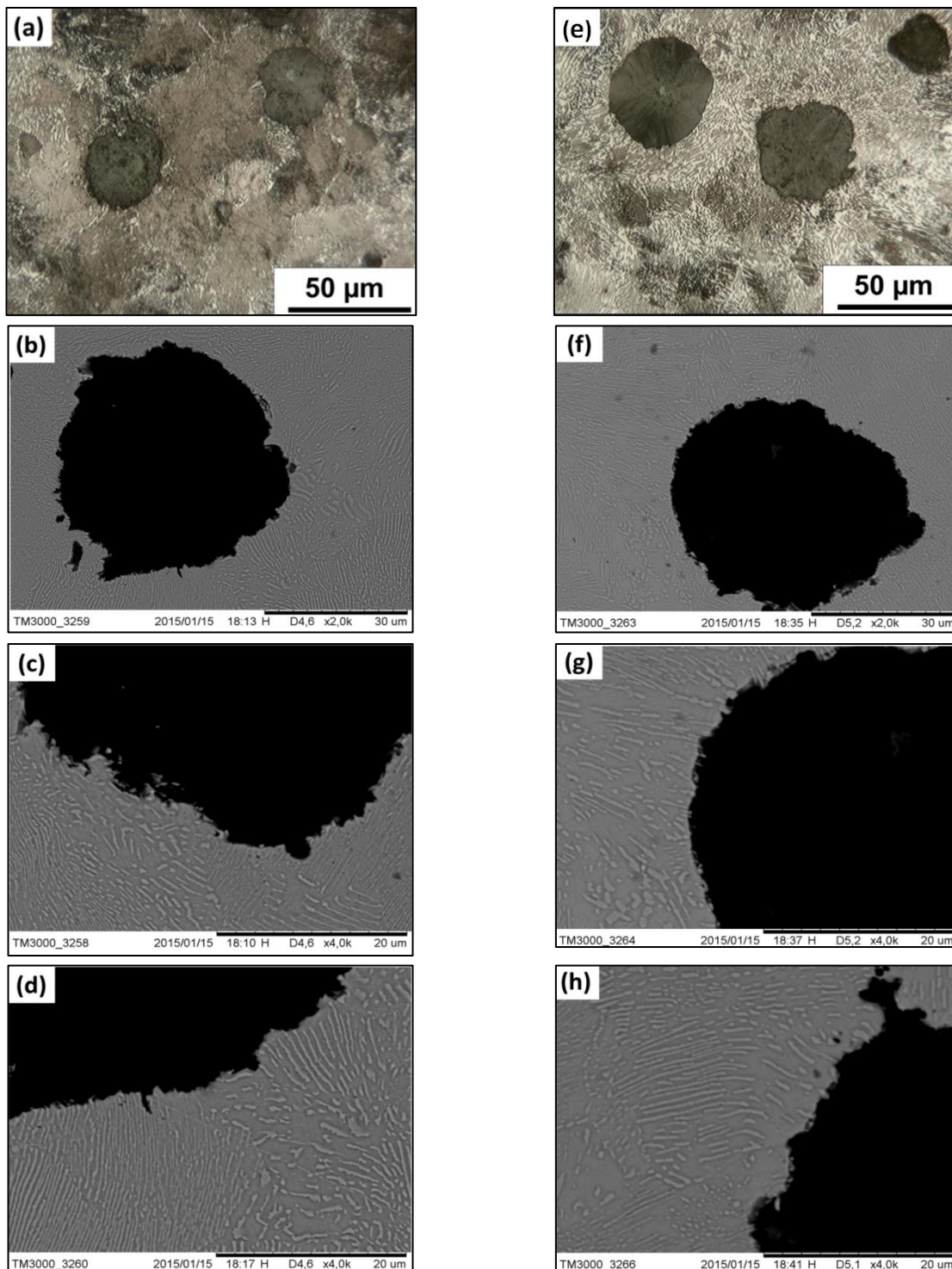
Tabela 08- Dureza Brinell das amostras tratadas termicamente a 690 °C.

Tempo de Encharque:	30 min	60 min	120 min	240 min
Dureza Brinell (HB):	285	285	270	229

Fonte: Próprio autor.

Analisando as amostras tratadas a 760 °C com os tempos de encharque de 30min, 60min, 120min e 240min, observou-se que, conforme apresentado na **Figura 35 e 36**, à medida que se aumentou o tempo de tratamento térmico, também houve uma diminuição das regiões com perlita e consequentemente um aumento das regiões ferríticas, mas dessa vez o aumento dessas regiões foi mais acentuado que o observado a 690 °C. Verifica-se que o espaçamento das lamelas de perlita aumentou, sendo que nas regiões ao redor dos nódulos de grafita foi onde também ocorreu aumento mais acentuado de regiões ferríticas. Por fim, observou-se um aumento perceptível do nódulo de grafita e que a perlita se esferoidiza à medida que o tempo de encharque foi aumentando.

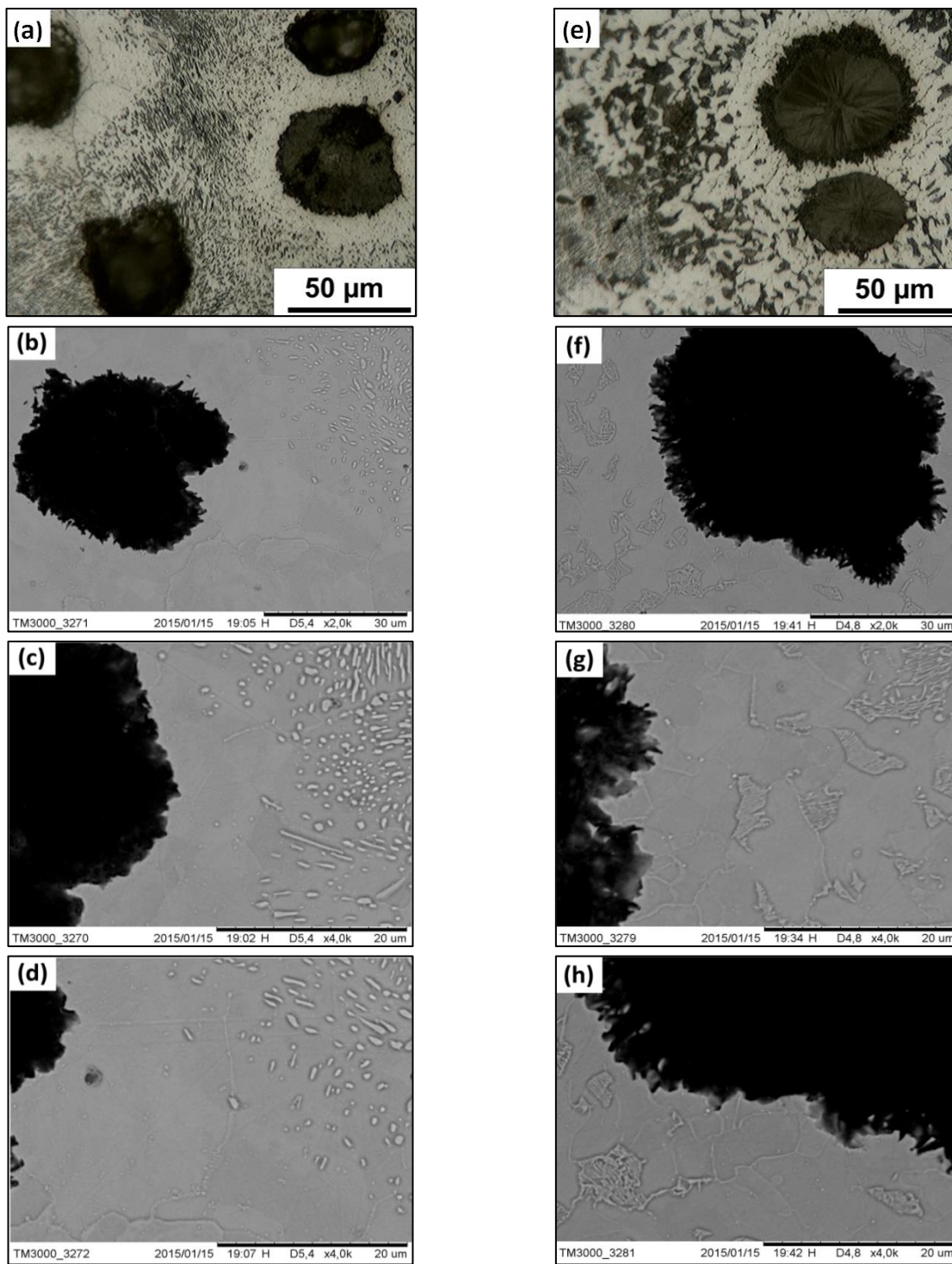
Figura 35 - Ferro fundido nodular tratado termicamente a 760°C.



(a), (b), (c) e (d) tempo de encharque de 30 min. (e), (f), (g) e (h) tempo de encharque de 60 min. As amostras (a) e (e) foram obtidas por microscopia ótica, as demais por MEV.

Fonte:Próprio autor.

Figura 36 - Ferro fundido nodular tratado termicamente a 760°C.



(a), (b), (c) e (d) tempo de encharque de 120 min. (e), (f), (g) e (h) tempo de encharque de 240 min.

As amostras (a) e (e) foram obtidas por microscopia ótica, as demais por MEV.

Fonte: Próprio autor.

No que diz respeito ao ensaio de microdureza Vickers, as amostras tratadas termicamente a 760°C também apresentaram redução da dureza média à medida que o tempo de encharque foi elevado, conforme pode ser observado na **Tabela 06**. Os valores de dureza foram comparados aos obtidos pelas amostras tratadas a 690 °C, observa-se que a redução de dureza foi mais acentuada na temperatura de 760°C, a medida que se aumentou o tempo encharque.

Tabela 06- Microdureza média das amostras tratadas termicamente a 760°C

Tempo de Encharque:	30 min	60 min	120 min	240 min
Microdureza Vickers (HV):	288	279	253	220

Fonte: Próprio autor.

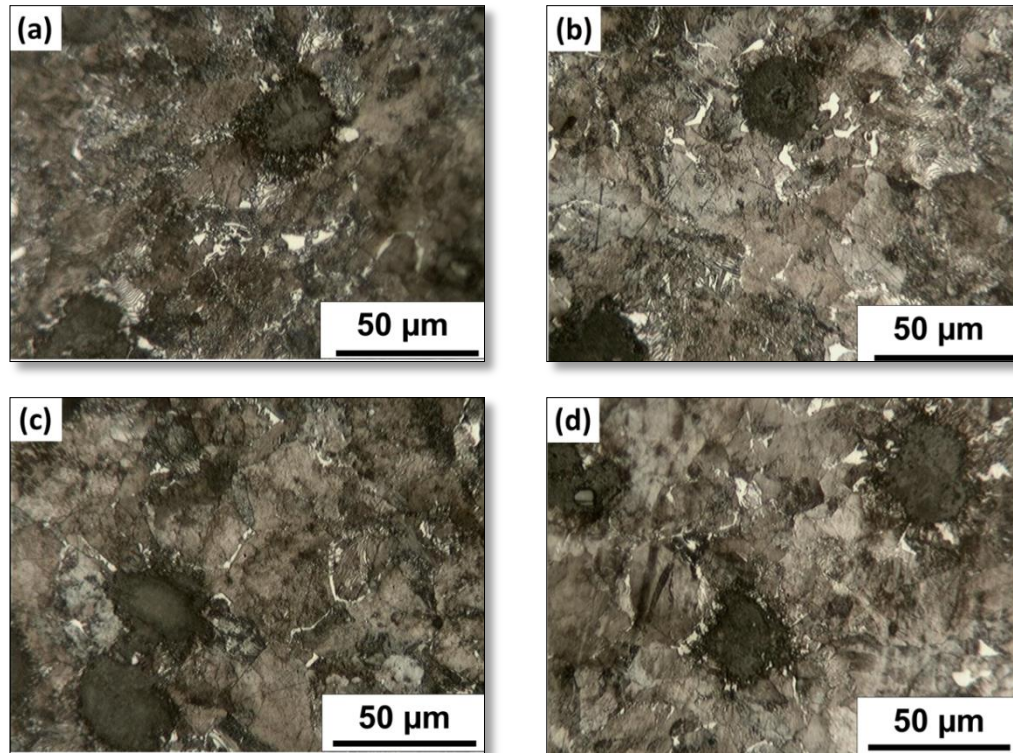
Tabela 06- Dureza Brinell das amostras tratadas termicamente a 760°C.

Tempo de Encharque:	30 min	60 min	120 min	240 min
Dureza Brinell (HB):	255	255	235	221

Fonte: Próprio autor.

Nas amostras tratadas termicamente a 860°C, **Figura 37**, diferentemente do que aconteceu com as amostras tratadas a 690 e 760 °C, não houve redução da região perlítica à medida que se aumentou o tempo de encharque e, conseqüentemente, não se verificou aumento de regiões ferríticas. A microestrutura permaneceu semelhante para os diferentes tempos de encharque, sendo próxima daquela apresentada para o material no estado inicial, onde havia matriz predominantemente perlítica. Além disso, o tamanho dos nódulos de grafita não apresentou mudanças perceptíveis.

Figura 37 - Ferro fundido nodular tratado termicamente a 860°C.



(a) 30 minutos de tempo de encharque, (b) 60 min, (c) 120 min. e (d) 240 min.

Fonte: Próprio autor.

Em relação ao ensaio de microdureza Vickers, similarmente à microestrutura, as amostras tratadas termicamente a 860°C apresentaram dureza com pouca variação, conforme pode ser observado na **Tabela 07**. Além disso, apresentaram valores maiores dos mensurados para as amostras no estado inicial e para as amostras tratadas a 690 e 760°C.

Tabela 07- Microdureza média das amostras tratadas termicamente a 860°C

Tempo de Encharque:	30 min	60 min	120 min	240 min
Microdureza Vickers (HV):	320	318	320	317

Fonte: Próprio autor.

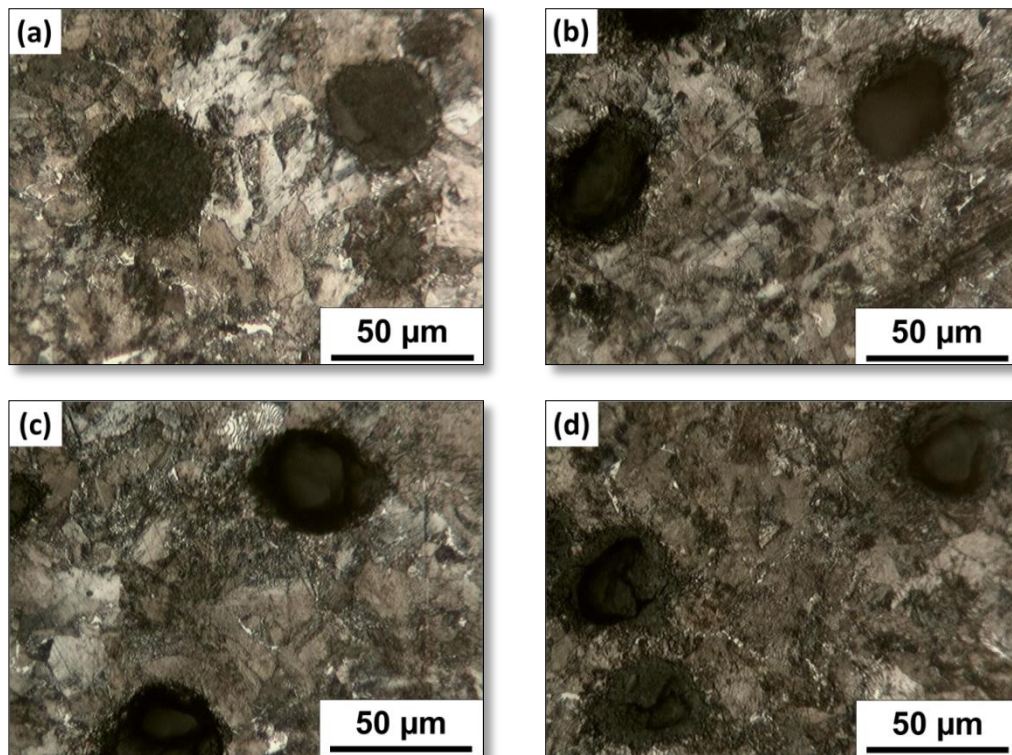
Tabela 06- Dureza Brinell das amostras tratadas termicamente a 860°C.

Tempo de Encharque:	30 min	60 min	120 min	240 min
Dureza Brinell (HB):	316	316	321	318

Fonte: Próprio autor.

Nas amostras tratadas termicamente a 900 °C, **Figura 38**, assim como aconteceu com as amostras tratadas a 860 °C, não houve redução da região perlítica à medida que se aumentou o tempo de encharque. A microestrutura permaneceu semelhante mesmo após a variação do tempo de tratamento. Além disso, a microestrutura se mostrou similar àquela apresentada para o material no estado inicial e para as amostras tratadas a 860 °C.

Figura 38 - Ferro fundido nodular tratado termicamente a 900 °C.



(a) 30 minutos de tempo de encharque, (b) 60 min, (c) 120 min. e (d) 240 min.

Fonte: Próprio autor.

Em relação ao ensaio de microdureza Vickers, as amostras tratadas termicamente a 900° C apresentaram dureza com pouca variação, conforme pode ser observado na **Tabela 08**. Além disso, apresentaram valores maiores daqueles mensurados para a amostra no estado inicial e para as amostras tratadas a 690°C, 760°C e 860°C.

Tabela 08- Microdureza média das amostras tratadas termicamente a 900 °C

Tempo de Encharque:	30 min	60 min	120 min	240 min
Microdureza Vickers (HV):	323	332	329	337

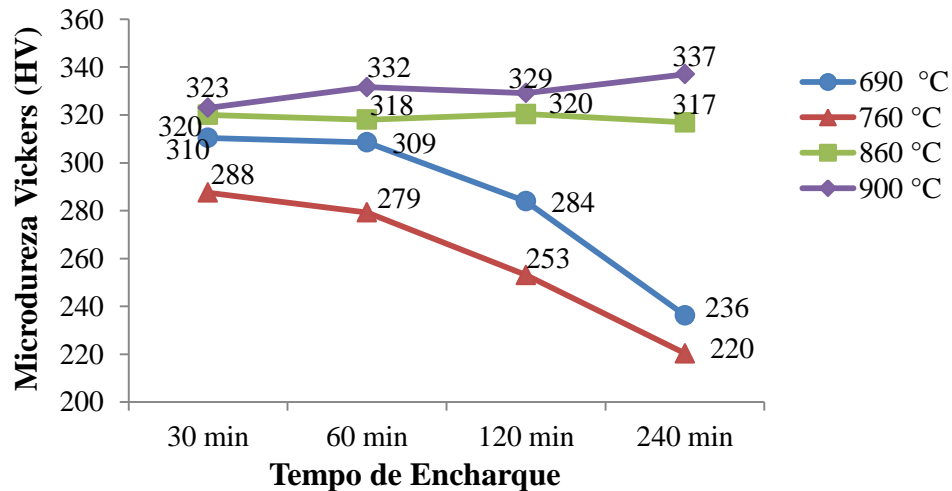
Fonte: Próprio autor.

Tabela 06- Dureza Brinell das amostras tratadas termicamente a 690 °C.

Tempo de Encharque:	30 min	60 min	120 min	240 min
Dureza Brinell (HB):	321	321	313	321

Fonte: Próprio autor.

Os valores de microdureza para as diferentes condições de tratamentos térmicos foram comparados no **Gráfico 01**. Esses valores foram medidos na matriz do ferro fundido nodular, ou seja, em regiões livres de grafita. É possível verificar que para as amostras tratadas a 690°C e 760°C houve uma redução de dureza à medida que se aumentou o tempo de encharque. Essa redução de dureza está relacionada ao aumento das regiões de ferrita observadas nos tratamentos térmicos de 690 e 760°C, principalmente para os tempos de encharque de 120 e 240 minutos. O efeito da elevação de tempo foi similar para as duas temperaturas. Já para as amostras tratadas a 860 e 900 °C não foi verificada uma redução de dureza à medida que se aumentou o tempo de encharque, da mesma forma que não foi verificado o aumento de regiões de ferrita para essas temperaturas.

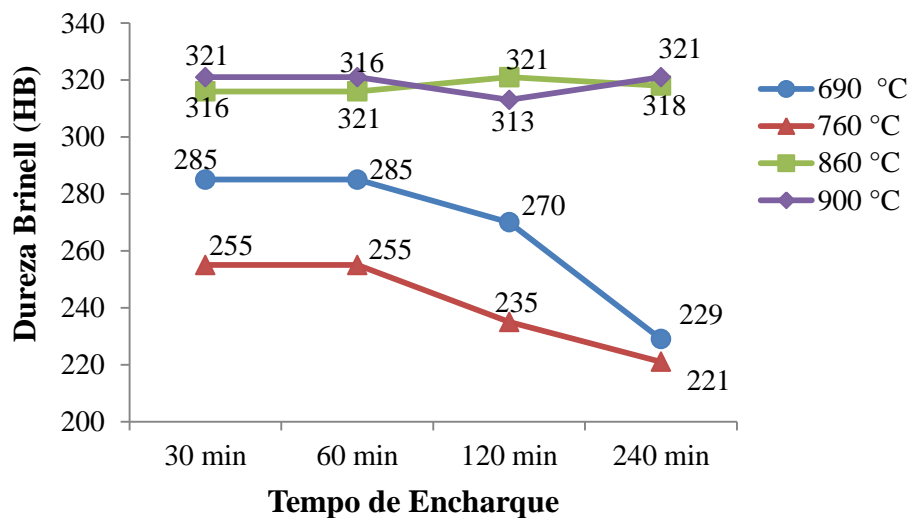
Gráfico 01- Microdureza Vickers na matriz para as diferentes condições de tratamentos térmicos

Fonte: Próprio autor.

Além do ensaio de microdureza Vickers, realizou-se o ensaio de dureza Brinell, com a finalidade de verificar a dureza média da peça. Os valores de dureza encontrados foram confrontados através do **Gráfico 02**. Observou-se a mesma tendência de redução da dureza para as amostras tratadas termicamente a 690°C e 760°C à medida que se aumentou o tempo de encharque. Já para

as amostras tratadas a 860°C e 900°C não foi verificada redução de dureza quando o tempo de encharque foi variado.

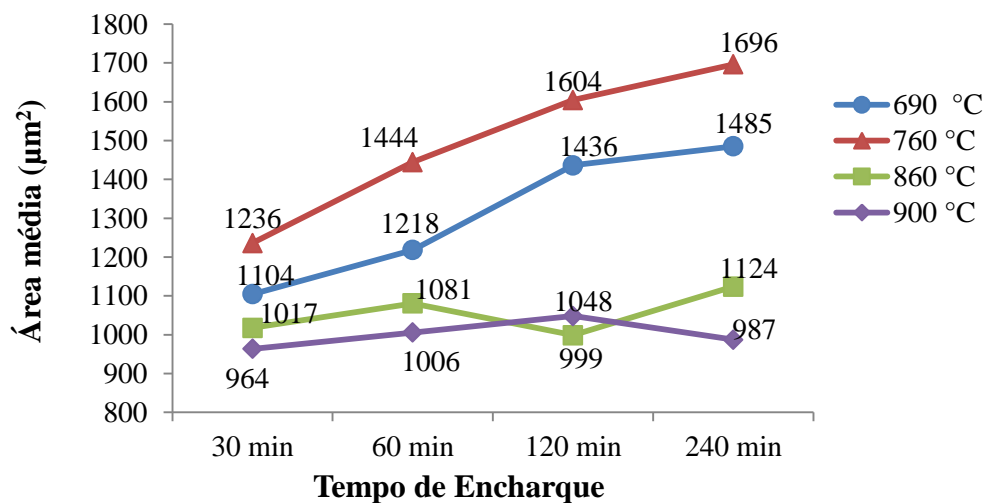
Gráfico 02- Dureza Brinell para as diferentes condições de tratamentos térmicos



Fonte: Próprio autor.

Além da microdureza, outro aspecto analisado foi a dimensão dos nódulos de grafita, para isso mediu-se a área dos nódulos para as diferentes condições de tratamento térmico, conforme apresentado no **Gráfico 3**.

Gráfico 03- Área média dos nódulos de grafita para diferentes tratamentos térmicos.

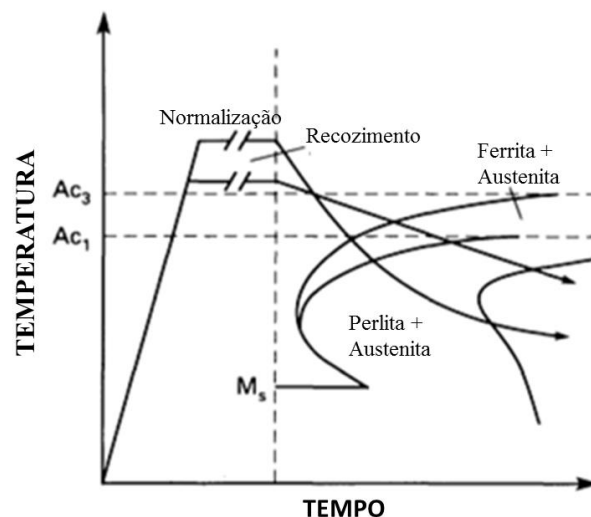


Fonte: Próprio autor.

É possível verificar que para as temperaturas de 690°C e 760°C houve um aumento do tamanho médio do nódulo de grafita à medida que se aumentou o tempo de encharque e com a elevação da temperatura. Esse fenômeno está associado à difusão do carbono para os nódulos de grafita, que resultou também na redução da quantidade de perlita nas regiões próximas à grafita. Por outro lado, para as amostras tratadas a 860°C e 900°C não se observou aumento do nódulo de grafita, porém a dureza média do material aumentou ao se comparar com a apresentada pelo material no estado inicial. Esse aumento da dureza é explicado uma vez que o material no estado inicial teve o resfriamento dentro do molde, a partir da temperatura de austenitização, tendo uma taxa de resfriamento mais lenta do que as amostras tratadas termicamente a 860°C e 900°C, que foram resfriadas ao ar. Assim, o esperado é que a amostra no estado inicial possua a perlita com espaçamento interlamelar maior do que a perlita presente no ferro fundido resfriado ao ar.

Conforme pode ser observado na curva TTT da **Figura 39**, a taxa de resfriamento irá influenciar na microestrutura formada (ASM HANDBOOK, 2004), assim o material resfriado ao ar terá um perlita mais fina e conseqüentemente maior dureza que o material resfriado dentro do molde com taxa de resfriamento controlada.

Figura 39- Relação entre a curva TTT e os tratamentos térmicos de normalização e recozimento.



Fonte: ASM HANDBOOK, 2004.

6. CONCLUSÃO

A realização desse trabalho permitiu analisar e relacionar a importância da composição química, taxa de resfriamento, morfologia da grafita e matriz do ferro fundido nas propriedades mecânicas e classificação das diferentes classes dos ferros fundidos. Além disso, foi possível avaliar o comportamento do ferro fundido nodular para tratamentos térmicos com temperaturas de 690°C, 760°C, 860°C e 900°C e tempos de encharque de 30min, 60min, 120min e 240min e resfriamento ao ar.

Com os resultados obtidos após os tratamentos térmicos, no que diz respeito à análise metalográfica, ensaios de dureza e análise das características da grafita é possível dividir as amostras em dois grupos.

O grupo I é referente às amostras tratadas termicamente a 690°C e 760°C, ou seja, abaixo da temperatura de austenitização, em um tratamento conhecido como recozimento de ferritização. Nessas duas temperaturas observou-se a decomposição da cementita presente na perlita em ferrita mais grafita. Essa decomposição é possível devido à difusão do carbono para os nódulos de grafita, que tiveram a sua área aumentada como consequência. A redução percentual das regiões perlíticas com o aumento das regiões ferríticas fez com que a peça reduzisse a dureza à medida que o tempo de encharque foi elevado de 30 para 240 minutos.

O grupo II é referente às amostras tratadas acima da temperatura de austenitização, a 860°C e 900°C, em um tratamento conhecido como recozimento de decomposição de carbonetos. Nessas amostras não se observou o fenômeno de decomposição da cementita e nem a redução da dureza média do material, porém a dureza média do material aumentou se comparada à apresentada no material no estado inicial. Esse aumento da dureza é explicado uma vez que o material no estado inicial teve o resfriamento dentro molde, a partir da temperatura de austenitização, tendo uma taxa de resfriamento mais lenta do que as amostras tratadas termicamente a 860°C e 900°C resfriadas ao ar.

REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK VOL 1. **Properties and Selection: iron, steels and high performance alloys**. Ohio: ASM International, 1990.

ASM HANDBOOK VOL 9. **Metallography and Microstructures**. Ohio: ASM International, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 945-1: Microestrutura dos Ferros Fundidos - Parte 1: Classificação da Grafita por análise visual**. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6916 Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal**. 1981.

CHAENGKHAM, P.; SRINCHANDR, P.. Continuously cast ductile iron: Processing, structures, and properties. **Journal of Materials Processing Technology**, Bangkok, Tailândia, 2011. p.1-7.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7a ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4a ed. São Paulo: Blücher, 2008.

FERREIRA, J. M. C. **Tecnologia da Fundição**. 2ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

GONZAGA, R. A. Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. **Materials Science & Engineering A**, Navarra, Espanha, 2012. p .1-8.

GUESSER, L. G. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1ª ed. São Paulo: Blücher, 2009.

LABRECQUE, C.; GAGNE, M. Review ductile Iron: Fifty years of continuous development. **Elsevier Science Ltd**. Quebec, Canada, 1998. p. 1-36.

PADILHA, A. F.; AMBROZIO FILHO, F. **Técnicas de Análise Microestrutural**. São Paulo: Hemus, 2004. 190p.

RADZIKOWSKA, J. M. Effect of specimen preparation on evaluation of cast iron microstructures. **Materials Characterization, Elsevier**. Krakow, Polônia, 2005. p. 1-18.

YOON-JUN, K. et al. Investigation into mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI) in accordance with austempering temperature. **Materials Letters- Science Direct**. República da Coreia, 2007. p. 1-4.