

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**RAFAEL DOMINGUES DE SOUZA**

**ESTUDO COMPARATIVO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE UM FERRO  
FUNDIDO NODULAR E UM FERRO FUNDIDO MALEÁVEL COM ELEVADA TAXA  
DE RESFRIAMENTO**

RIO GRANDE  
2019



**RAFAEL DOMINGUES DE SOUZA**

**ESTUDO COMPARATIVO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE UM FERRO  
FUNDIDO NODULAR E UM FERRO FUNDIDO MALEÁVEL COM ELEVADA TAXA  
DE RESFRIAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Orientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl**

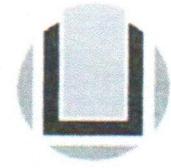
**Co-orientador: José Souza**

**RIO GRANDE**

**2019**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
PPMec



Ata nº 17/2019 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos Vinte e um dias do mês de agosto de dois mil e dezenove foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas e na Sala de Aula PPMec, no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu a **RAFAEL DOMINGUES DE SOUZA**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **Estudo Comparativo do Tratamento Térmico de Um Ferro Fundido Nodular e um Ferro Fundido Maleável com Elevada Taxa de Resfriamento**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Jorge Luis Braz Medeiros e José de Souza, sob a presidência do Professor Luciano Volcanoglo Biehl. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
2. Jorge Luis Braz Medeiros: APROVADO
3. José de Souza: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para a candidata efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. Luciano Volcanoglo Biehl  
CPF: 575.195.100-00
2. Jorge Luis Braz Medeiros  
CPF: 588.871.210-87
3. José de Souza  
CPF: 914.626.140-00

Rafael Domingues De Souza: Rafael D. de Souza

## Ficha catalográfica

S729e Souza, Rafael Domingues de.

Estudo comparativo do tratamento térmico de um ferro fundido nodular e um ferro fundido maleável com elevada taxa de resfriamento / Rafael Domingues de Souza. – 2019.

71 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2019.

Orientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.  
Coorientador: Dr. José Souza.

1. Têmpera 2. Taxa de Resfriamento 3. Ferros Fundidos I.  
Biehl, Luciano Volcanoglo II. Souza, José III. Título.

CDU 669.1

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

*Dedico este trabalho à minha  
esposa, aos meus pais e minha irmã  
pelo incentivo e força para não  
desistir.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande - FURG por me oportunizar realizar este curso através de professores e técnicos qualificados.

Ao coordenador do PPMEC e orientador, Prof. Dr. Luciano VolcanogloBieh, pelos ensinamentos, confiança e incentivo no decorrer de todo o mestrado.

Ao co-orientador, Prof. Dr. José Souza, pelos ensinamentos, confiança e incentivo no decorrer dessa dissertação.

Ao Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros pelo apoio, pelos ensinamentos acadêmicos e amizade.

A minha esposa Kamilla Merlo Parpaiola e a minha família, pelo incentivo e apoio durante todas as fases do mestrado, me confortando e auxiliando de forma a me fazer seguir em busca dos meus objetivos.

Ao apoio da minha irmã, Ana Carolina Domingues de Souza, que foi de fundamental importância para a conclusão desse estudo.

A todos os meus colegas de mestrado, em especial ao Felipe Sette, pelo apoio e parceria em todo esse processo acadêmico.

Aos Alunos, técnicos, estagiários e demais pessoas que de alguma forma me ajudaram na execução deste trabalho.

## RESUMO

Os estudos de têmpera interrompida têm sido empregados como alternativa tecnológica aplicada nos ferros fundidos. Inicialmente, observou-se este fenômeno nos aços e, na sequência, foram desenvolvidas aplicações em ferros fundidos. Para o melhor entendimento dos efeitos da alta taxa de resfriamento, esta pesquisa teve por objetivos comparar o efeito desta alta taxa de resfriamento executado em um ferro fundido nodular em relação ao um ferro fundido maleável. Foram utilizados dois ferros fundidos, um nodular e um maleável, aplicado o tratamento de resfriamento de 80 graus Celsius por segundo, sendo realizado o resfriamento em óleo. Os resultados obtidos demonstraram que tanto as amostras de ferro fundido maleável, quanto as amostras de ferro fundido nodular tiveram aumentos substanciais da microdureza superficial, após a realização do tratamento em seus diferentes parâmetros. Houve formação de martensita de alto carbono em todas as amostras analisadas. Os valores elevados de microdureza média foram descobertos no ferro fundido maleável e compreenderam 322 HV para o tempo de resfriamento de 7 segundos, 346 HV para o tempo de resfriamento de 8 segundos e 425 HV para o tempo de resfriamento de 9 segundos. Os valores elevados de microdureza média foram descobertos no ferro fundido nodular e compreenderam 461 HV para o tempo de resfriamento de 7 segundos, 579 HV para o tempo de resfriamento de 8 segundos e 653 HV para o tempo de resfriamento de 9 segundos. Não foram detectadas trincas nas amostras de ferros fundidos estudadas, representando uma alternativa tecnológica para a elevação da resistência mecânica dos ferros fundidos que foram estudados, porém estudos posteriores deveram ser feitos para confirmação do não aparecimento de trincas nos mesmos. Para trabalhos futuros, sugere-se a verificação das tensões residuais geradas neste processo ou aprofundar a investigação frente ao comportamento da têmpera interrompida em ferros fundidos cinzentos.

**Palavras-chave:** Têmpera. Taxa de Resfriamento. Ferros Fundidos.

## **ABSTRACT**

Interrupted quenching studies have been employed as a technological alternative applied to cast irons. Initially, this phenomenon was observed in steels and, subsequently, applications were developed in cast irons. To better understand the effects of high cooling rate, this research aimed to compare the effect of this high cooling rate performed on a nodular cast iron in relation to a malleable cast iron. Two cast irons, one nodular and one malleable, were applied to the cooling treatment of 80 degrees Celsius per second, and oil cooling was performed. The results showed that both the malleable cast iron and nodular cast iron samples had substantial increases in surface microhardness after the treatment in its different parameters. High carbon martensite was formed in all samples analyzed. High average microhardness values were found in the malleable cast iron and comprised 322 HV for the 7 second cooling time, 346 HV for the 8 second cooling time and 425 HV for the 9 second cooling time. High mean microhardness values were found in the nodular cast iron and comprised 461 HV for the 7 second cooling time, 579 HV for the 8 second cooling time and 653 HV for the 9 second cooling time. No cracks were detected in the studied cast iron samples, representing a technological alternative to increase the mechanical strength of the cast irons that were studied, but further studies should be done to confirm the non-appearance of cracks in them. For future work, it is suggested to verify the residual stresses generated in this process or to deepen the investigation regarding the tempering behavior interrupted in gray cast irons.

**Keywords:** Quenching. Partition. Cast iron.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Ferro fundido nodular com matriz ferrítica. ....	21
FIGURA 2	Ferro fundido nodular com matriz perlítica.....	21
FIGURA 3	Ferro fundido nodular com matriz ferrítica-perlítica.....	22
FIGURA 4	Influência da composição da matriz nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. ....	22
FIGURA 5	Ferro fundido maleabilizado de núcleo preto. Nódulos de grafita sobre um fundo de ferrita. ....	23
FIGURA 6	Microestrutura típica do ADI. [15].....	25
FIGURA 7	Representação esquemática do ciclo de tratamento térmico de austêmpera para obtenção do nodular austemperado. [15].....	26
FIGURA 8	Ciclo esquemático do tratamento de têmpera e partição. ....	27
FIGURA 9	Diagrama de %C versus %Si, apresentando o intervalo ótimo para....	29
FIGURA 10	Organograma metodológico do trabalho de pesquisa.....	32
FIGURA 11	Amostras utilizadas na pesquisa.....	33
FIGURA 12	Representação de um Microscópio e MEV .....	35
FIGURA 13	Microdureza Vickers ferro fundido maleável – Material base.....	39
FIGURA 14	Microdureza Vickers Ferro Fundido Nodular – Material Base.....	40
FIGURA 15	Microdureza Vickers ferro fundido maleável – resfriamento de 7s.....	41
FIGURA 16	Microdureza vickers ferro fundido nodular – resfriamento de 7s.....	41
FIGURA 17	Microdureza vickers ferro fundido maleável – resfriamento de 8s. ....	42
FIGURA 18	Microdureza vickers ferro fundido nodular – resfriamento de 8s.....	43
FIGURA 19	Microdureza vickers ferro fundido maleável – resfriamento de 9s. ....	43
FIGURA 20	Microdureza vickers ferro fundido nodular – resfriamento de 9s.....	44

FIGURA 21 Média das microdurezas vickers do ferro fundido maleável em todos os parâmetros.....	45
FIGURA 22 Média das microdureza Vickers do ferro fundido nodular em todos os parâmetros.....	46
FIGURA 23 Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido maleável – material base – ataque químico com nital 2%.....	47
FIGURA 24 Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido nodular – material base – ataque químico com nital 2%.....	48
FIGURA 25 Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido maleável resfriamento 7s – taque químico com nital 2%.....	49
FIGURA 26 Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido nodular – resfriamento 7s – ataque químico com nital 2%.....	49
FIGURA 27 Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido maleável resfriamento 8s – ataque químico com nital 2%.....	51
FIGURA 28 Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido nodular – resfriamento 8s – ataque químico com nital 2%.....	52
FIGURA 29 Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido maleável – resfriamento 9s – ataque químico com nital 2%.....	52
FIGURA 30 Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido nodular – resfriamento 9s – ataque químico com nital 2%.....	54
FIGURA 31 Resultado do MEV na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 7 segundos em diferentes aumentos.....	55
FIGURA 32 Resultado do MEV na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 7 segundos em diferentes aumentos.....	56
FIGURA 33 Resultado do MEV na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 8 segundos em diferentes aumentos.....	56
FIGURA 34 Resultado do MEV na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 8 segundos em diferentes aumentos.....	57

FIGURA 35 Resultado do MEV na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 9 segundos em diferentes aumentos.....	58
FIGURA 36 Resultado do MEV na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 9 segundos em diferentes aumentos.....	59
FIGURA 37 Resultado do EDS na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 7 segundos.....	60
FIGURA 38 Resultado do EDS na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 7 segundos.....	63
FIGURA 39 Resultado do EDS na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 8 segundos.....	64
FIGURA 40 Resultado do EDS na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 8 segundos.....	65
FIGURA 41 Resultado do EDS na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 9 segundos.....	66
FIGURA 42 Resultado do EDS na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 9 segundos.....	67

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Composição química do ferro fundido nodular .....	43
TABELA 2 Composição química do ferro fundido maleável .....	43

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 Objetivo Geral .....	15
2.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
3.1 Ferro Fundido Branco .....	17
3.2 Ferro Fundido Cinzento .....	18
3.3 Ferro Fundido Nodular .....	18
3.4 Ferro Fundido Maleável .....	22
3.5 Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI) .....	24
3.6 Tratamento Térmico de Têmpera de Partição em Ferro Fundido – Q&P .....	26
3.7 Importância do Silício nos Ferros Fundidos .....	28
3.8 Metalurgia no Ferro Fundido .....	29
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
4.1 Preparação inicial das amostras de Ferro Fundido Nodular e Maleável .....	33
4.2 Microscopia Óptica .....	33
4.3 Ensaio de Microdureza Vickers .....	34
4.4 Microscopia Eletrônica de varredura MEV e EDS .....	35
4.5 Têmpera Interrompida das amostras .....	36
4.6 Análises das Amostras Após Tempera Interrompida .....	36
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>37</b>
5.1 Análise Química .....	37
5.2 Medição De Microdureza Vickers .....	38
5.3 Análise Microestrutural Via Microscopia Óptica .....	44
5.4 Análise Microestrutural Via Microscópio Eletrônico De Varredura – MEV .....	54
5.5 Análise De Espectroscopia De Energia Dispersiva – EDS .....	58
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>68</b>

## 1.INTRODUÇÃO

No passado, os ferros fundidos eram considerados como materiais de pouca aplicação na área da engenharia em decorrência de suas baixas propriedades mecânicas em esforços e tração ocasionando fragilidade. Porém, hoje, os mesmos são considerados indispensáveis à humanidade, com um campo de aplicação amplo nos mais variados setores industriais devido ao seu custo menor de produção e um conjunto satisfatório de propriedades. O avanço nos campos de pesquisa e a tecnologia na área da engenharia possibilitam, deste modo, o progresso e o desenvolvimento de novos e variados métodos de sua obtenção, bem como da alteração de sua estrutura [1].

Com os estudos aplicados na área de tratamento térmico, tais como o de Balachandran *et al.*, [1] que expõem o comportamento mecânico e de desgaste do ferro fundido cinza nas condições austemperada, o de Goldestein *et al.*, [2], que evidenciam o efeito da microestrutura no comportamento à fadiga do ferro fundido dúctil avançado de alta resistência produzido pelo processo de têmpera e particionamento, nota-se que a têmpera interrompida surge como uma alternativa para o desenvolvimento de materiais com a otimização da resistência mecânica e melhor tenacidade.

Este estudo faz um curso em delinear os contornos ao explorar tal proposição, evidenciando sua relevância em perspectiva à identificação, análise e comparação a nível microestrutural do tratamento térmico de têmpera interrompida seguida de revenimento de um ferro fundido nodular e um ferro fundido maleável com elevada taxa de resfriamento, logo trazendo conhecimento a esse tipo de tratamento quando aplicável na matéria prima estudada na pesquisa.

A presente pesquisa se justifica pela possibilidade de produção de conhecimento científico específico frente ao tratamento térmico entre os dois tipos de ferro fundido supracitados. Tal estudo, que por ser científico terá a preocupação com a utilização de métodos de investigação de estudo em laboratório.

Percebe-se, portanto, a relevância do estudo do tema apresentado e delimitado neste trabalho como contribuição para a Ciência da Engenharia Mecânica, em especial por se apresentar adequada à na área de metalurgia.

Para abordar e traçar tal estudo comparativo foi necessário, em primeiro lugar, delimitar o objeto da pesquisa em seu aspecto dimensional, ou seja, a investigação, à priori, à luz de autores, deste modo, este estudo conceitua o ferro fundido branco, cinzento, nodular, maleável, nodular austemperado e o tratamento térmico de têmpera de partição em ferro fundido – T&P. Nessa delimitação teórica levaram-se em conta as obras atuais, neste âmbito, para auxiliar na determinação do modo de investigar tal linha comparativa.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar a microestrutura dos ferros fundidos nodulares e maleáveis, após a realização de têmpera interrompida nos mesmos, analisando também o aumento da dureza e tenacidade.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver conhecimento sobre o comportamento dos ferros fundidos nodulares e maleáveis após submetidos ao tratamento térmico de têmpera interrompida;
- Analisar a composição química dos ferros fundidos nodulares e maleáveis;
- Verificar a microestrutura e microdureza dos mesmos antes e após a realização da têmpera interrompida;
- Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e micro sonda EDS;
- Comparar a aplicação da têmpera interrompida entre os ferros fundidos estudados;
- Entender o mecanismo que promove o aumento da microdureza e tenacidade dos mesmos.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Ferro fundido é um termo genérico usado para designar uma família de metais com uma ampla variedade de propriedades [3]. Todos os ferros fundidos contêm mais de 2% de carbono e uma quantidade considerável de silício (geralmente 1-3%) [3]. O alto teor de carbono e silício significa que eles são facilmente fundidos, possuem boa fluidez no estado líquido e excelentes propriedades de vazamento [3].

Os tipos básicos de ferro fundido são melhores diferenciados por suas microestruturas [4], que são a forma e o formato em que o excesso de carbono se separa durante o resfriamento [4]. Isso determina o tipo de ferro fundido e estabelece a natureza de suas propriedades - ao contrário de suas análises químicas - porque os vários tipos se sobrepõem [3]; [4].

Os ferros fundidos são ligas que possuem basicamente ferro, carbono e silício, porém podendo apresentar outros elementos em sua estrutura final [1], portanto, é uma liga de ferro em mistura eutética com propriedades à base de carbono e silício [1]; [2]. Os ferros fundidos seccionam em três tipos básicos, sendo eles o branco, o cinzento e o nodular [3], conforme são expostos no decorrer deste referencial teórico.

#### 3.1 Ferro Fundido Branco

O ferro fundido branco é formado na solidificação, quando o carbono em solução não é capaz de formar grafita, isto é, o ferro fundido branco não tem grafita livre em sua microestrutura [5]. Logo, os ferros fundidos brancos são duros e quebradiços; eles não podem ser facilmente usinados. Nota-se que o este tipo de ferro fundido é o único em que o carbono está presente apenas como carboneto [3]; [5].

Ressalta-se que ele tem uma aparência leve, bem como tem uma elevada resistência à compressão e retém uma boa dureza e resistência à temperatura mais elevada [5]. Em síntese, o ferro fundido branco é um tipo de liga de ferro-carbono que contém um teor de carbono superior a 2% na forma de cementita. Quando fraturado, exibe uma fratura prateada (branca). O ferro fundido branco tem alta resistência à compressão e resistência ao desgaste [3]. A presença de diferentes carbonetos, dependendo do teor de liga, torna os ferros fundidos brancos extremamente duros e resistentes à abrasão, contudo, muito quebradiço. A microestrutura de ferro fundido branco contém cementita maciça (branco) e perlita. Ele contém cementita interdendrítica (branco) e tem o nome de sua superfície branca quando fraturado por causa das suas impurezas de metal duro [3].

Logo, compreende-se que o ferro fundido branco exibe rachaduras de cor branca quando se rompe devido a impurezas de carboneto [5]. O teor de carbono no ferro fundido precipita grandes moléculas que aumentam sua dureza e durabilidade em aplicações. É econômico e prontamente disponível, tornando-o muito procurado [5].

### 3.2 Ferro Fundido Cinzento

O ferro cinza, ou ferro fundido cinza, é um tipo de ferro fundido que possui uma microestrutura grafitica. É nomeado após a cor cinza da fratura que forma, devido à presença de grafita. É o ferro fundido mais comum e o material fundido mais utilizado com base no peso [1]; [6].

É usado para fabricação de caixas onde a rigidez do componente é mais importante do que sua resistência à tração, como blocos de cilindros de motores de combustão interna, caixas de bombas, corpos de válvulas, caixas elétricas e peças fundidas decorativas. A alta condutividade térmica e a capacidade específica de calor do ferro fundido cinza são frequentemente exploradas para fazer painéis de ferro fundido e rotores de freio a disco [1]; [6].

Uma composição química típica para obter uma microestrutura grafitica é de 2,5 a 4,0% de carbono e 1 a 3% de silício em peso. A grafita pode ocupar 6 a 10% do volume de ferro fundido cinza. O silício é importante para a fabricação do ferro

fundido cinza, em oposição ao ferro fundido branco, porque o silício é um elemento estabilizador de grafita no ferro fundido, o que significa que ajuda a liga a produzir grafita em vez de carbonetos de ferro; com 3% de silício, quase nenhum carbono é mantido na forma química como carboneto de ferro [6].

Outro fator que afeta a grafitização é a taxa de solidificação; quanto mais lenta a taxa, maior o tempo de difusão e acumulação de carbono em grafita. Uma taxa de resfriamento moderada gera uma forma mais perlítica na matriz, enquanto uma taxa de resfriamento rápida forma uma matriz mais ferrítica. Para obter uma matriz totalmente ferrítica, a liga deve ser recozida. O resfriamento rápido suprime parcial ou completamente a grafitização e leva à formação de cementita, chamada ferro fundido branco [7].

A grafita assume a forma de um floco tridimensional. Em duas dimensões, como superfície polida, os flocos de grafita aparecem como linhas finas. A grafita não possui força apreciável, podendo ser tratada como vazios. As pontas dos flocos agem como entalhes preexistentes nos quais as tensões se concentram e, portanto, se comportam de maneira frágil. A presença de flocos de grafita torna o ferro fundido cinza facilmente usinável, pois eles tendem a rachar facilmente nos flocos da grafita [7].

O ferro fundido cinza também possui uma capacidade de amortecimento muito boa e, portanto, é frequentemente usado como base para montagens de máquinas-ferramenta [6].

O ferro cinza é uma liga de engenharia comum devido ao seu custo relativamente baixo e boa usinabilidade, que resulta da grafita que lubrifica o corte e a quebra dos cavacos. Ele também tem boa resistência ao desgaste, porque os flocos de grafita se auto lubrificam. A grafita também oferece ao ferro fundido cinza uma excelente capacidade de amortecimento, pois absorve a energia e a converte em calor. O ferro fundido cinza não pode ser trabalhado (forjado, extrudado, laminado etc.), mesmo à temperatura [7].

### 3.3 Ferro Fundido Nodular

Ferro fundido nodular, também conhecido como ferro fundido dúctil, é um material único, mas parte de um grupo de materiais que podem ser produzidos com uma ampla gama de propriedades através do controle de sua microestrutura [8].

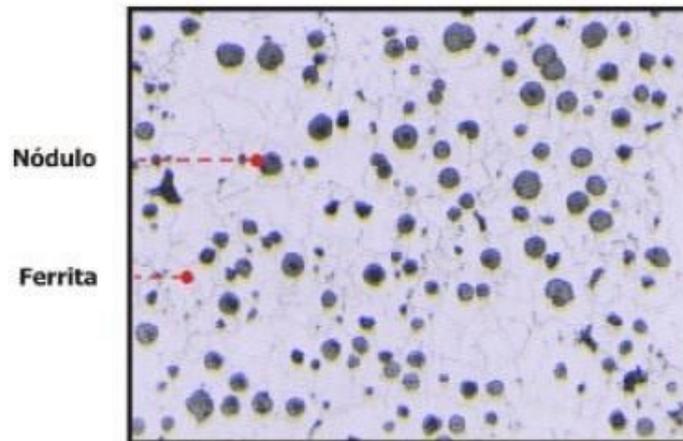
A característica definidora comum desse grupo de materiais é a forma da grafita. Nos ferros dúcteis, a grafita está na forma de nódulos, em vez de flocos, como no ferro fundido cinza. Enquanto flocos afiados de grafita criam pontos de concentração de tensões na matriz metálica, nódulos arredondados inibem a criação de trincas, proporcionando a ductilidade aprimorada que dá nome à liga. A formação de nódulos é obtida pela adição de elementos nodulantes, mais comumente magnésio (o magnésio ferve a 1100° C e o ferro derrete a 1500° C) e cério[8].

Os ferros fundidos do tipo nodulares foram desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo dos anos [9], tornando-se um importante material de utilização e aplicações no campo da engenharia, quando necessita-se de elevada resistência mecânica com boa ductilidade, tornando-se hoje como a classe de ferros fundidos que oferece em seu estado bruto de fundição os maiores valores de resistência [9]. Ressalta-se que sua microestrutura bruta de fundição é formada por nódulos de grafita em meio a uma matriz constituída por misturas de ferrita e perlita. Os mesmos podem obter limites de resistência variando entre 400 e 700 MPa, com alongamento variando entre 2 e 22%, de acordo com a norma brasileira NBR 6916/1981 [10].

Para a produção de ferro fundido nodular, os aditivos, são misturados e fundidos no forno. O material líquido é então purificado e preenchido em um recipiente de tratamento com magnésio. Na etapa subsequente, o fundido tratado é derramado em uma concha antes que possa solidificar no molde. No processo, elementos adicionais - incluindo bário e alumínio - são adicionados para produzir núcleos, que por sua vez promovem a formação esférica da grafita [8];[9].

A figura 1 nos mostra a microestrutura de um ferro fundido nodular com matriz ferrítica.

FIGURA 1 - Ferro fundido nodular com matriz ferrítica.

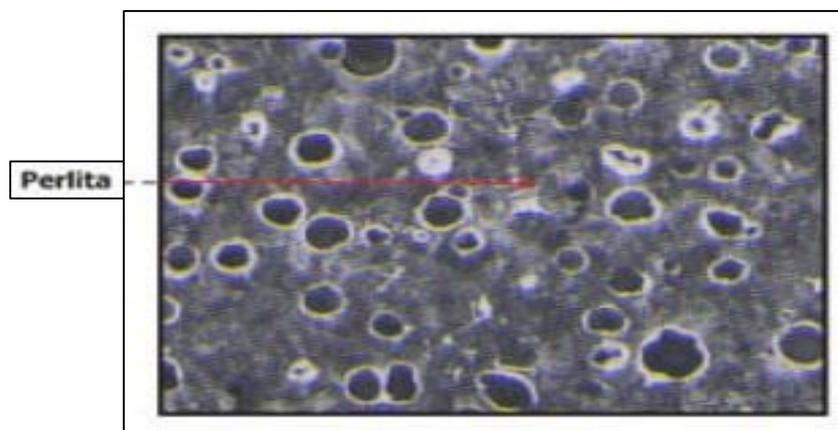


FONTE: Modificado de [11].

Os ferros fundidos nodulares com matriz perlítica apresentam, praticamente, todo o carbono da matriz na forma de carboneto de ferro, cementita ( $Fe_3C$ ), e que está contida dentro de uma matriz perlítica. O mesmo apresenta dureza elevada, alta resistência mecânica e ao desgaste e menor tenacidade. Suas aplicações são em peças submetidas ao impacto e à fadiga, como balancins e engrenagens [2]; [4];[8];[9]

A figura 2 nos mostra a microestrutura de um ferro fundido nodular com matriz perlítica.

FIGURA 2 - Ferro fundido nodular com matriz perlítica.

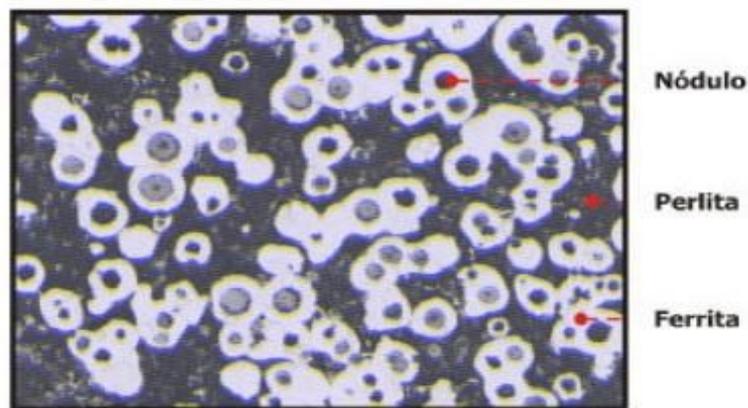


FONTE: Modificado de [11].

Já nos ferros fundidos nodulares com matriz ferrítica-perlítica possuem uma microestrutura parte ferrítica e parte perlítica. O mesmo apresenta valores intermediários de dureza e resistência à tração. Suas aplicações são em girabrequins, engrenagens e buchas. [4];[9]

A figura 3 nos mostra a microestrutura de um ferro fundido nodular com matriz ferrítica-perlítica.

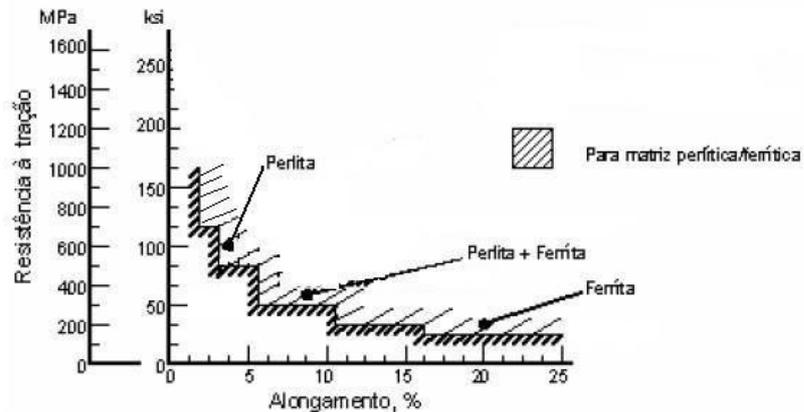
FIGURA 3 - Ferro fundido nodular com matriz ferrítica-perlítica.



FONTE: Modificado de [11].

A figura 4 nos mostra a influência da microestrutura da matriz nas propriedades dos ferros fundidos nodulares. Pode-se analisar que, uma matriz ferrítica resulta em um aumento considerável do alongamento, podendo ultrapassar 20%. Observa-se também que em uma matriz ferrítica-perlítica apresenta alongamento que varia de 3 a 10%. Para um uma matriz tipicamente perlítica observa-se alongamento menor que 2% e dureza acima de 800 MPA [11].

FIGURA 4 - Influência da composição da matriz nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular.



FONTE: Modificado de [11].

### 3.4 Ferro Fundido Maleável

O ferro fundido maleável é essencialmente o ferro fundido branco que foi modificado por tratamento térmico. É formado quando o ferro fundido branco é aquecido a cerca de 920 ° C e depois é deixado esfriar muito lentamente [8].

Neste caso, a grafita se separa muito mais lentamente, de modo que a tensão superficial tem tempo para transformá-la em partículas esféricas, em vez de flocos. Devido à sua menor proporção, os esferoides são relativamente curtos e distantes entre si, e possuem uma seção transversal mais baixa em relação a uma trinca em propagação. Eles também têm limites contudentes, em oposição aos flocos, o que alivia os problemas de concentração de tensão enfrentados pelo ferro fundido cinza. Em geral, as propriedades do ferro fundido maleável são mais semelhantes ao aço macio. Há um limite para o tamanho de uma peça que pode ser fundida em ferro fundido maleável, uma vez que é feita de ferro fundido branco [9].

O ferro fundido branco é convertido em ferro fundido maleável por um processo de tratamento térmico, maleabilização, em duas etapas, para uma condição que tem a maior parte do seu conteúdo de carbono na forma de nódulos de grafita de forma irregular. A estrutura do ferro fundido maleável consiste em

ferrita, perlita e carbono temperado em comparação com a estrutura lamelar indutora de fratura do ferro fundido cinza [11].

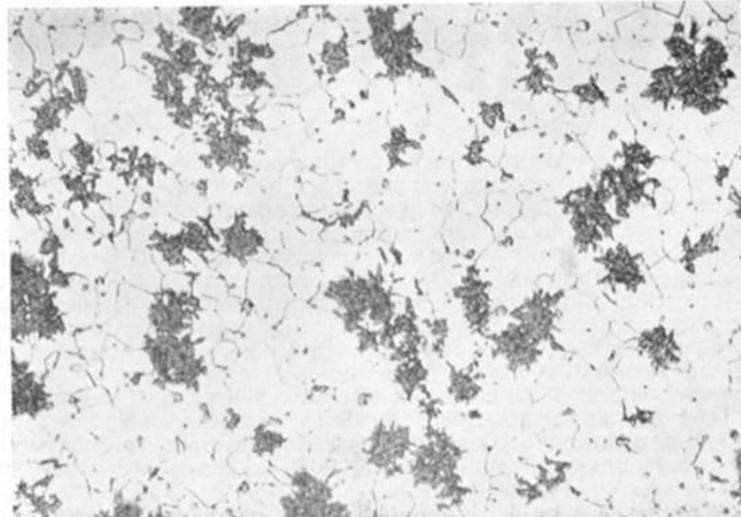
A maleabilização é o tratamento térmico responsável pela produção do ferro fundido maleável, a mesma é um tratamento térmico que submetem ao ferro fundido branco, de composição bem definidas, com carbono na forma inicial de cementita e perlita[12]. Segundo Novikov, o recozimento do ferro fundido branco para maleável é um processo prolongado, com duração de dezenas de horas. Na produção do ferro fundido maleável, o recozimento é a operação mais cara, influenciando fortemente no custo da fundição. Logo, esse é o principal fator que limita a maior produção do mesmo [13].

Os ferros fundidos maleáveis são uma classe de ferros fundidos com propriedades de resistência mecânica intermediárias às dos ferros fundidos cinzentos ou dúcteis. A microestrutura fornece propriedades que tornam os ferros fundidos maleáveis ideais para aplicações em que são necessárias tenacidade e usabilidade e para componentes que precisam de alguma ductilidade ou são maleáveis, para que possam ser dobrados ou flexionados na posição sem rachaduras [8].

O ferro fundido maleável, além de menos sensível a trincas, possui diversos recursos, como valores mais altos de resistência à tração, resistência à ruptura e alongamento e alta resistência ao desgaste e forte resistência ao choque. Essas propriedades o tornam útil para diversos fins comerciais. O ferro fundido maleável é frequentemente usado como uma alternativa ao aço, uma vez que é mais barato produzir e usar [9].

A figura 5 mostra a microestrutura de um ferro fundido maleável de núcleo preto com rosetas de grafita em meio a uma matriz ferrítica.

FIGURA 5 - Ferro fundido maleabilizado de núcleo preto. Rosetas de grafita sobre um fundo de ferrita.



FONTE: Modificado de [11]

Os ferros fundidos maleáveis são frequentemente usados como material de escolha para pequenas peças fundidas ou fundidas com seções transversais finas que, em outros ferros, tendem a apresentar resfriamento (carbonetos nas camadas superficiais devido às taxas de resfriamento rápidas nas seções finas) [12]. As peças vazadas com menos de um grama de peso são fundidas com areia em ferro fundido maleável. Outro aspecto significativo é que as propriedades maleáveis podem existir na superfície da fundição em oposição aos ferros dúcteis, onde a superfície fundida pode conter grafite em flocos, criando uma situação em que as fundições finas de ferro maleável podem ser mais fortes que o ferro dúctil [11];[13]; [14].

A capacidade de ferros fundidos maleáveis para serem soldados a outros materiais ferrosos o torna ideal para suportes complexos que precisam ser parte integrante de peças ou fundições de aço. Ressalta-se a importância de correlacionar tais comportamentos mecânicos para estrutura que é um aspecto extremamente importante a composição química [15].

O ferro fundido maleável de núcleo preto é usado principalmente para produzir as peças de fundição de ferro com funções de impacto, vibração ou torção. Esse ferro fundido é normalmente usado para produzir peças fundidas na

carcaça do eixo traseiro, suporte de mola, corpo da válvula de baixa pressão, acessórios para tubos, ferramentas e chaves. O ferro fundido maleável perlítico possui maior resistência, dureza e resistência à abrasão. Portanto, é usado principalmente para produzir peças resistentes à abrasão para máquinas de força motriz e máquinas agrícolas. O ferro fundido maleável de núcleo branco raramente é usado devido ao seu longo processo de maleabilidade [15]; [16].

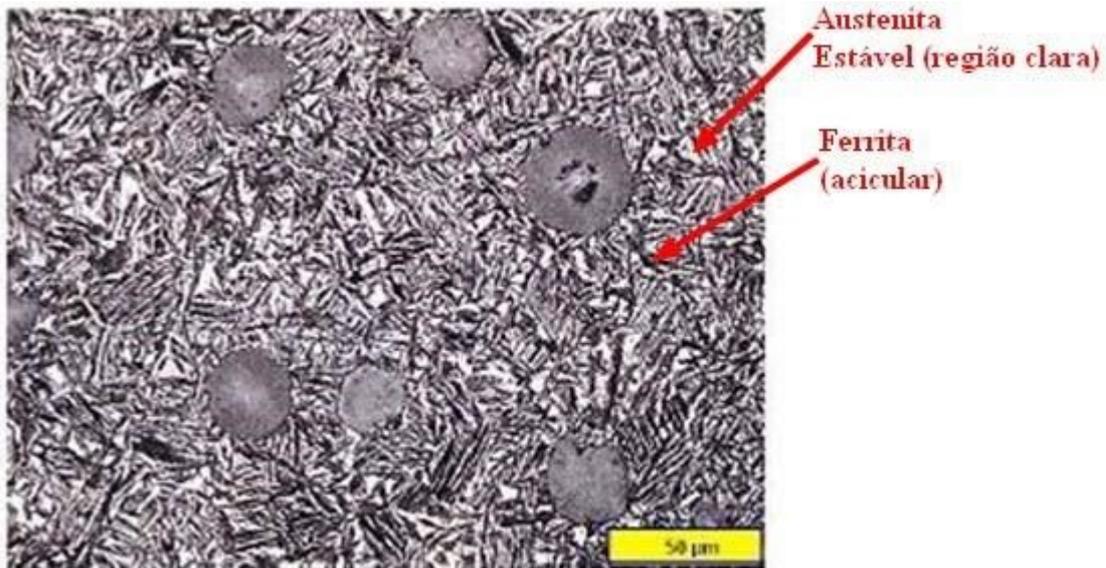
No passado, muitas fundições costumavam produzir peças maleáveis de ferro fundido. No entanto, com o desenvolvimento do ferro nodular, a maioria das peças fundidas de ferro fundido maleável foi substituída por partes de ferro fundido dúctil [17].

### 3.5 Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI)

O ferro fundido nodular austemperado, (ADI - *Austempered Ductile Iron*), começou a ser empregado na indústria a partir da década de 70, com isso ampliando o campo de aplicação dos ferros fundidos, por obter uma combinação de propriedades como alta tenacidade, resistência à tração, ductilidade, resistência ao desgaste e à fadiga, tornando-se um material de engenharia competitivo, combinando propriedades antes encontradas somente nos aços [19];[20];[21].

Os ferros fundidos nodulares austemperados possuem uma microestrutura chamada de ausferrita, composta por austenita de alto carbono e ferrita acicular [11], como mostrado na figura 6 a seguir.

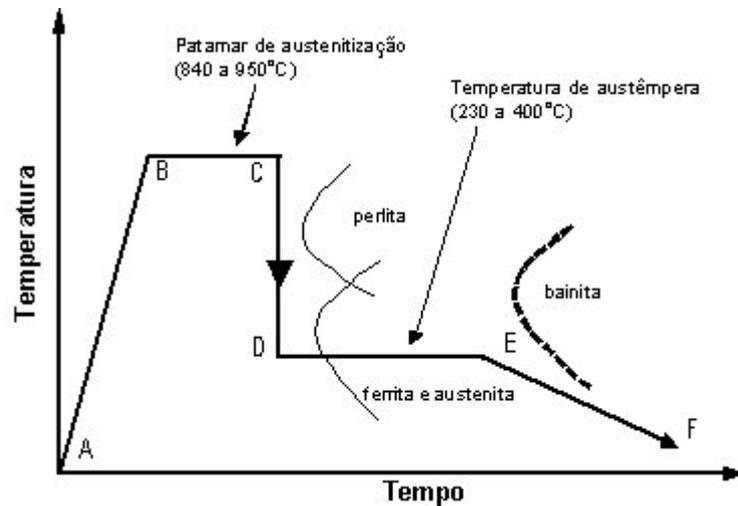
FIGURA 6 - Microestrutura típica do ADI. [11]



FONTE: modificado [11]

O tratamento térmico de austêmpera de um ferro fundido nodular está ilustrado no gráfico esquemático da figura 10. O mesmo consiste em aquecer a peça (trecho A-B) até a temperatura de austenitização, que pode variar entre 840 e 950°C, mantendo o material nesta temperatura (trecho B-C) por um período de tempo suficiente para causara saturação da austenita em carbono. Logo após é feito o resfriamento rápido (trecho C-D) até a temperatura de austêmpera, entre 230 graus celsius e 400 graus celsius, evitando-se assim o campo de formação de perlita. O mesmo é mantido nesta temperatura durante o tempo necessário (trecho D-E) para transformação da austenita rica em carbono em ausferrita, recomenda-se nessa fase que o mesmo não sofra variação de temperatura maior que 11°C. E por último realizar o resfriamento ao ar até a temperatura ambiente (E-F), terminando a reação antes do campo de formação de bainita [19];[20]. Na figura 7 pode-se observar a representação esquemática do ciclo de tratamento térmico de austêmpera para obtenção do nodular austemperado.

FIGURA 7 - Representação esquemática do ciclo de tratamento térmico de austêmpera para obtenção do nodular austemperado [11].



FONTE: Modificado de [11]

A austemperabilidade de uma liga é definida como a capacidade de uma liga ser resfriada a partir do campo austenítico, permitindo a obtenção da estrutura ausferrítica. Enquanto a temperabilidade se objetiva justamente em evitar a formação de estruturas perlíticas e ferríticas durante o resfriamento, a austemperabilidade tem por objetivo evitar também a formação da estrutura bainítica [18]. A reação bainítica é indesejável para os ferros fundidos em função da presença de Fe<sub>3</sub>C na microestrutura, que tem por característica prejudicar a ductilidade e à resistência ao impacto [1];[19]; [22].

O sucesso da austemperabilidade independe somente da composição química da liga, mas como também das temperaturas e tempos de austenitização e austêmpera, do meio onde a liga é resfriada e sua espessura [19].

### 3.6 Tratamento Térmico de Têmpera e Partição em Ferro Fundido – Q&P

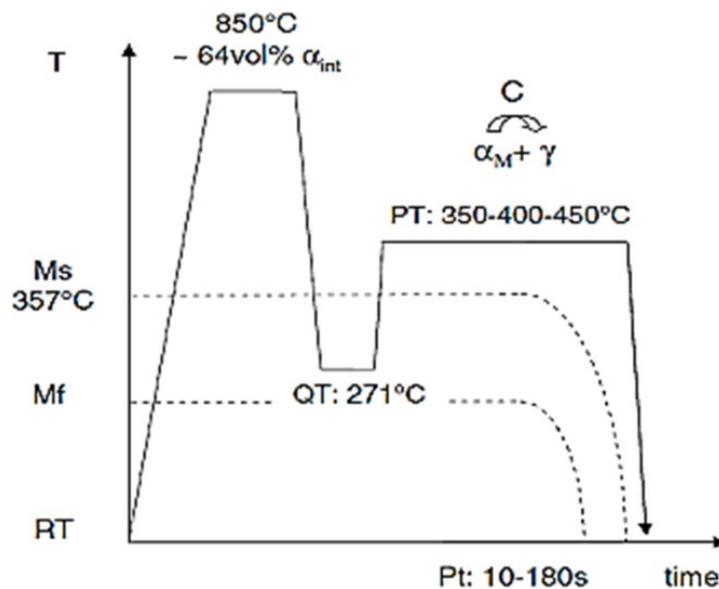
Um novo conceito de tratamento térmico, identificado como têmpera e partição (Q&P), vem sendo estudado como alternativa ao desenvolvimento de aços multifásicos com controle da fração volumétrica da austenita retida, que é estabilizada através do fenômeno da partição do carbono proveniente da martensita.

Diferentemente dos materiais bainíticos onde ocorre a nucleação de novos compostos a partir de uma matriz austenítica, neste tratamento a austenita já presente é estabilizada através da partição do carbono proveniente da martensita. Logo com isso gerando uma estrutura final composta de austenita de alto carbono que se torna estável na temperatura ambiente e martensita de baixo carbono, com baixa dureza e boa tenacidade [1]; [23]; [24]; [25].

O tratamento térmico de têmpera e partição nada mais é que a transformação parcial da austenita em martensita, através do resfriamento rápido até uma temperatura de têmpera selecionada cuidadosamente (entre  $M_s$  e  $M_f$ ) de acordo com sua composição química, seguido de um tratamento de partição térmica, cujo objetivo é o transporte do carbono a partir da martensita supersaturada para a austenita não transformada. Essa mesma supersaturação de carbono promove a estabilização térmica da austenita permitindo que essa fração de austenita fique estável até a temperatura ambiente [26].

A figura 8 apresenta esquematicamente um ciclo típico de têmpera e partição usualmente utilizado em aços contendo manganês, alumínio e silício.

FIGURA 8 - Ciclo esquemático do tratamento de têmpera e partição.



FONTE: Modificado de [20].

O conceito envolvido na utilização da têmpera e partição abrange a obtenção de estruturas aciculares de martensita que são protegidas dos efeitos fragilizantes promovidos pela supersaturação de carbono, o qual é particionado para as frações de austenita remanescente atuando como um estabilizante químico dessas estruturas. Logo, com isso oferecendo uma elevada resistência das estruturas martensíticas aliada à elevada ductilidade da austenita estabilizada pelo elevado teor de carbono em solução [22].

### 3.7 Importância do Silício nos Ferros Fundidos

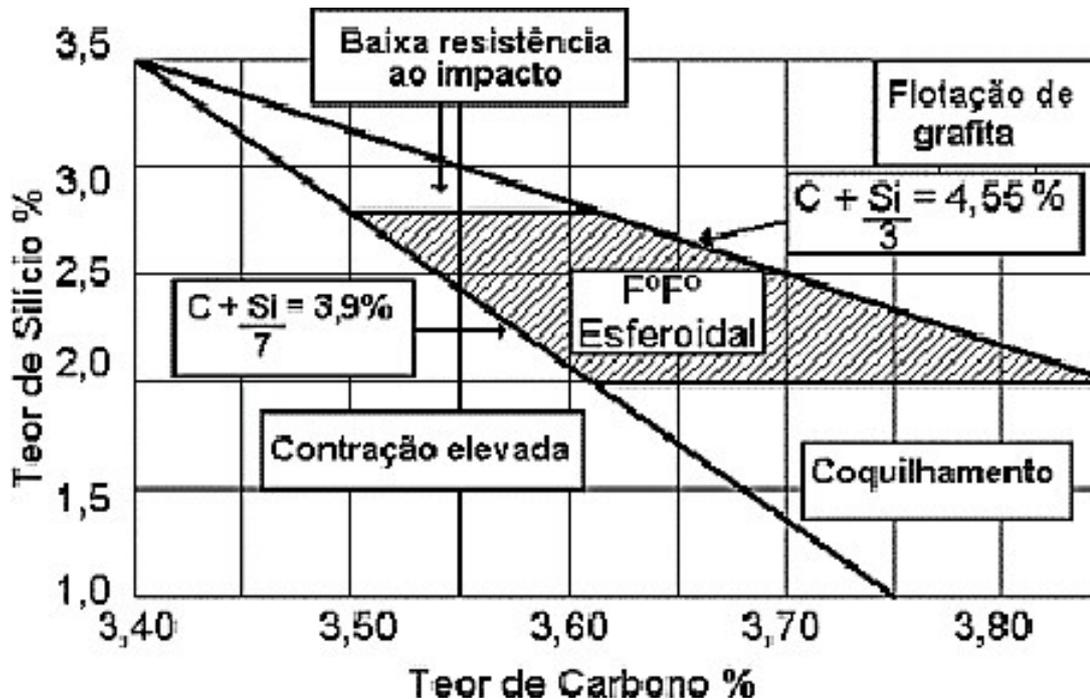
Alguns elementos químicos como o silício e o manganês, são de grande importância para que ocorra a interrupção da transformação bainítica por longos intervalos de tempo, fenômeno esse chamado na literatura de estase ou precipitação interrompida, caracterizando-se pela ausência temporária de precipitação de carbonetos, e ficando apenas a ferrita acicular e austenita enriquecida de carbono. O mesmo ocorre devido à dificuldade da difusão do carbono impostas pelo silício e manganês [25].

Ferro fundido nodulares austemperados são fabricados com a utilização desse fenômeno da *estase*. O mesmo faz uso da precipitação interrompida (*estase*) obtida devido ao alto teor de silício encontrado nos ferros fundidos, para obterem uma microestrutura composta de ferrita bainítica sem a presença de carbonetos em meio a uma matriz de austenita termicamente estável. Essa austenita estável é obtida em função da partição do carbono entre a ferrita bainítica e a austenita adjacente. Logo, a estrutura gerada através desse fenômeno apresenta uma boa combinação de resistência e tenacidade, superior a qualquer outra estrutura encontrada em ferros fundidos [25]; [26].

Para a obtenção de ferros fundidos nodulares de boa qualidade deve-se obedecer a rigorosos parâmetros de fabricação. A escolha correta dos teores de carbono e silício é de extrema importância para otimização das propriedades mecânicas e obtenção de componentes com boa sanidade.

O diagrama de Henderson, apresentado na figura 9, mostra o intervalo de teores de carbono e silício mais adequados para obtenção de material otimizado[25].

FIGURA 9 - Diagrama de %C versus %Si, apresentando o intervalo ótimo para obtenção do ferro fundido nodular [21].



FONTE: Modificado de [25].

### 3.8 Metalurgia do ferro fundido

A metalurgia do ferro fundido é muito mais complexa do que sua economia. De fato, o ferro fundido é um dos sistemas metalúrgicos mais complexos. É interessante notar que as ligas de ferro-carbono (com menos de 2% de carbono) são realmente metaestáveis. O verdadeiro sistema estável é o sistema de transformação de fase ferro-carbono (Fe-C). As transformações de estado sólido, nas quais se baseiam os tratamentos térmicos de ferro fundido, são semelhantes às aplicadas aos aços e podem ser caracterizadas como [6]:

- No resfriamento de ferros hipo-eutéticos, a uma temperatura logo abaixo de 1147 ° C, a microestrutura consiste em austenita proeutética e ledeburita. Em um resfriamento adicional, o excesso de carbono sai como cementita da

austenita proeutética e eutética. Finalmente, a 727 ° C, a austenita eutética e proeutética se decompõem em perlita com um teor de carbono de aproximadamente 0,77%.

- No resfriamento de ferros fundidos eutéticos, forma-se ledeburita. Em um resfriamento adicional, o excesso de carbono sai da solução como cementita da austenita eutética. Finalmente, a 727°C, a austenita eutética se decompõe em perlita.

- No resfriamento de ferros hiper eutéticos, a uma temperatura logo abaixo de 1147 ° C, a microestrutura consiste em austenita proeutética e ledeburita. Em um resfriamento adicional, o excesso de carbono sai como cementita na forma de cementita proeutectoide e austenita eutética. Finalmente, a 727°C, a austenita eutética se decompõe em perlita.

Se uma liga de ferro exceder 2,11% de carbono, o carbono não precisa se nuclear da decomposição da austenita, mas pode se formar diretamente a partir da fusão por uma reação eutética. Observe que a cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ainda pode nuclear-se na eutética mais facilmente do que a grafita, mas com um resfriamento suficientemente lento, a própria grafita é capaz de se formar e crescer [6].

Considera-se a solidificação de um ferro fundido com 3% de carbono, a uma taxa de resfriamento rápida, as dendritas se formam quando a liga esfria abaixo do líquido e cresce até que a temperatura eutética seja atingida. No ponto eutético, a formação de grafita é suprimida, mas a austenita e a cementita precipitam para formar ledeburita - uma forma de eutética que consiste em esferas de austenita embutidas na cementita. Formas de ledeburita na eutética Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ . Em um resfriamento adicional, a cementita cresce à medida que a austenita diminui no conteúdo de carbono. Na eutética, o austenito restante se transforma em perlita. À temperatura ambiente, o ferro é duro e quebradiço é chamado de ferro branco porque a superfície de um pedaço de ferro fraturado é branca e lustrosa [25].

Após o resfriamento lento de um ferro fundido a 3% de carbono, a austenita se forma a partir do derretimento, mas o congelamento eutético agora é lento o suficiente para que os produtos da reação eutética sejam austenita e grafita. A

grafita eutética tende a formar flocos cercados por austenita eutética. À medida que o resfriamento continua, a austenita diminui o teor de carbono, enquanto a austenita restante se transforma em perlita. Como a superfície da fratura parece cinza opaca, o material é conhecido como ferro fundido cinza (ou ferro fundido cinza perlítico) [26].

O resfriamento a uma taxa extremamente lenta resulta em alterações de fase semelhantes às de um componente de resfriamento lento, exceto que o resfriamento eutetoide é suficientemente lento para permitir que a grafita precipite em vez da perlita. Não se formarão novos flocos de grafita, mas os presentes aumentarão de tamanho. A microestrutura final consiste em flocos de grafita embutidos em uma matriz de ferrita. O material resultante é chamado ferro cinzento ferrítico. Vale ressaltar que o resfriamento de peças vazadas reais raramente é lento o suficiente para obter essa estrutura [1].

Às vezes, a taxa de resfriamento de uma parte da fundição pode variar, resultando em uma estrutura que contém manchas de ferro fundido branco e cinza chamado ferro fundido mesclado.

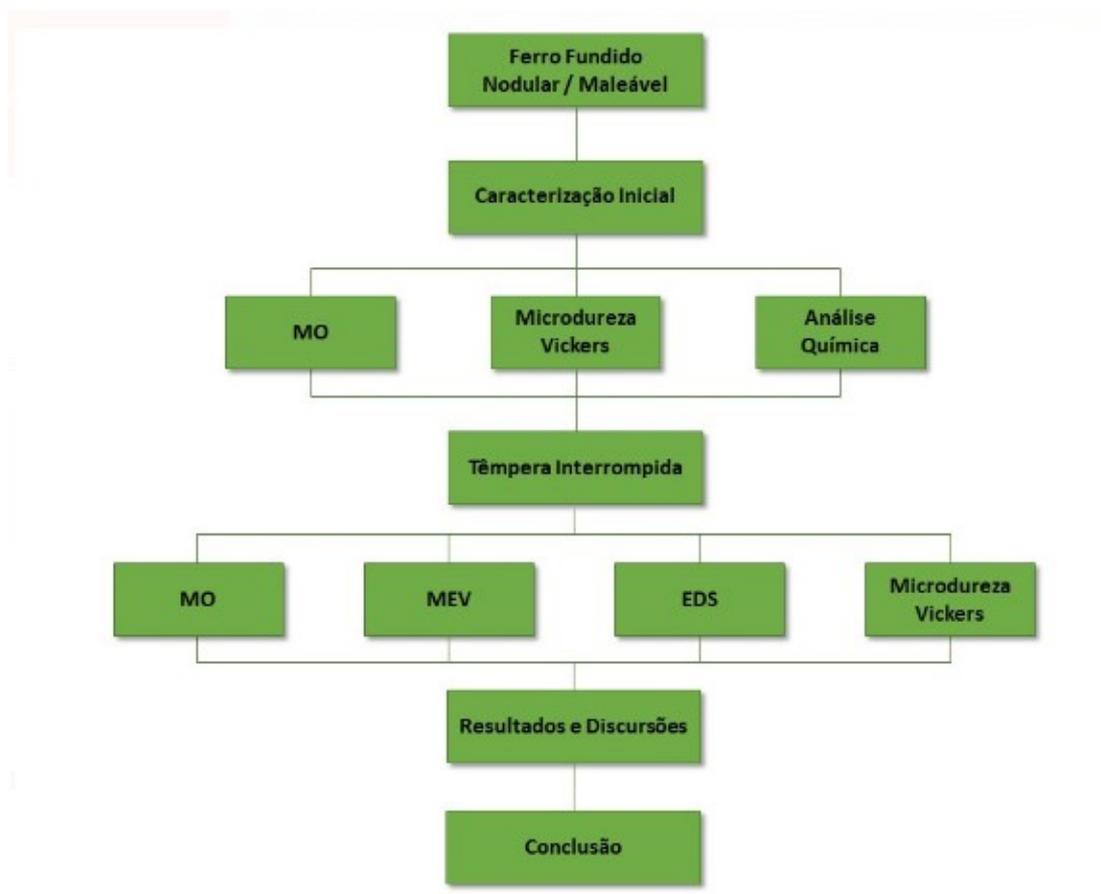
Em síntese: pode-se dizer, portanto, que no ferro fundido branco, a maioria do carbono ocorre como carboneto de ferro. No ferro fundido maleável, a maioria do carbono está na forma de rosetas de grafita de formato irregular. No ferro cinza, o carbono está presente como flocos de grafita e, no ferro fundido dúctil, a grafita ocorre em nódulos. Como a grafita tem muito pouca resistência (coesa) e reduz a seção transversal metálica eficaz da fundição, a resistência e a ductilidade são afetadas.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado dois tipos de ferros fundidos, um do tipo nodular e um do tipo maleável, cujo cada qual com sua composição química conforme mostrada na Tabela 1 e 2. Os diferentes ferros fundidos, de fabricação industrial, foram fornecidos pelo laboratório de fabricação mecânica da FURG. A taxa de resfriamento utilizada nos dois casos foi de 80 graus Celsius por segundo em óleo de têmpera, resfriada posteriormente ao ar.

A figura 10 apresenta o organograma metodológico a ser seguido no trabalho de pesquisa.

FIGURA 10 - Organograma metodológico do trabalho de pesquisa



FONTE: Próprio Autor

#### 4.1 Preparação inicial das amostras de Ferro Fundido Nodular e Maleável.

As amostras dos dois tipos de ferros fundidos foram recebidas na forma de barra e peças automotivas com formato dimensional variável. As mesmas foram confeccionadas, gerando assim 10 amostras de ferro fundido nodular e 10 amostras de ferro fundido maleável com dimensões não regulares e ou idênticas devido a obtenção da matéria prima utilizada na pesquisa, as mesmas ficaram conforme mostrado na figura 11.

FIGURA 11 - Amostras utilizadas na pesquisa.



FONTE: Próprio autor

Após a confecção das amostras, uma das mesmas de cada tipo de ferro fundido foi separada e preparada para realização da análise da composição química utilizando o espectrômetro de emissão ótica modelo Fondry-Master Pro, marca Oxford Instruments.

#### 4.2 Microscopia Óptica

Para que seja realizado a caracterização da microestrutura das 9 amostras restantes de cada tipo de ferro fundido no microscópio, segue-se etapas como embutimento, lixamento, polimento e por fim ataque químico para a observação das fases a serem analisadas na caracterização.

Para realização da caracterização microscópica, as amostras foram embutidas a quente e posteriormente lixada com lixas de granulometria 80, 220, 320, 400, 600 e 1200 respectivamente, polida manualmente com alumina e água e posteriormente atacadas com o reagente químico níquel 2%.

Todo o preparo da amostra e análise metalográfica das mesmas ocorreram no laboratório de metalografia disponibilizado na FURG, as mesmas foram analisadas em um microscópio óptico de luz refletida, Olympus GX 51S, com sistema de aquisição de imagens digitais.

#### 4.3 Ensaio de Microdureza Vickers

Para avaliação da dureza das fases, as amostras dos dois tipos de ferro fundido, passaram por ensaio de dureza por microdureza Vickers com equipamento da marca Shimadzu, modelo HMV-2T.

O mesmo foi realizado com carga de 300g por 10 segundos, na amostra polida, limpa e atacada. O ensaio foi realizado antes e após a realização da têmpera e partição, a microdureza foi feita em diferentes pontos das amostras, pontos esses sendo localizados no meio, e na metade entre o meio e as quatro arestas das amostras, procurando assim verificar o grau de dureza em diferentes pontos das mesmas.

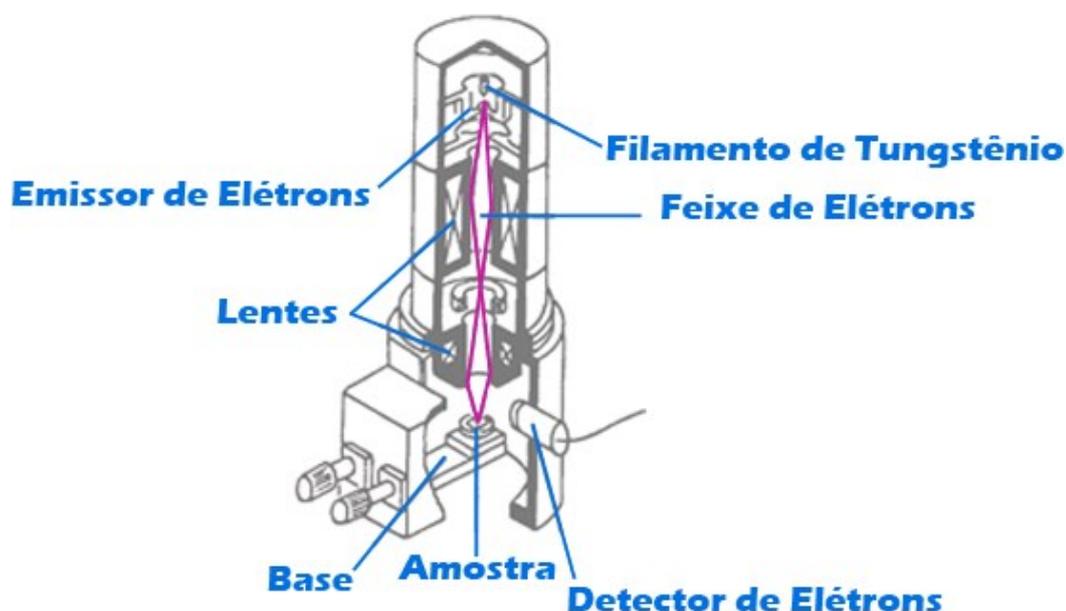
#### 4.4 Microscopia Eletrônica de varredura MEV e EDS

De forma a enriquecer o trabalho de pesquisa, foi realizado a microscopia eletrônica de varredura – MEV, que possibilita uma ampliação maior que a da microscopia óptica, podendo assim chegar a 20.000X. O funcionamento do microscópio eletrônico de varredura - MEV, os elétrons são acelerados numa coluna por tensões que podem atingir 40KV, através de lentes magnéticas que atingem a superfície do material. Este feixe, ao passar por bobinas de varredura, interage com o material e os sinais são detectados pelo equipamento. A corrente que passa pelas

bobinas de varredura sincronizada com as bobinas de deflexão, produz uma imagem aumentada, que são amplificados e reproduzidos em uma tela de monitor [27].

O equipamento utilizado para melhor caracterização das amostras de ferro fundido foi o microscópio eletrônico de varredura marca JEOL modelo JSM6610LV em conjunto com microssondas de EDS, disponibilizado no CEME-SUL da FURG representado na figura 12.

FIGURA 12 - Representação de um Microscópio e MEV



FONTE: UFOP, 2017

#### 4.5 Têmpera Interrompida das amostras

Para a realização da têmpera interrompida das amostras, foi utilizado um forno de resistência elétrica da marca, EDG equipamentos, modelo EDG10P-S, disponibilizado no laboratório de fabricação mecânica da FURG.

Para a realização do tratamento térmico, as amostras foram aquecidas em um forno de resistência elétrica até uma temperatura de 900°C por um tempo de 60 minutos, até que ocorra a austenitização das mesmas de forma homogênea, em seguida foram imersas em banho de têmpera a óleo para que ocorresse o rápido resfriamento das mesmas, e após o mesmo as amostras foram recolocadas

novamente em forno elétrico na temperatura de 400°C por um tempo de 30 minutos para que assim ocorra o processo revenimento.

Esse ensaio foi realizado com os dois tipos de ferros fundidos, porém foi feito o resfriamento em óleo em 3 diferentes tempos, sendo eles 7s, 8s e 9s, objetivando analisar posteriormente as possíveis diferenças causadas por essa variável. As amostras foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera interrompida antes da realização do embutimento a quente.

#### 4.6 Análises das Amostras Após Tempera Interrompida

As amostras após tratamento térmico de têmpera interrompida foram submetidas as análises de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, mapeamento via sonda EDS e microdureza de Vickers.

As análises foram feitas nos 3 diferentes tempos de resfriamento, objetivando analisar os resultados assim apresentados.

## 5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise Química

A análise química da material base foi realizada, através de um espectrômetro de emissão óptica modelo Foundry-Master Pro. O equipamento utilizado pertence ao laboratório de inspeção do PPMec da Escola de Engenharia da FURG.

As aferições foram realizadas em 4 pontos das amostras partindo do centro da amostra para a periferia das mesmas. Os resultados estão representados na Tabela 1 para o ferro fundido nodular e na tabela 02 para o ferro fundido maleável.

TABELA 1 - Composição química do ferro fundido nodular

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>
Máx. 4,5	1,5 a 1,78	0,09 a 0,10	Máx. 0,005	Máx. 0,005	0,03 a 0,09	0,01 a 0,26	0,02 a 0,05
<b>Al</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>
Máx. 0,016	Máx. 0,005	1,65 a 2,54	Máx. 0,018	Máx. 0,014	Máx. 0,005	0,2 a 1,51	Máx. 0,20

FONTE: Próprio Autor

TABELA 2 - Composição química do ferro fundido maleável

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>
Máx. 4,5	0,34 0,36	0,53 a 0,56	Máx. 0,005	Máx. 0,10	0,01 a 0,02	0,0051 a 0,008	0,02 a 0,03
<b>Al</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>
Máx. 0,005	Máx. 0,005	1,18 a 1,33	0,005 a 0,0085	Máx. 0,005	Máx. 0,005	0,55 a 1,00	0,13 a 0,20

FONTE: Elaborado pelo próprio autor.

Como pode ser observado nas tabelas 1 e 2, a composição química obtida na material base de cada tipo de ferro fundido estudado, se encontram de acordo com o esperado pela literatura, não sendo detectadas variações significativas ou segregações no aspecto das macroanálises realizadas [3].

## 5.2 Medição De Microdureza Vickers

Os valores de microdureza Vickers na amostra de cada parâmetro e tipo de ferro fundido estudado são indicados a seguir. Destaca-se que os valores preliminares encontrados nos ferros fundidos nodulares foram acentuadamente mais elevados do que os encontrados nas amostras dos ferros fundidos maleáveis. Este fato está diretamente relacionado a severidade do tratamento térmico de maleabilização [5]; [28].

Nas figuras 13 e 14 são apresentados os resultados das medições de microdureza vickers no ferro fundido nodular e no ferro fundido Maleável. Em todas as amostras que foram submetidas aos processos de têmpera interrompida detectou-se aumento significativo da microdureza e conseqüentemente da resistência mecânica. O pico de microdureza ocorreu na amostra de ferro fundido nodular resfriado por 9 segundos, sendo este valor encontrado na região entre a superfície e o núcleo.

A análise de microdureza em ferros fundidos deve ser realizada de forma seletiva, pois caso haja alguma heterogeneidade na formação da grafita, está irá ocasionar aumento dos valores medidos e o inverso nas regiões com menor densidade da grafita [5].

Nas figuras 15 e 16 estão apresentados os resultados das medições de microdureza na amostra ferro fundido nodular e maleável após o tratamento térmico com o tempo de resfriamento a óleo de 7 segundos. Nas figuras 17 e 18 estão apresentados os resultados das medições de microdureza Vickers na amostra ferro fundido nodular e maleável após o tratamento térmico com o tempo de resfriamento a óleo de 8 segundos. Nas figuras 19 e 20 estão apresentados os resultados das medições de microdureza vickers na amostra ferro fundido nodular e maleável após

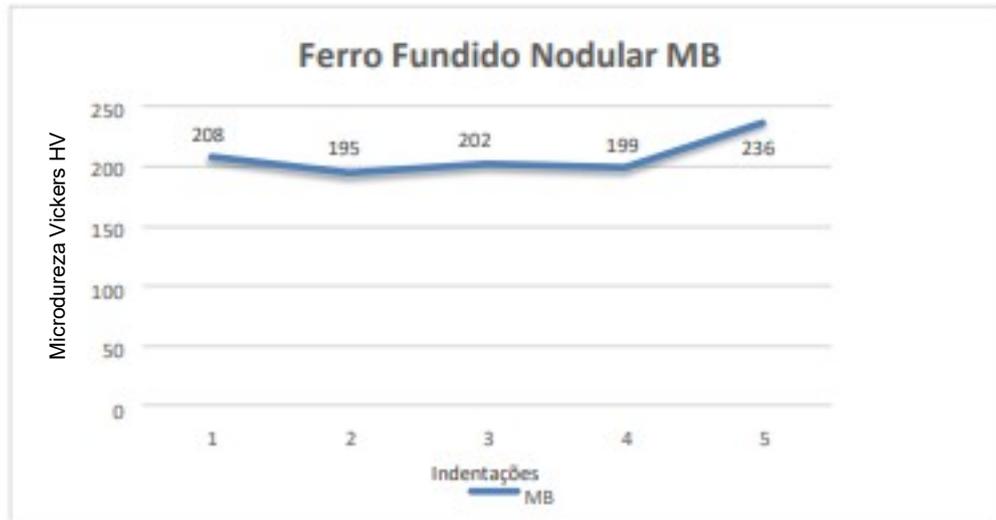
o tratamento térmico com o tempo de resfriamento a óleo de 9 segundos. Nas figuras 21 e 22 estão apresentados os resultados das médias das medições de microdureza Vickers na amostra de ferro fundido nodular e maleável em todos os parâmetros estudados.

FIGURA 13 - Microdureza Vickers ferro fundido maleável – Material base



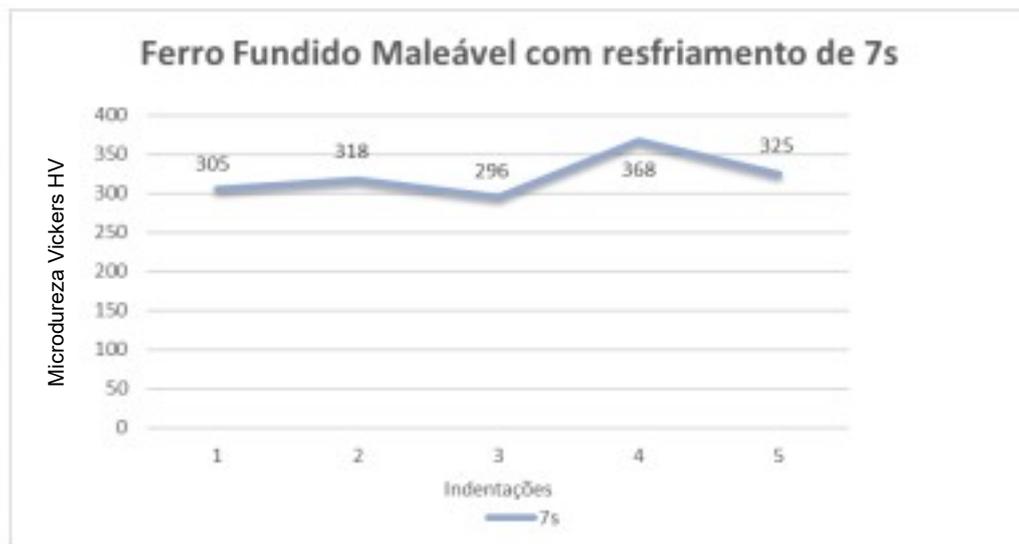
FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 14 - Microdureza Vickers Ferro Fundido Nodular – Material Base



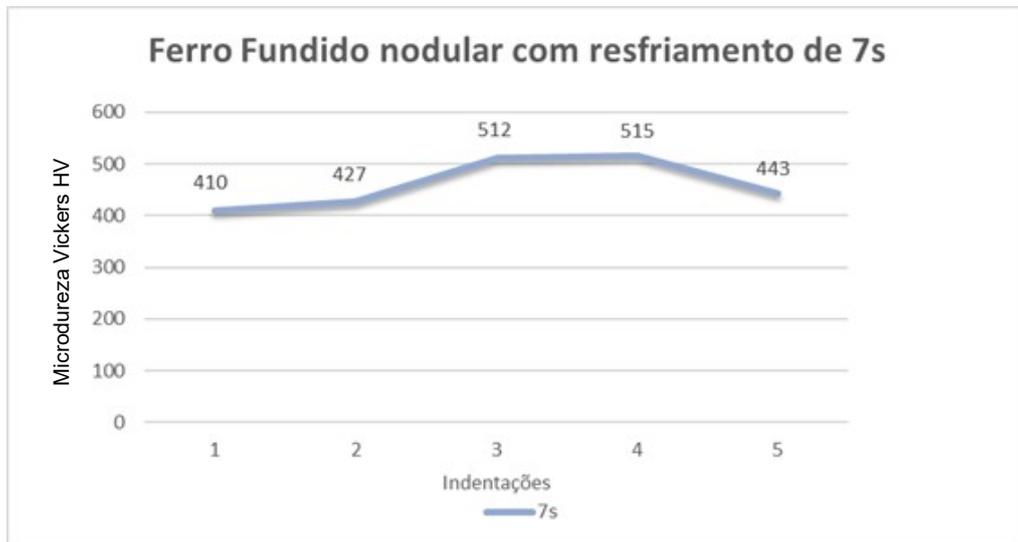
FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 15 - Microdureza Vickers ferro fundido maleável – resfriamento de 7s.



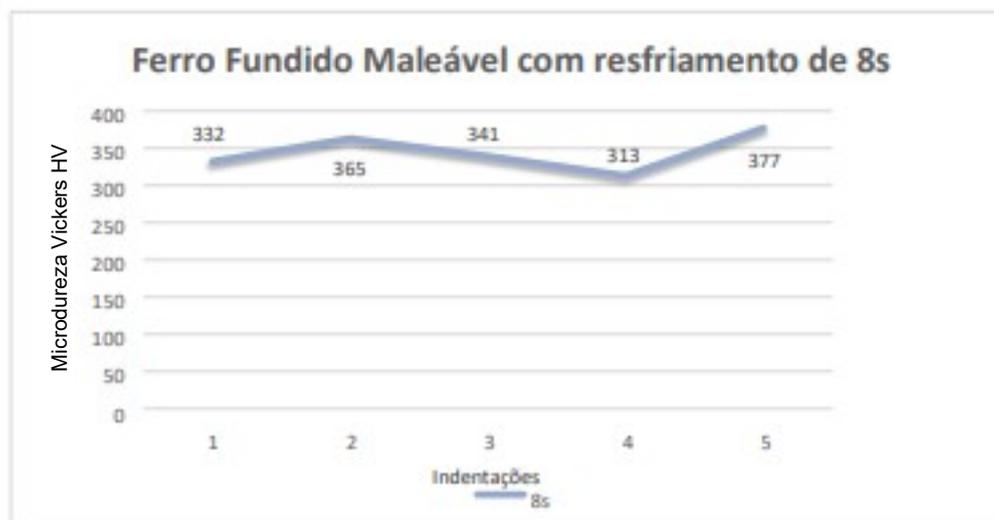
FONTE: Próprio Autor

FIGURA 16 - Microdureza vickers ferro fundido nodular – resfriamento de 7s.



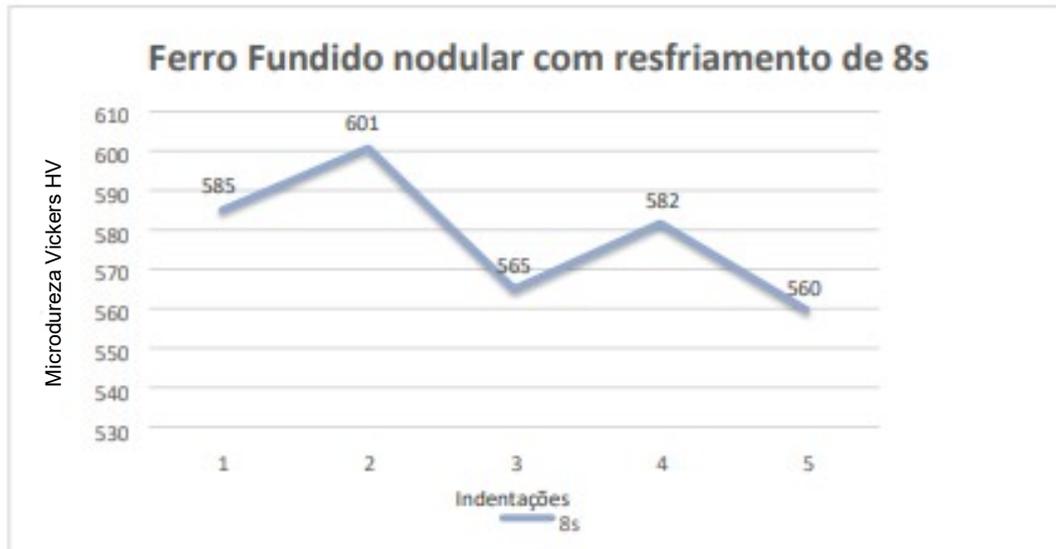
FONTE: Próprio Autor

FIGURA 17– Microdureza vickers ferro fundido maleável – resfriamento de 8s.



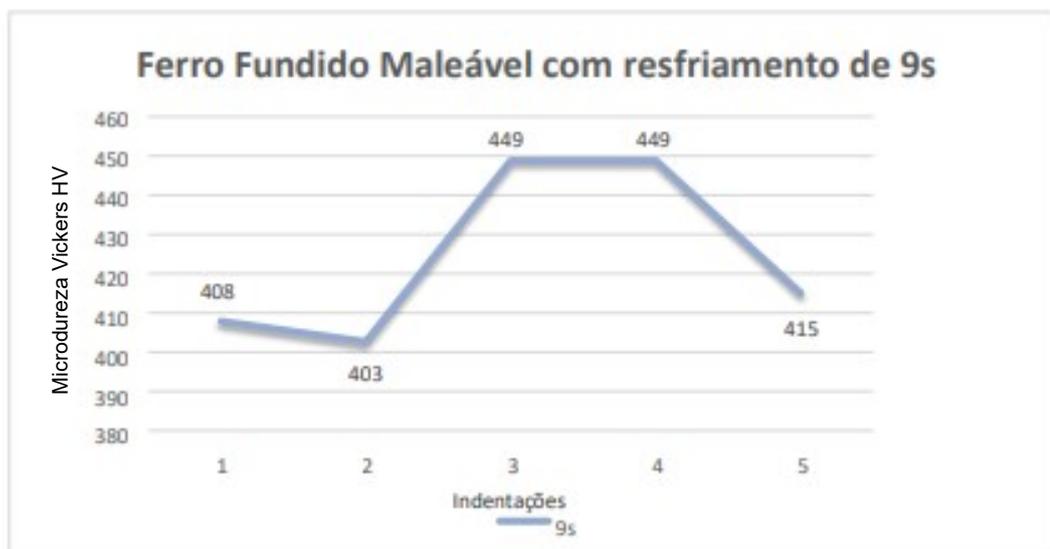
FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 18 - Microdureza vickers ferro fundido nodular – resfriamento de 8s.



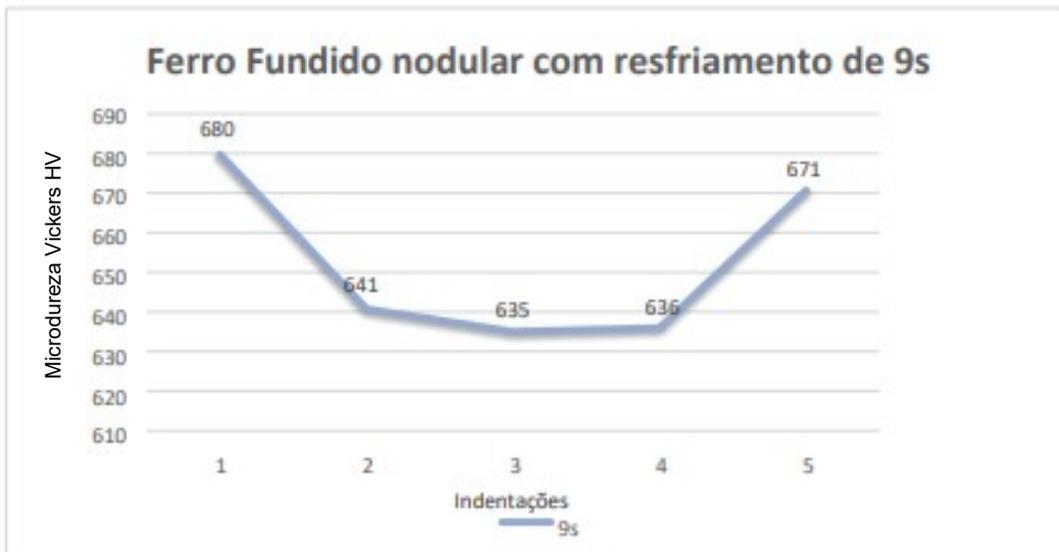
FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 19 - Microdureza vickers ferro fundido maleável – resfriamento de 9s.



FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 20 - Microdureza vickers ferro fundido nodular – resfriamento de 9s.



FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 21 - Média das microdurezas vickers do ferro fundido maleável em todos os parâmetros.



FONTE: Próprio Autor

FIGURA 22 - Média das microdureza Vickers do ferro fundido nodular em todos os parâmetros.



FONTE: Próprio Autor

Como pode ser observado nas figuras 21 e 22, todas as amostras que passaram pelo tratamento térmico obtiveram ganhos consideráveis de microdureza em relação ao material base, podendo ser observado que o ganho de microdureza chegou a ser aumentado em aproximadamente 200% em cada tipo de ferro fundido, tendo o ferro fundido nodular uma ganho de dureza minimamente maior que o ferro fundido maleável, e esse aumento se mostrou de forma proporcional com o tempo de resfriamento das amostras, isso se deve pelo fato da amostra submetida ao maior tempo de resfriamento está mais próxima da temperatura de transformação final martensítica.[29].

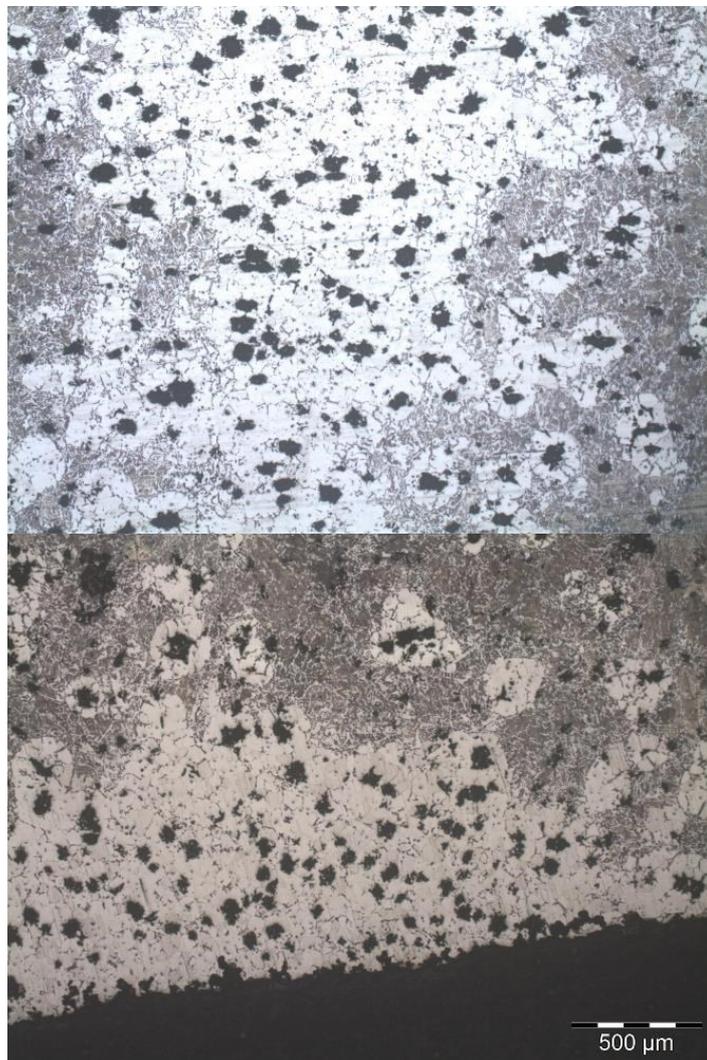
### 5.3 Análise Microestrutural Via Microscopia Óptica

A análise microestrutural dos diferentes tipos de amostras foram estudadas utilizando a análise metalográfica, realizada no laboratório de metalografia disponível na FURG.

As figuras 23 e 24 mostram os resultados da metalografia do material base dos ferros fundido maleável e nodular, evidenciando as características visuais de

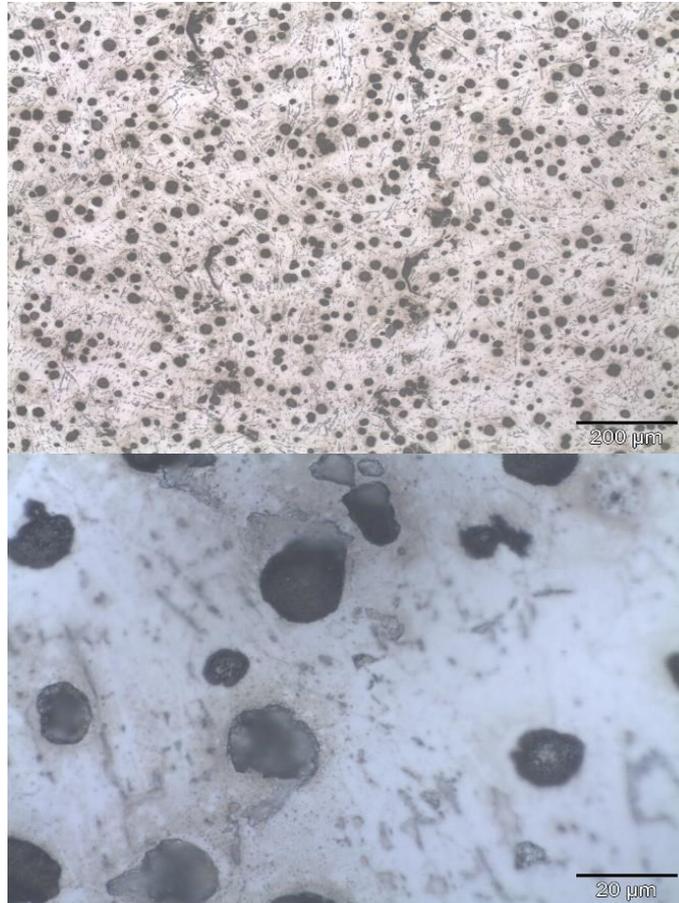
cada amostra diferente de ferro fundido estudada. As microestruturas demonstram grafita homoganeamente distribuída na forma de rosetas para os ferros fundidos maleáveis e em forma de nódulos para os ferros fundidos nodulares, e inexistência de martensita ou bainita[28]. Pode ser verificado também a descarbonetação superficial dos ferros fundidos estudados provenientes de seu processo de fundição inicial.

FIGURA 23 - Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido maleável – material base – ataque químico com nital 2%.



FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 24 - Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido nodular – material base – ataque químico com nital 2%.

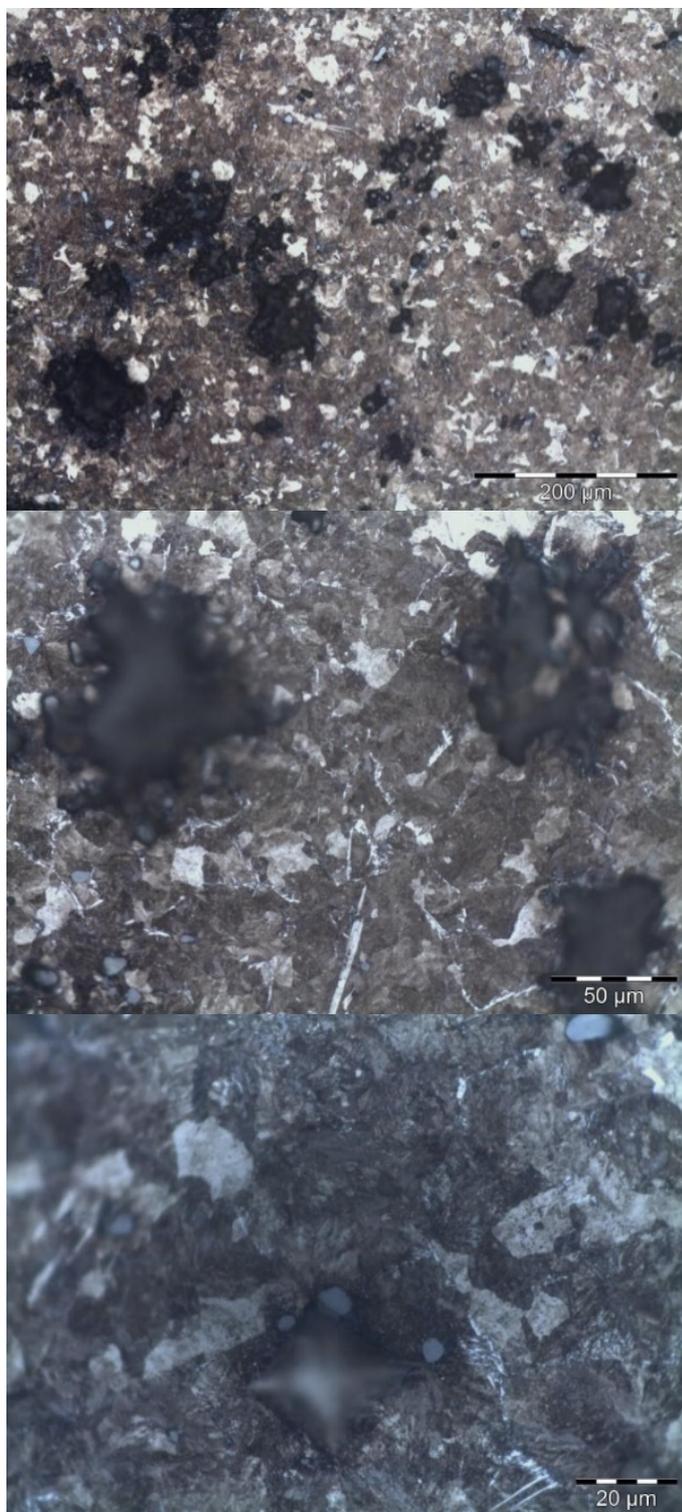


FONTE: Próprio autor.

As figuras da 25 a 26 mostram os resultados das metalografias encontradas nos diferentes tipos de ferro fundidos, após a submissão do tratamento térmico em seus diferentes parâmetros de resfriamentos. Em todas detectou-se a presença da transformação martensítica.

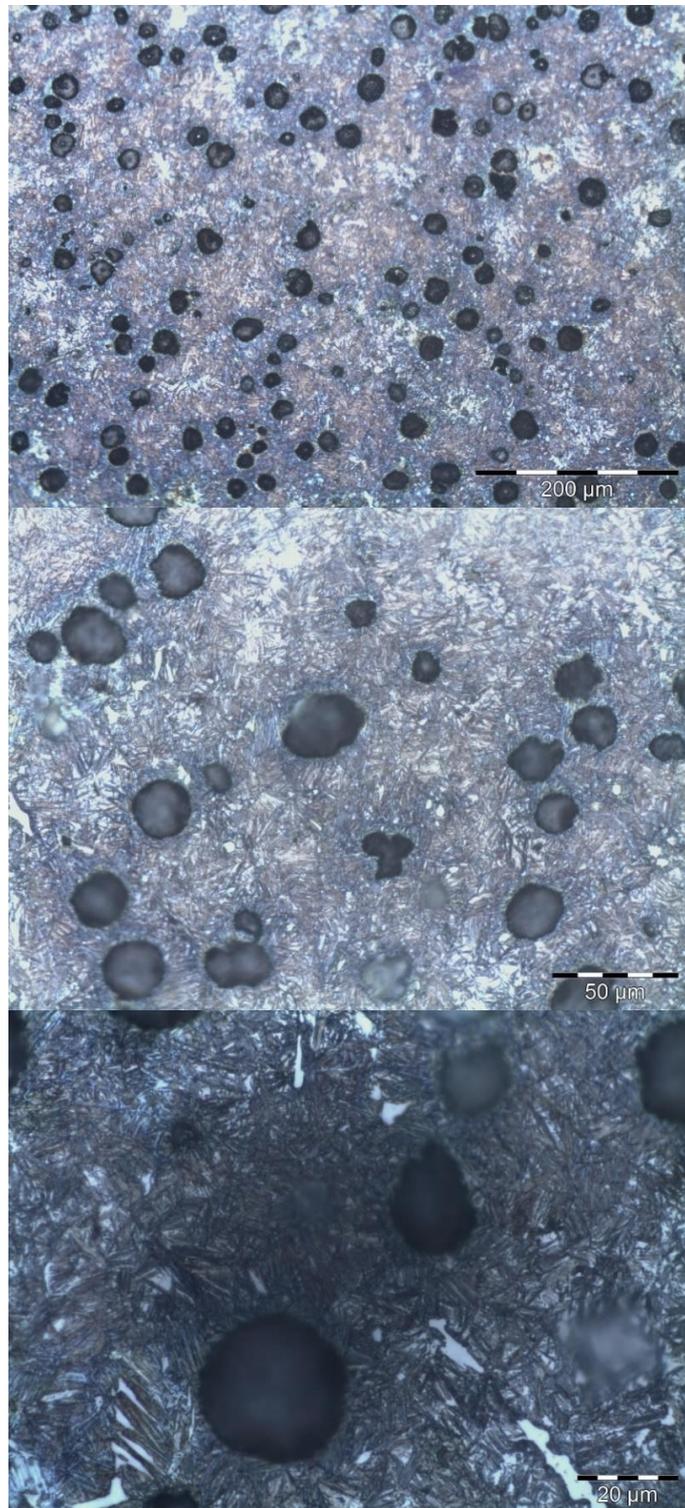
A morfologia da martensita formada é caracterizada como martensita de alto carbono [28]. Em todos os tempos de resfriamento detectou-se a formação de martensita, sendo mais acentuada na amostra resfriada por 9 segundos. A causa do maior volume de martensita de elevado carbono na amostra de 9 segundos associa-se ao fato do maior tempo colaborar para que a transformação martensítica pudesse ocorrer de forma mais acentuada na superfície e núcleo [16];[29].

FIGURA 25 - Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido maleável resfriamento 7s – taque químico com nital 2%.



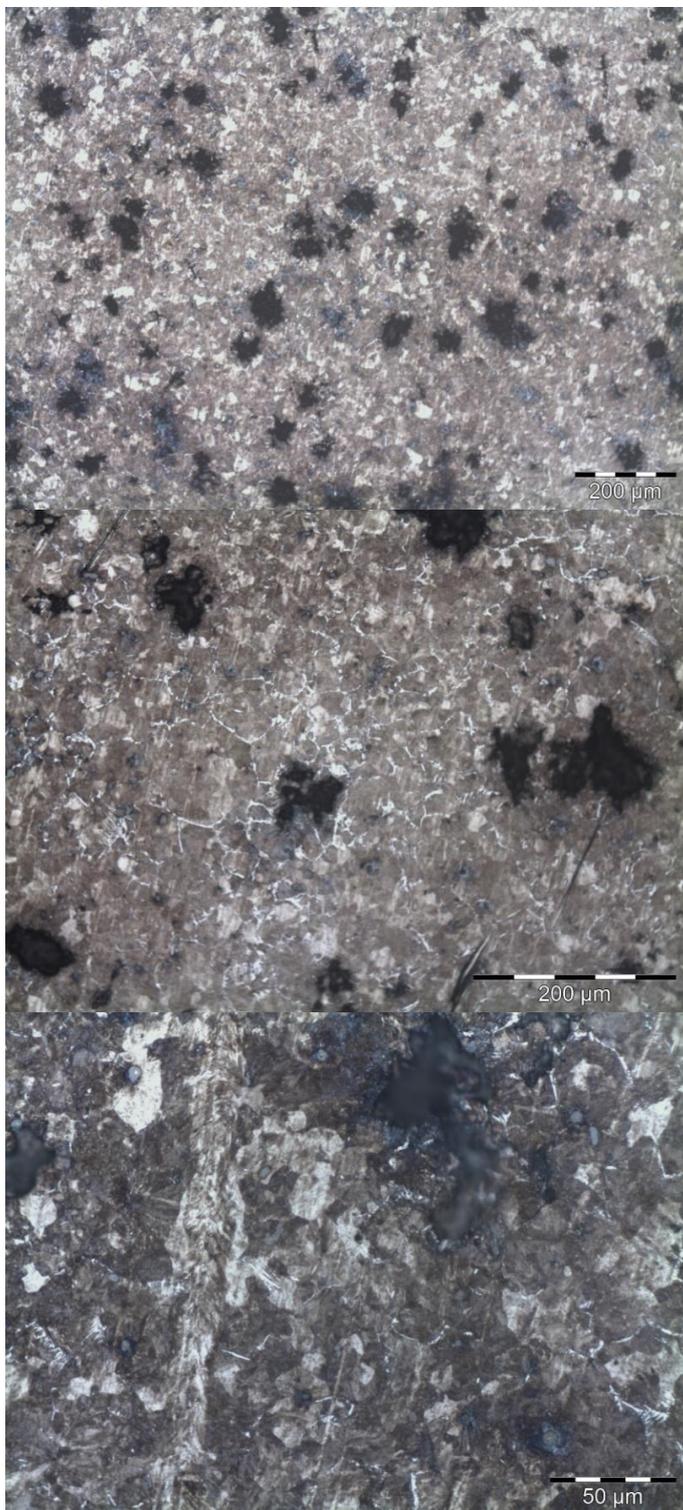
FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 26 - Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido nodular – resfriamento 7s  
– ataque químico com nital 2%.



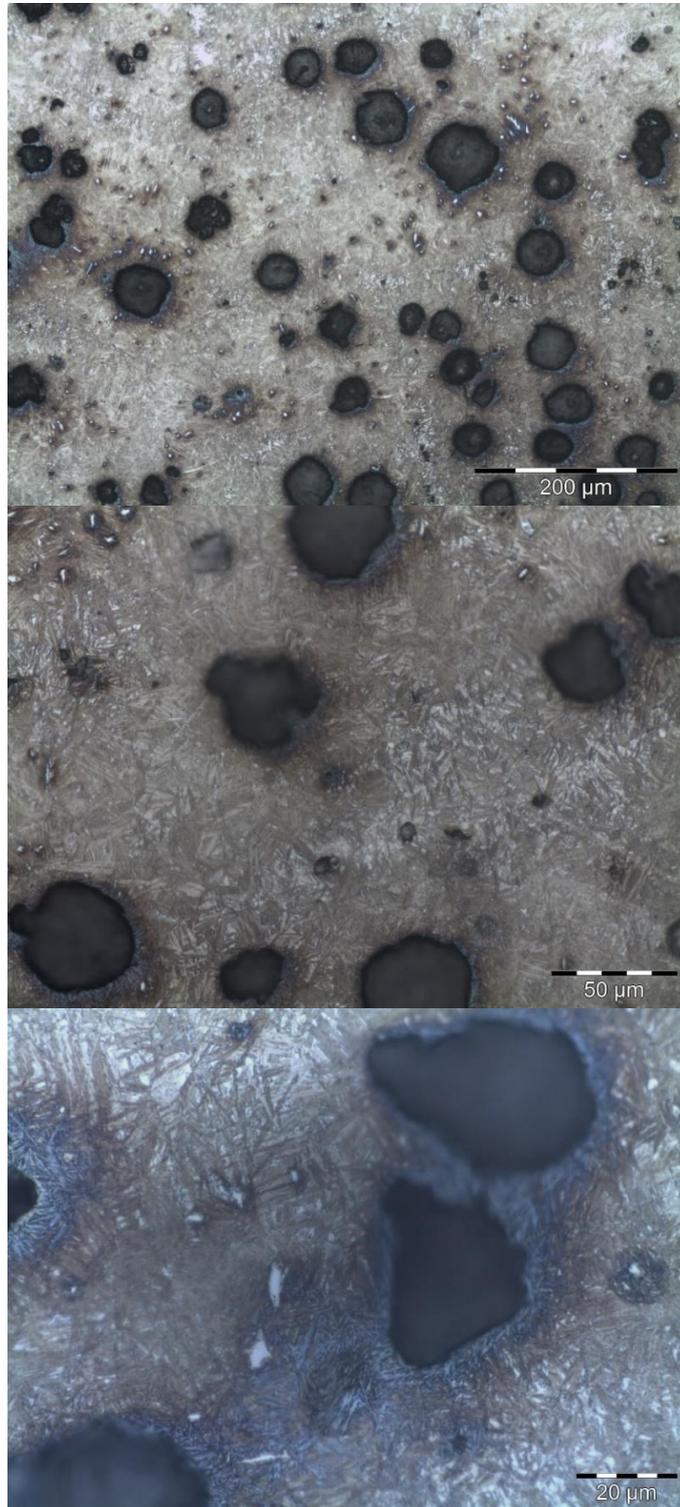
FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 27 - Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido maleável resfriamento 8s – ataque químico com nital 2%



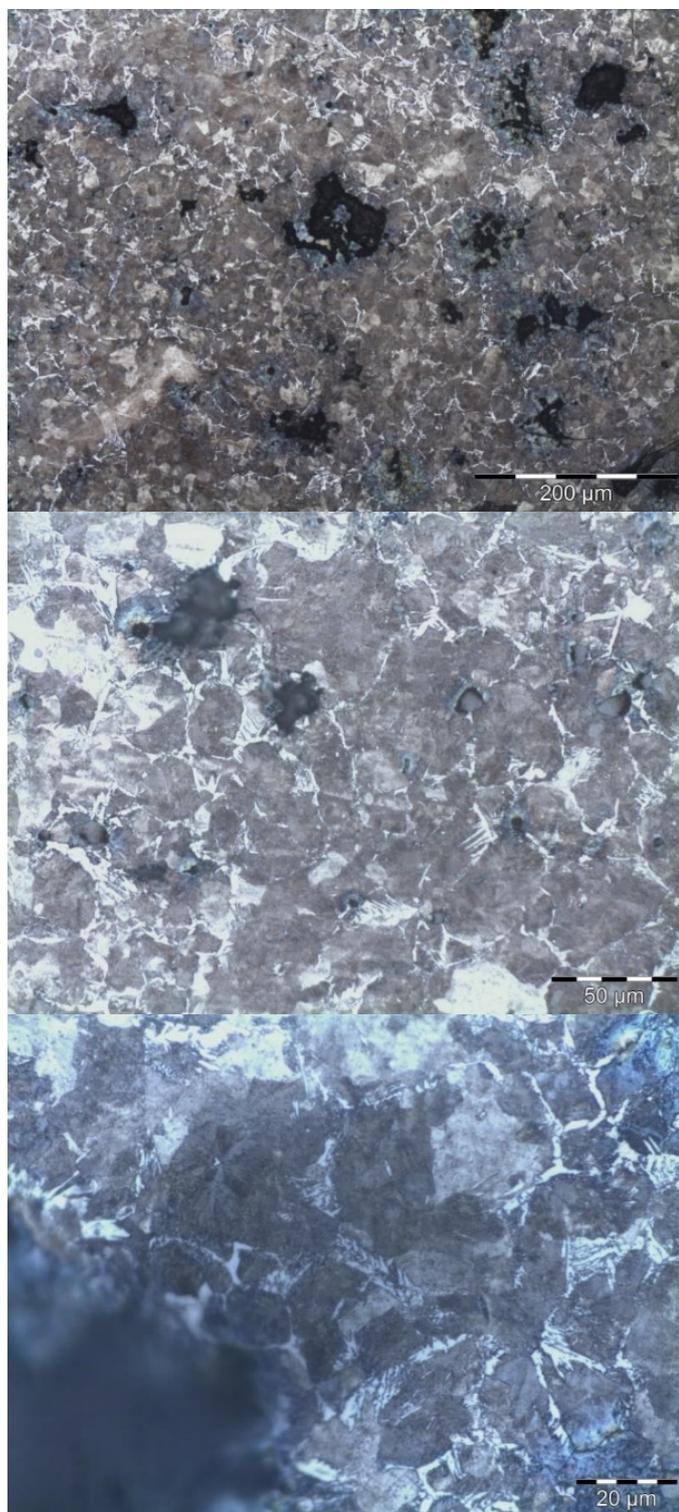
FONTE: Próprio Autor

FIGURA 28- Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido nodular – resfriamento 8s – ataque químico com nital 2%.



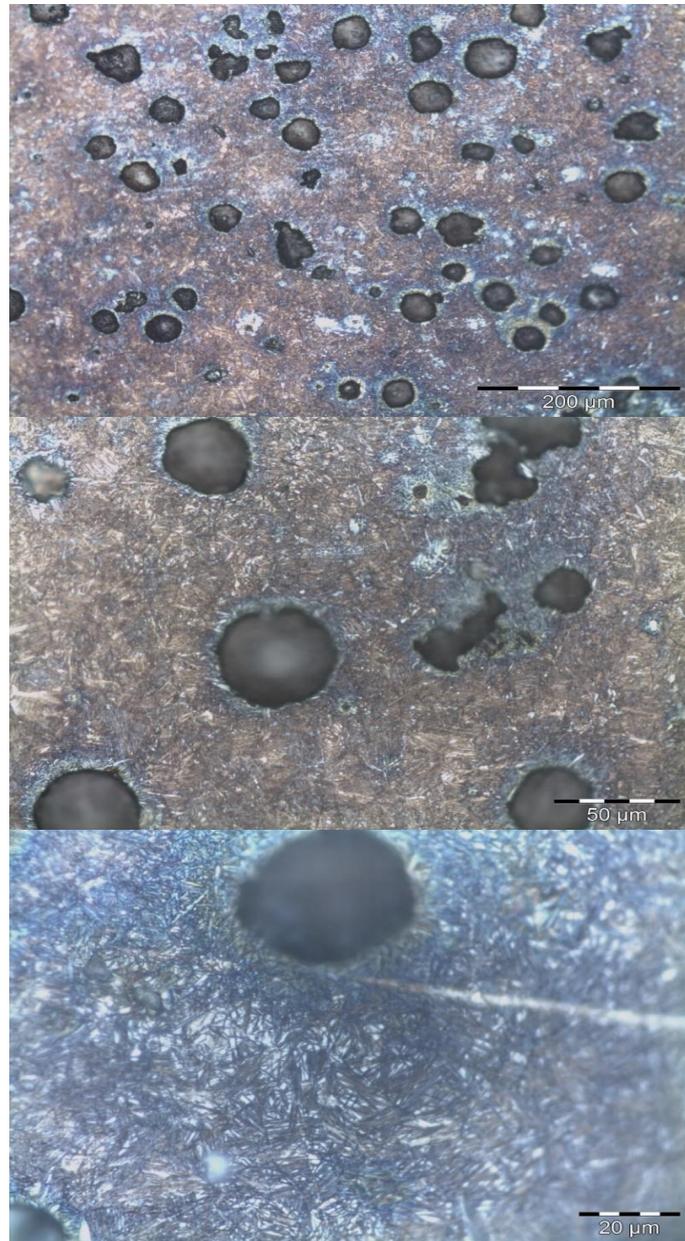
FONTE: Próprio Autor

FIGURA 29 - Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido maleável – resfriamento 9s  
– ataque químico com nital 2%



FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 30 - Resultado da microscopia óptica na amostra de ferro fundido nodular – resfriamento 9s – ataque químico com nital 2%.



FONTE: Próprio Autor.

#### 5.4 Análise Microestrutural Via Microscópio Eletrônico De Varredura – MEV

Foram realizadas imagens das amostras dos tipos de ferro fundido estudados em seus diferentes tempos de resfriamento. As mesmas foram feitas no microscópio eletrônico de varredura do Centro de Microscopia

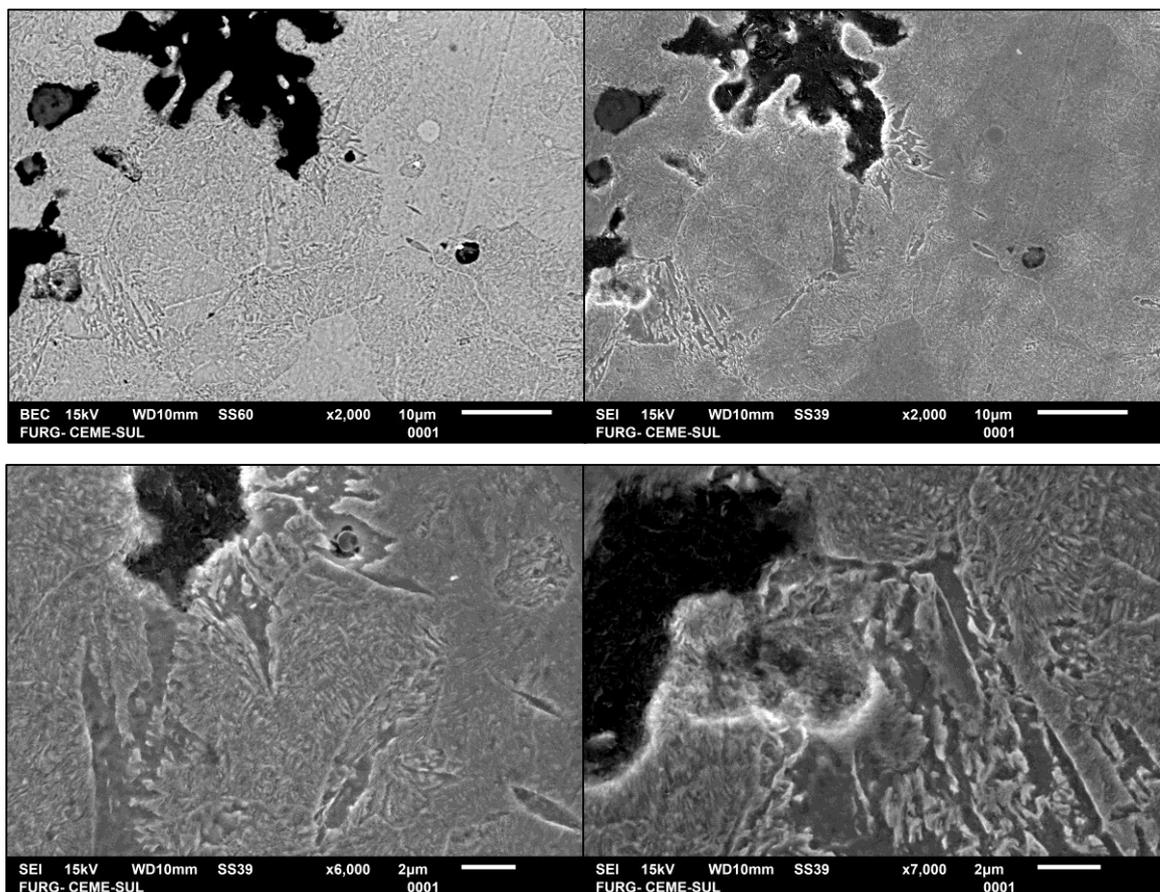
Eletrônica da Zona Sul – CEMESUL da FURG, utilizando detector de elétrons secundários e retro espalhados.

As figuras 31 e 32 mostram os resultados do MEV nas amostras de ferro fundido Maleável e nodular com o tempo de resfriamento de 7 segundos em óleo.

Verificou-se nas a presença de matriz martensítica, presença de perlita e ausência de modificação ou nucleação de microtrincas junto a grafita. A presença de nucleação de microtrincas junto a grafita nos ferros fundidos que não são nodulares associa-se com o formato irregular da mesma propiciando inúmeros sítios de nucleação [19].

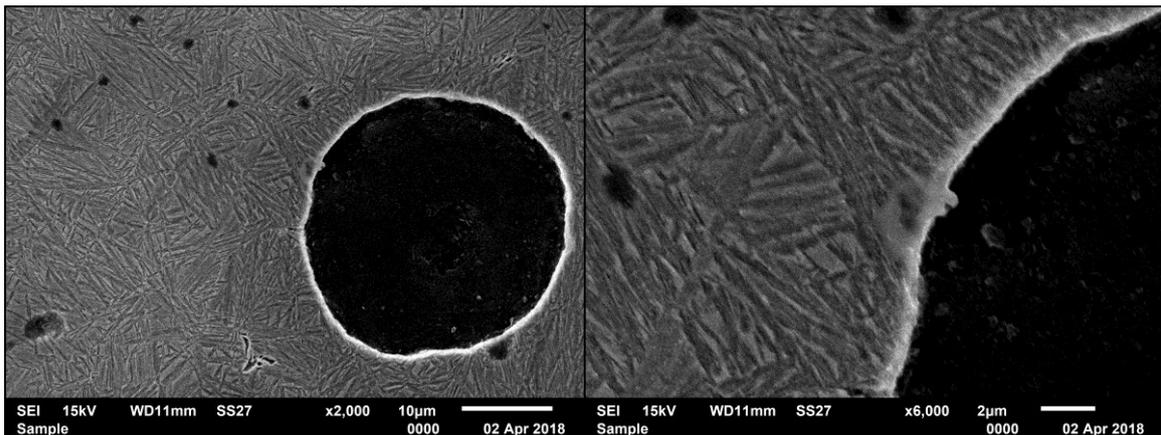
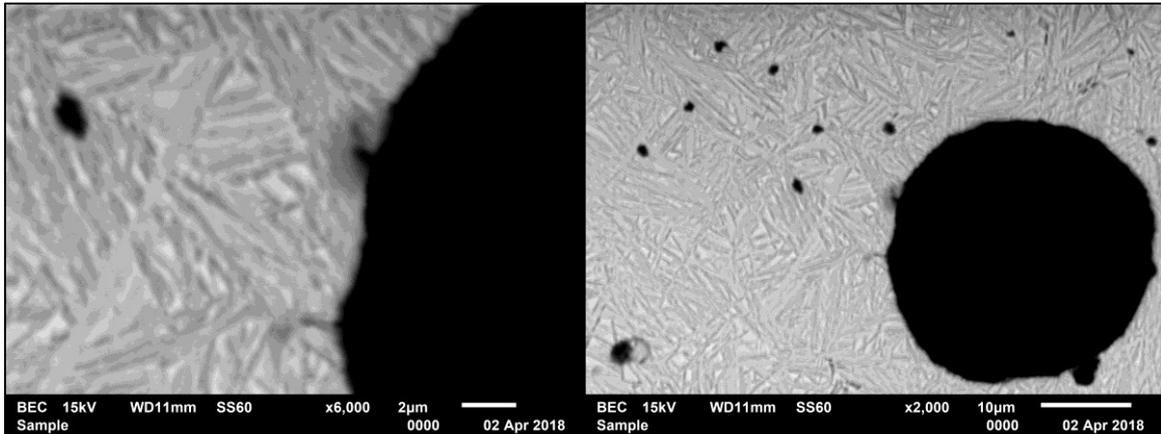
A microestrutura obtida através do tratamento térmico de têmpera interrompida seguida de revenimento, consiste na obtenção de martensita parcial revenida, que podem ser melhor observadas nas figuras a seguir.

FIGURA 31 - Resultado do MEV na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 7 segundos em diferentes aumentos.



FONTE: Próprio Autor.

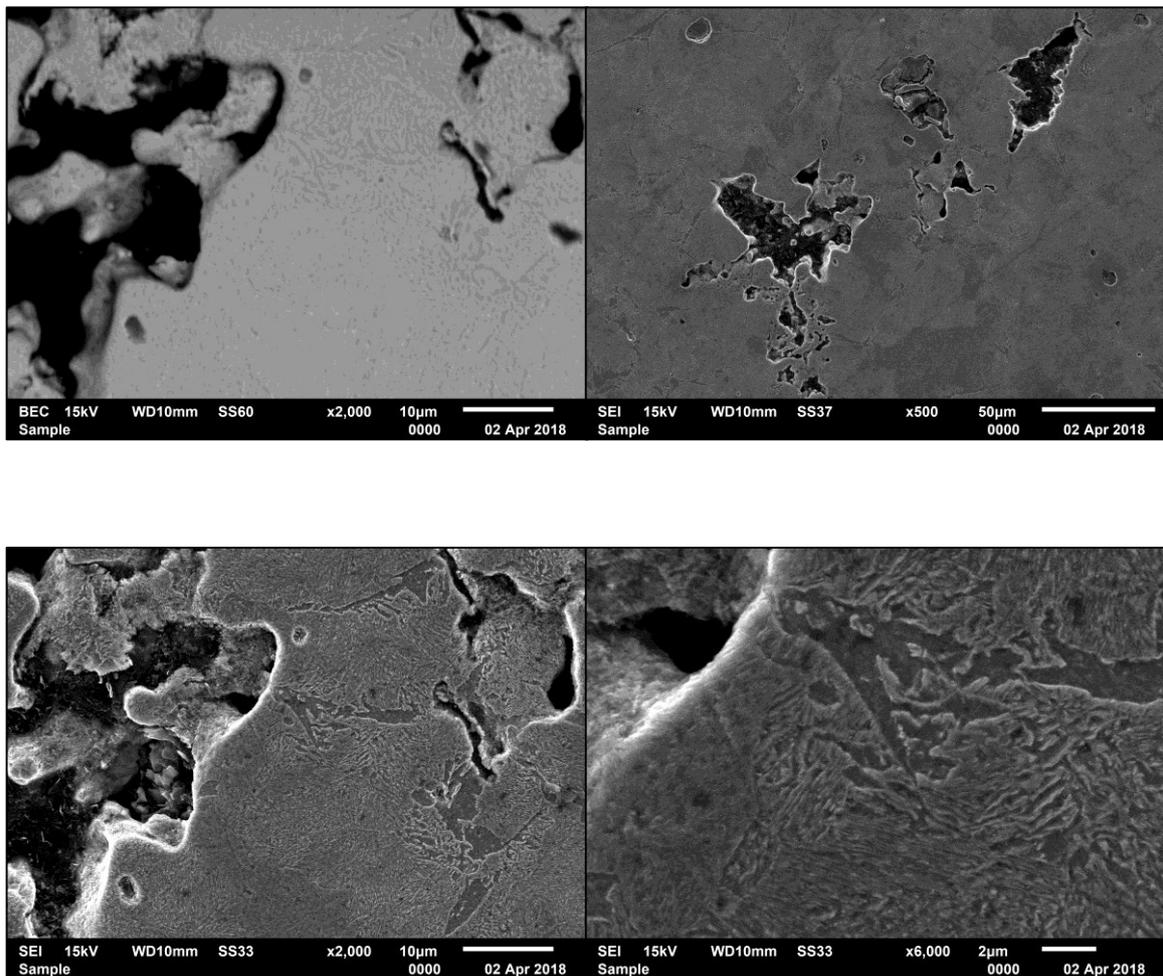
FIGURA 32 - Resultado do MEV na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 7 segundos em diferentes aumentos.



FONTE: Próprio Autor.

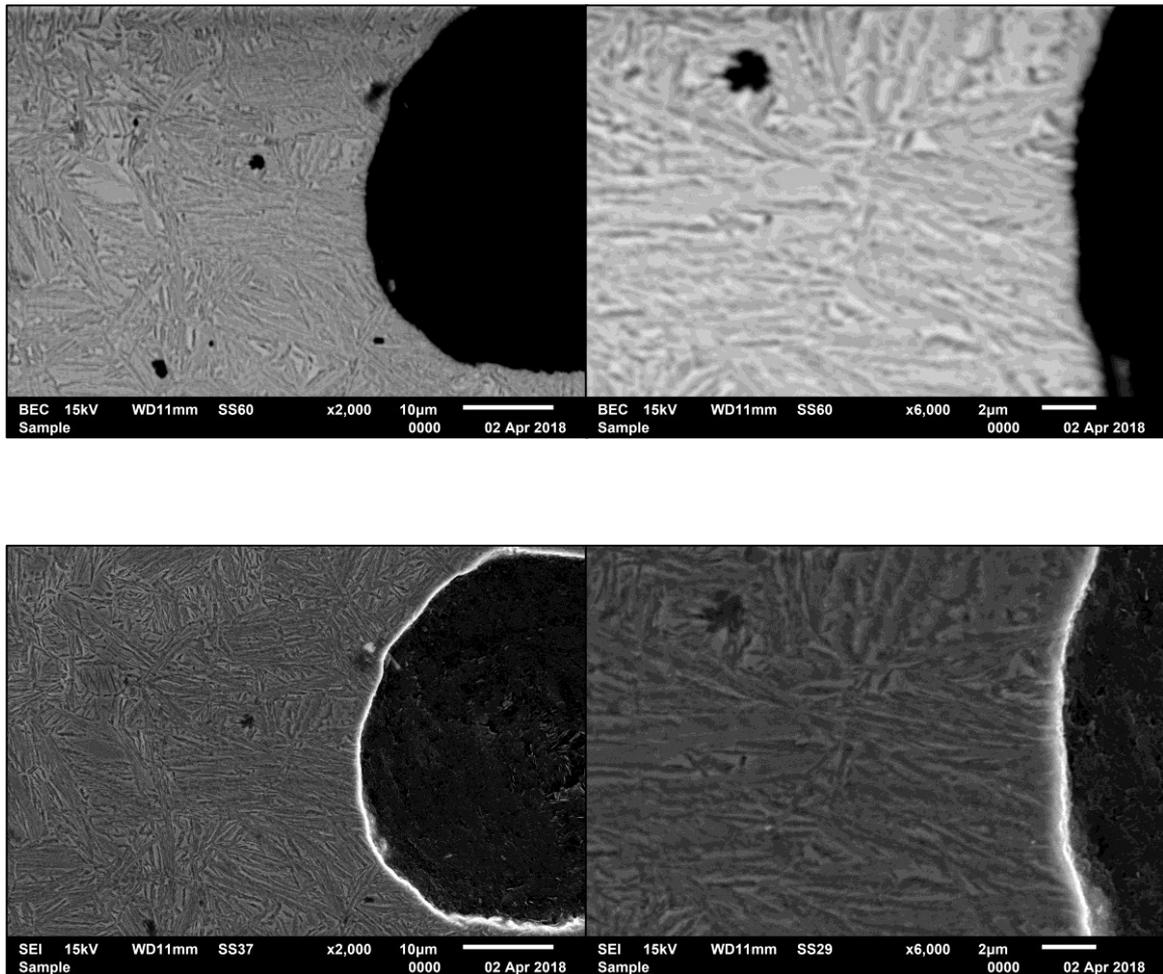
As figuras 33 e 34 mostram o resultado do MEV na amostra de ferro fundido maleável e nodular com o tempo de resfriamento de 8 segundos em óleo. Com o aumento do tempo de resfriamento foi possível observar também a presença mais acentuada de martensita, diminuindo-se o percentual de perlita e sendo possível a visualização de austenita retida[21].

FIGURA 33 - Resultado do MEV na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 8 segundos em diferentes aumentos.



FONTE: Próprio Autor.

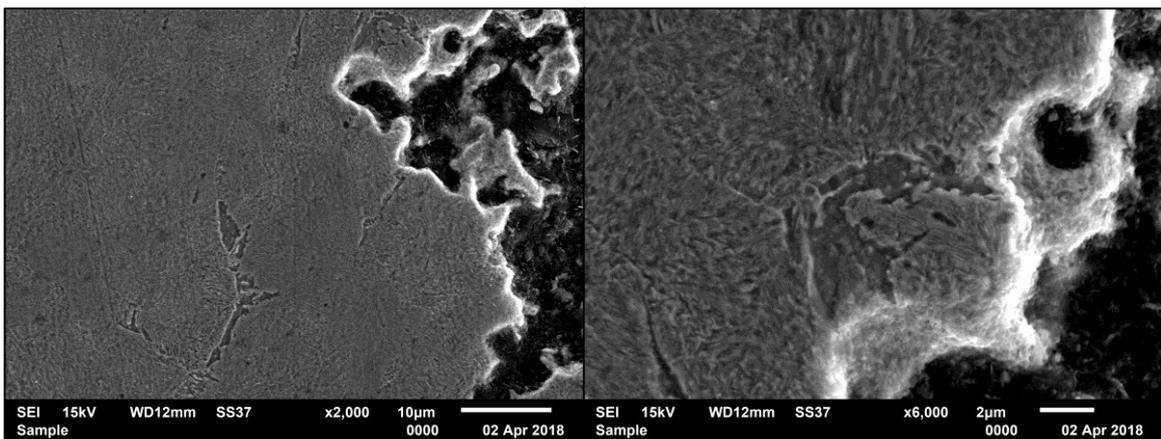
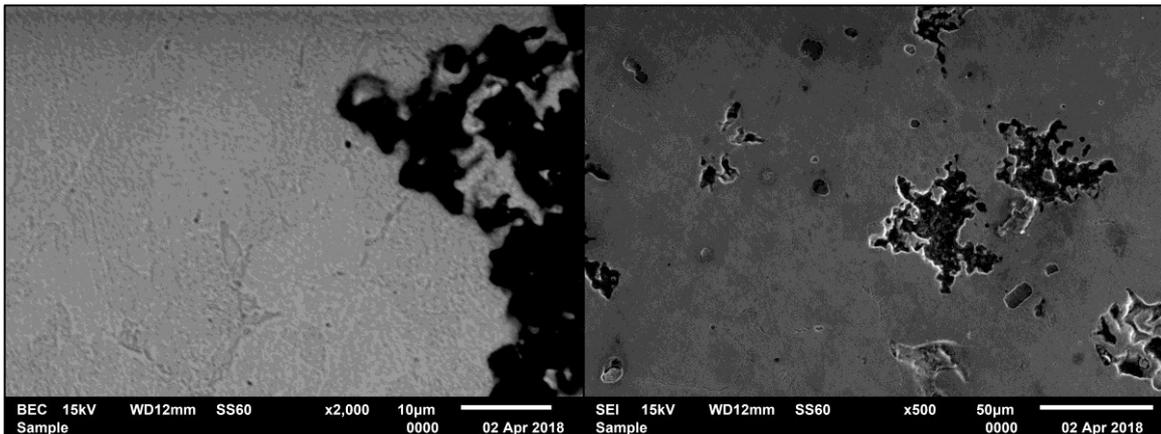
FIGURA 34 - Resultado do MEV na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 8 segundos em diferentes aumentos.



FONTE: Próprio autor.

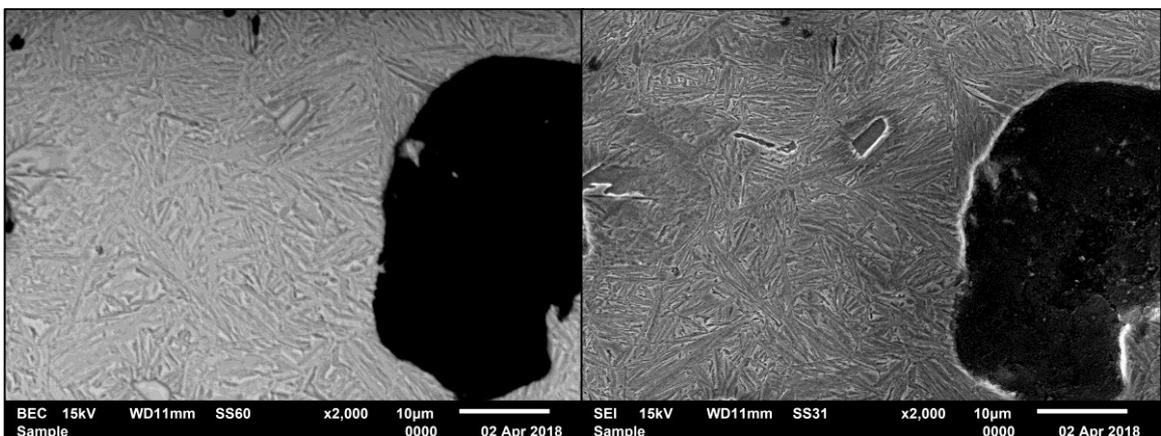
As figuras 35 e 36 mostram o resultado do MEV na amostra de ferro fundido maleável e nodular com o tempo de resfriamento de 9 segundos em óleo. Evidenciou-se o máximo percentual de martensita revenida e inexistência de nucleação de trincas em ambos os ferros fundidos, porém sendo necessárias maiores estudos de nucleação de trincas em ferros fundidos maleáveis com o tipo de tratamento térmico utilizado no estudo.

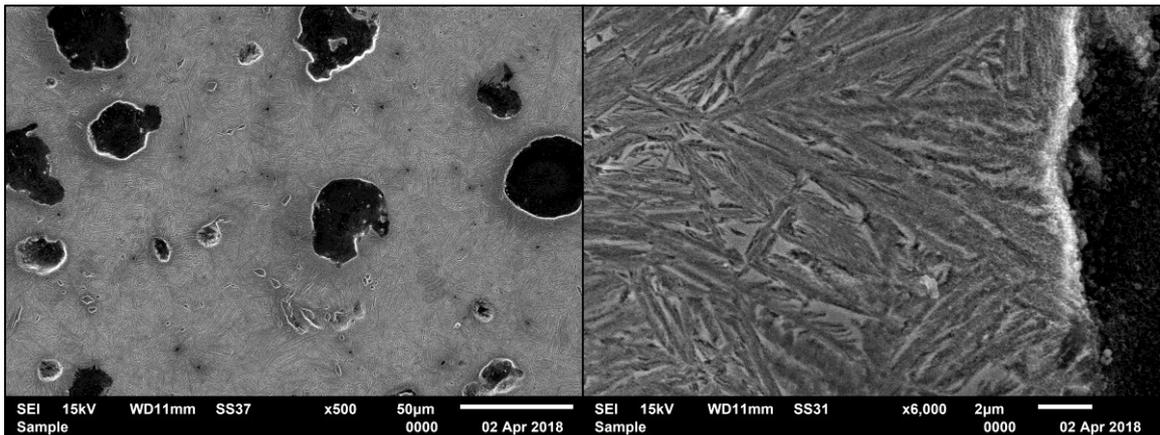
FIGURA 35 - Resultado do MEV na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 9 segundos em diferentes aumentos



FONTE: Próprio Autor.

FIGURA 36 - Resultado do MEV na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 9 segundos em diferentes aumentos.





FONTE: Próprio Autor.

### 5.5 Análise De Espectroscopia De Energia Dispersiva – EDS

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos da composição química das amostras estudadas através do EDS do Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul – CEMESUL da FURG. Todas as análises pontuais demonstraram elementos químicos típicos dos ferros fundidos nodulares e maleáveis. Destaca-se junto à superfície a presença de descarbonetação oriunda do processo de fundição, onde o contato com o ar promoveu a redução seletiva de carbono. Junto a grafita as análises apresentaram comportamento típico de região com teores elevados de carbono, não sendo detectados efeitos deletérios ou picos inadequados.

Os elementos químicos, que foram detectados nos ferros fundidos maleável e nodular nos diferentes parâmetros estudados através de microanálise EDS, são: Fe, Si, Al, O, K, Mn e C, com a predominância de Fe.

FIGURA 37 - Resultado do EDS na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 7 segundos.

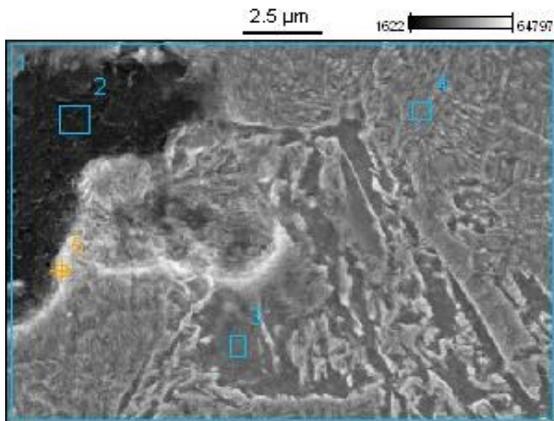
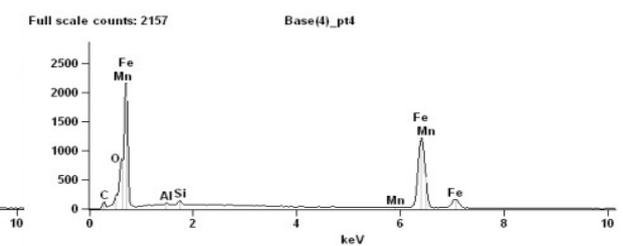
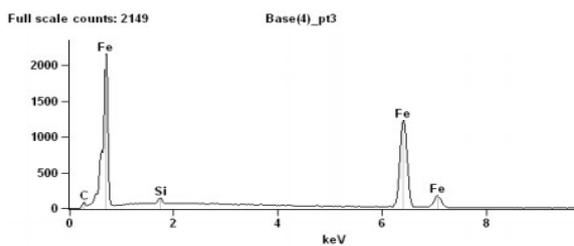
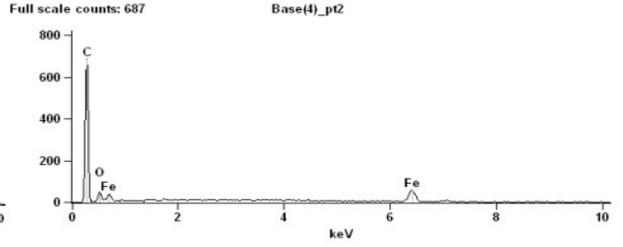
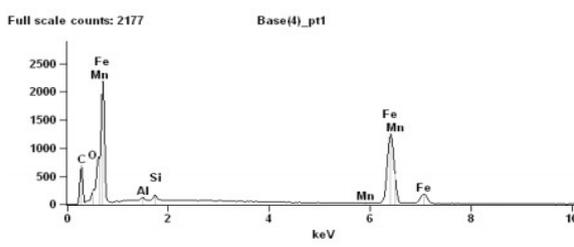


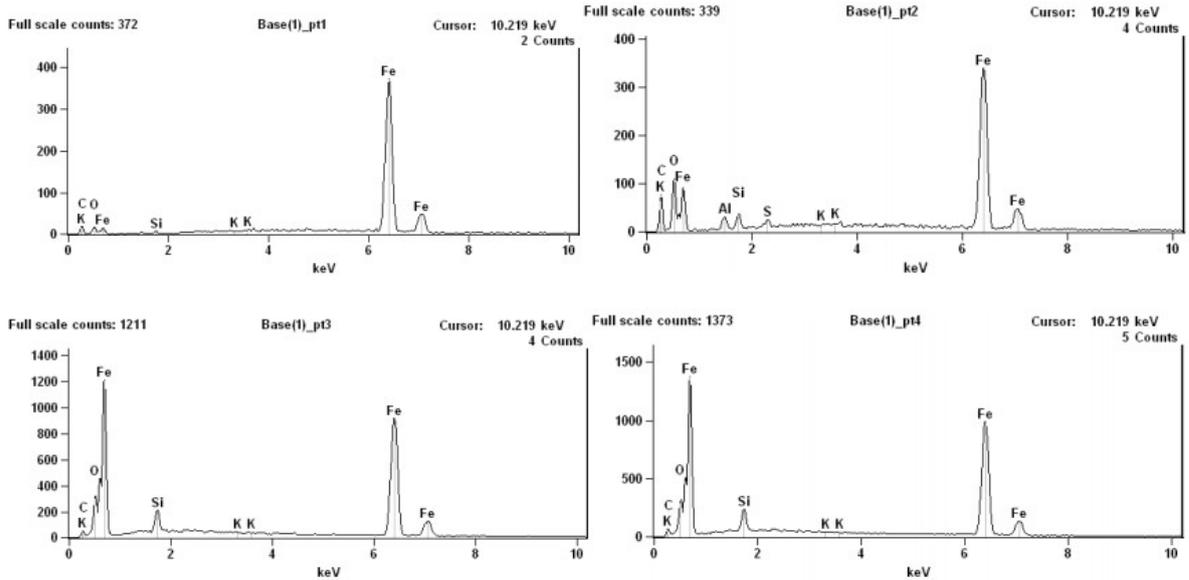
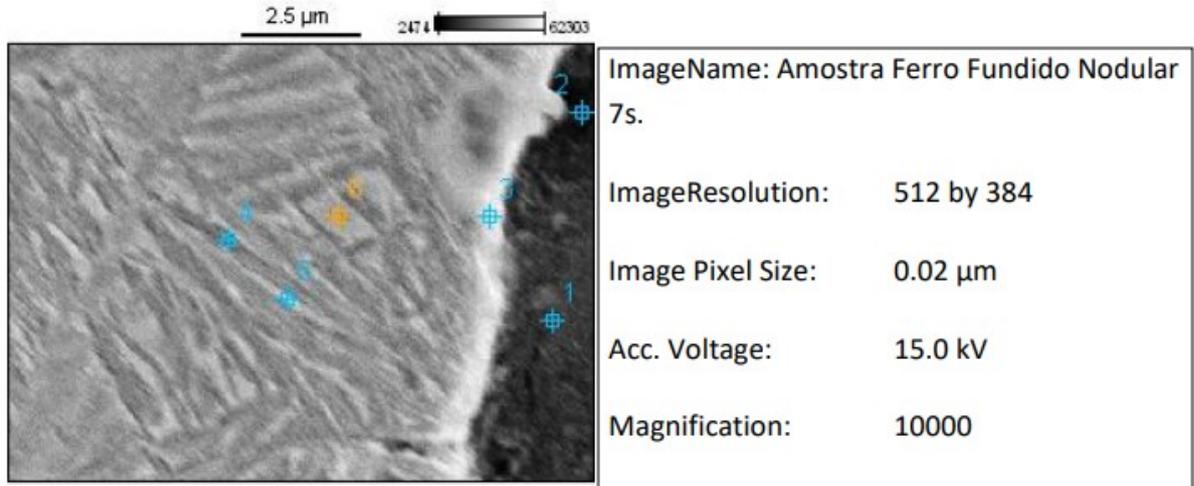
Image Name: Amostra Ferro Fundido Maleável 7s  
 Image Resolution: 512 by 384  
 Image Pixel Size: 0.03 μm  
 Acc. Voltage: 15.0 kV  
 Magnification: 7000



Weight %	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Mn-K	Fe-K
Base(4)_pt1	9.67	1.57	0.45	0.80	0.18	87.33
Base(4)_pt2	54.15	11.01				34.83
Base(4)_pt3	1.28			0.98		97.74
Base(4)_pt4	1.78	0.87	0.42	0.86	0.56	95.51
Base(4)_pt5	46.95	4.52	0.58	0.64		47.32

FONTE: Próprio autor.

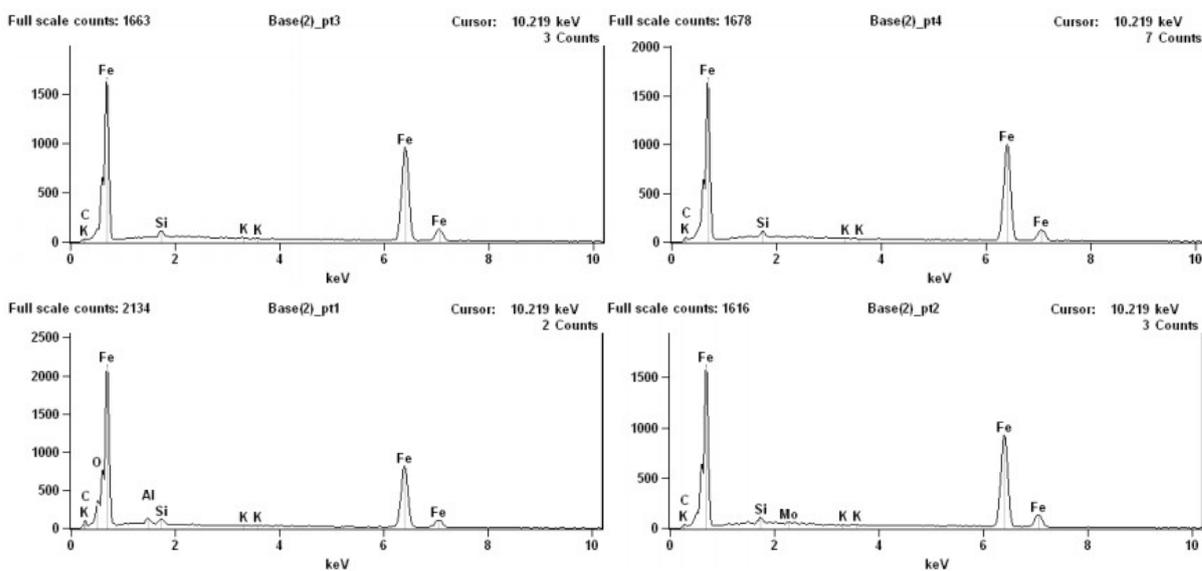
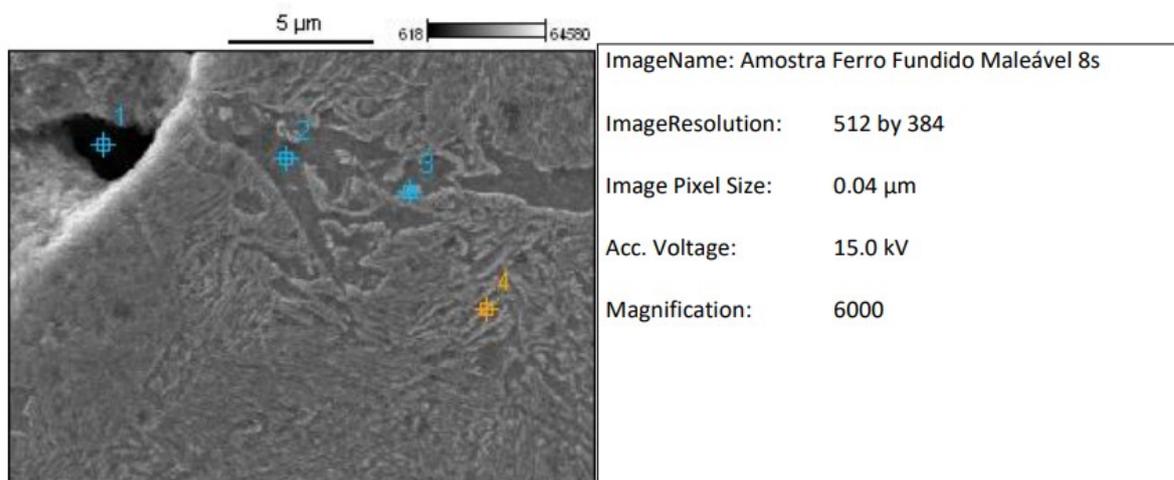
FIGURA 38 – Resultado do EDS na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 7 segundos.



	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Fe-K
Base(1)_pt1	1.39	0.78		0.21		0.06	97.56
Base(1)_pt2	4.11	4.16	1.21	1.15	0.53	0.00	88.83
Base(1)_pt3	0.86	3.62		2.61		0.10	92.81
Base(1)_pt4	1.19	3.27		2.91		0.00	92.63
Base(1)_pt5	1.29	3.16		2.83		0.20	92.52
Base(1)_pt6	1.20	3.03		2.80		0.02	92.96

Fonte: Próprio Autor

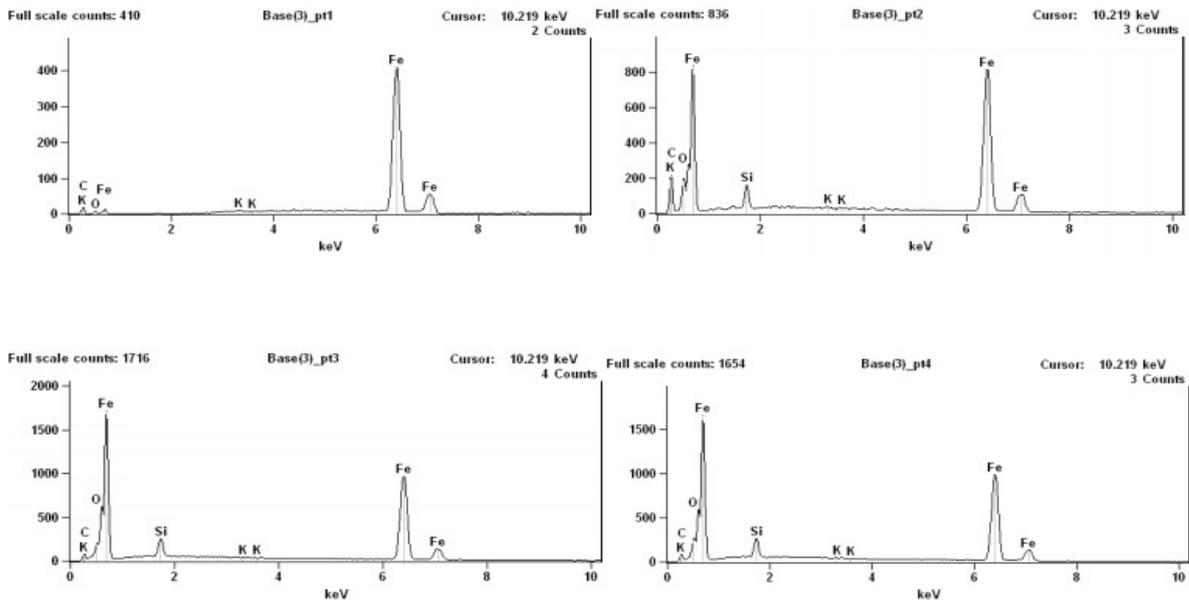
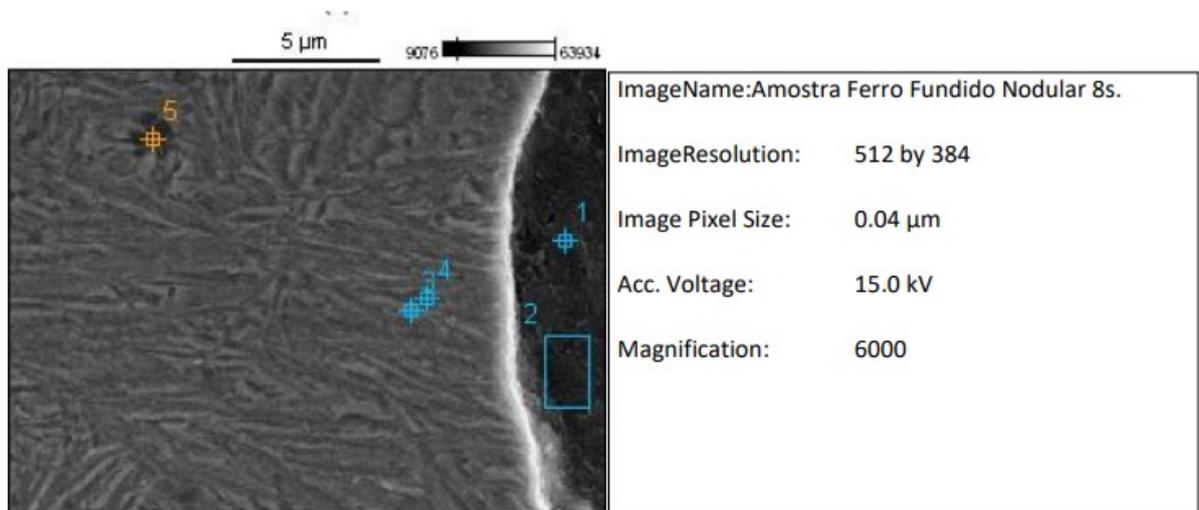
FIGURA 39 - Resultado do EDS na mostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 8 segundos.



	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Fe-K	Mo-L
Base(2)_pt1	1.97	3.70	1.37	1.41	0.04	91.51	
Base(2)_pt2	0.76			1.19	0.09	97.57	0.39
Base(2)_pt3	0.65			1.03	0.11	98.21	
Base(2)_pt4	0.89			0.95	0.00	98.16	

FONTE: Próprio Autor.

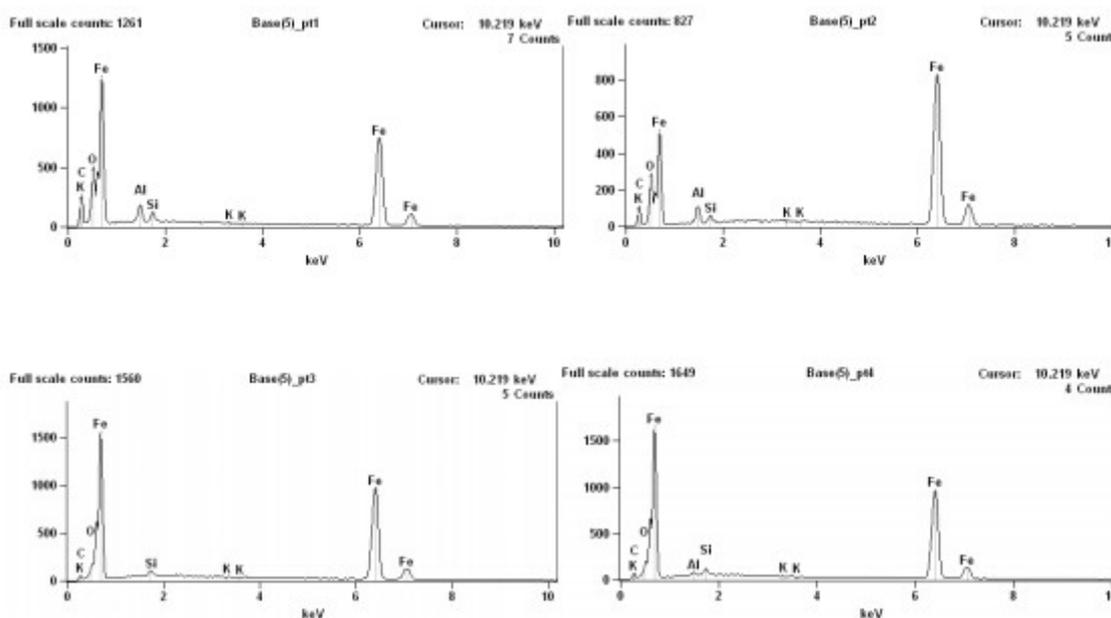
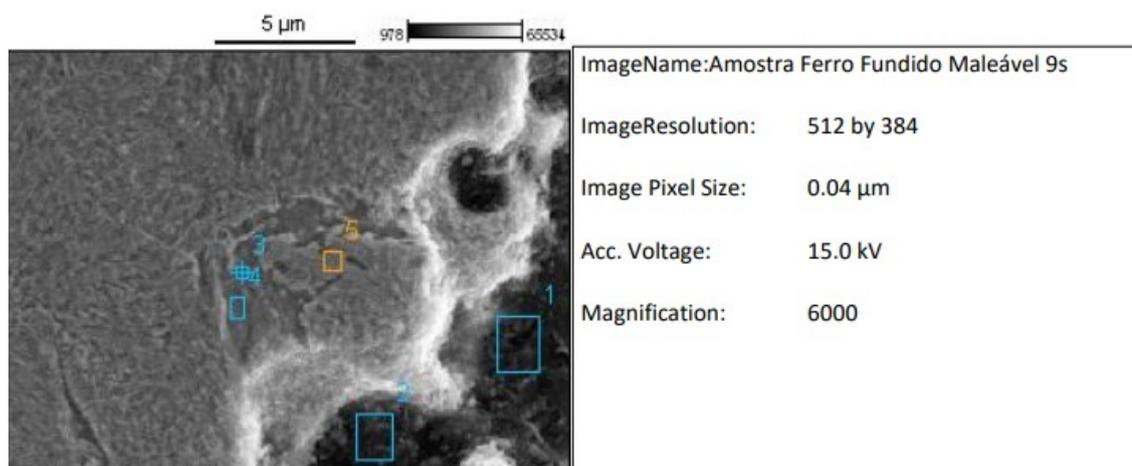
FIGURA 40 - Resultado do EDS na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 8 segundos.



	C-K	O-K	Si-K	K-K	Fe-K
Base(3)_pt1	0.84	0.20		0.23	98.72
Base(3)_pt2	5.27	2.56	2.06	0.19	89.93
Base(3)_pt3	1.26	1.33	2.85	0.00	94.56
Base(3)_pt4	1.72	2.35	3.06	0.12	92.75

FONTE: Próprio Autor.

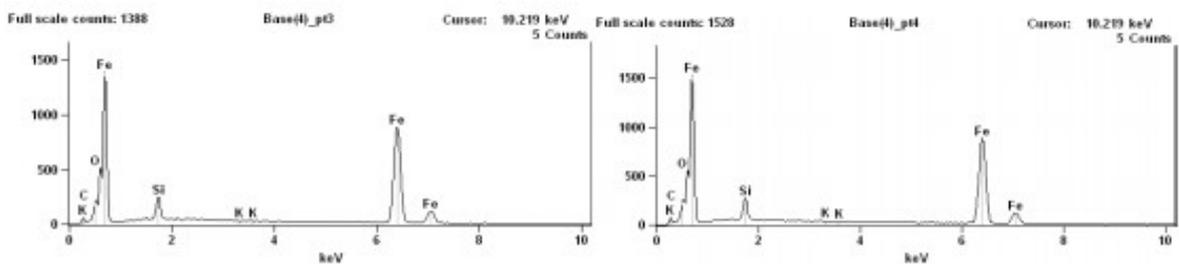
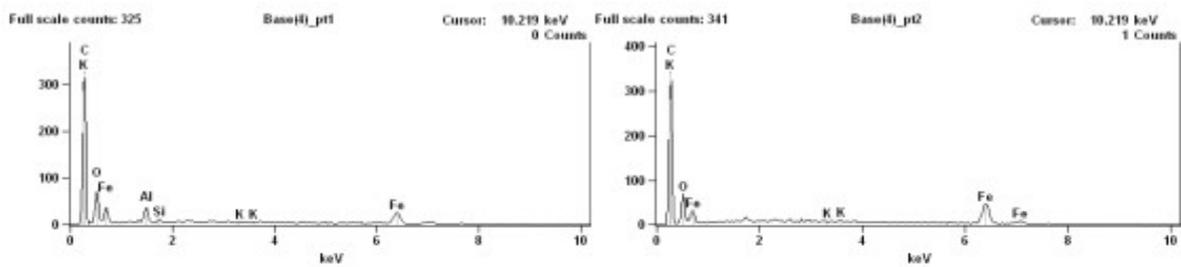
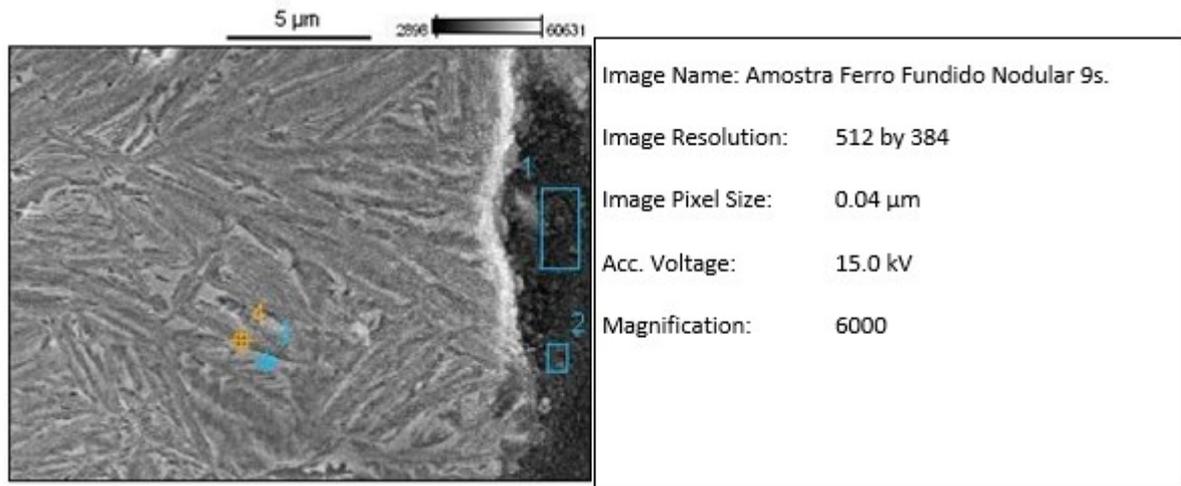
FIGURA 41 - Resultado do EDS na amostra de ferro fundido maleável com tempo de resfriamento de 9 segundos.



	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Fe-K
Base(5)_pt1	6.07	7.10	2.45	1.29	0.06	83.03
Base(5)_pt2	2.40	3.67	1.51	0.61	0.00	91.81
Base(5)_pt3	0.91	1.26		0.95	0.00	96.88
Base(5)_pt4	1.24	1.41	0.33	0.94	0.00	96.08

FONTE: Próprio autor

FIGURA 42 - Resultado do EDS na amostra de ferro fundido nodular com tempo de resfriamento de 9 segundos.



	C-K	O-K	Al-K	Si-K	K-K	Fe-K
Base(4)_pt1	45.03	22.36	3.19	0.78	0.00	28.64
Base(4)_pt2	40.68	16.80			0.16	42.36
Base(4)_pt3	1.06	1.91		3.05	0.00	93.98
Base(4)_pt4	1.47	2.74		3.30	0.00	92.49

FONTE: Elaborado pelo autor.

Constatou-se que o Fe se encontra de forma homogênea distribuída pela martensita e austenita retida oriundas do processo de têmpera interrompida, já o C se concentra com maiores percentuais nos nódulos e nas rosetas de grafita como esperado e em menores teores sobre a matriz, martensita e austenita retida. Já os teores de Al, K, Mn, O e Si estão distribuídos homogeneamente em toda a matriz [26].

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões sobre a têmpera interrompida e adequação térmica dos ferros fundidos, pode-se concluir que:

- As amostras de ferro fundido nodular e maleável apresentam composição química dentro das especificações para estes materiais;
- Não foram detectadas anisotropias ou morfologia inadequada da grafita em ambos os ferros fundidos. Porém detectou-se descarbonetação superficial em ambos os materiais;
- As microdurezas originais dos ferros fundidos encontraram-se dentro do especificado na literatura para estas classes de ferros fundidos.
- Houve aumento da microdureza e conseqüentemente da resistência mecânica dos ferros fundidos analisadas. Esta foi mais acentuada nas amostras de ferros fundidos nodulares. Apesar de não serem detectadas trincas nucleadas nas amostras novos estudos devem ser realizados para a confirmação do efeito da transformação martensítica e possível fragilização destes materiais.
- A transformação martensítica foi evidenciada nas amostras, mesmo com o resfriamento na região intermediária entre o início e o final da transformação martensítica;
- Não houve mudanças morfológicas nas grafitas de ambas as amostras de ferros fundidos. As células eutéicas apresentaram-se de forma homogênea em ambos os ferros fundidos,
- O meio de resfriamento e as taxas utilizadas demonstraram ser adequada a realização do tratamento térmico de têmpera interrompida nos materiais estudados. O pós-aquecimento aplicado posteriormente contribuiu para melhor homogeneização das microdurezas e melhora da tenacidade final dos materiais estudados.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Ampliar as taxas de resfriamento e correlacioná-las com as propriedades mecânicas;
- Verificar as tensões residuais geradas neste processo;
- Estudar o comportamento da têmpera interrompida em ferros fundidos cinzentos;
- Desenvolver procedimentos aplicados ao resfriamento de ferros fundidos em polímeros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Balachandran, Aravind Vadiraj, M. Kamaraj, Ekusa Kazuya **Mechanical and wear behavior of alloyed gray cast iron in the quenched and tempered and austempered conditions**. *Materials & Design*, Volume 32, Issue 7, August 2011, Pages 4042-4049 DOI: 10.1016/j.matdes.2011.03.054
- [2] André Caetano Melado, Arthur Seiji Nishikawa, Hélio Goldenstein, Michael A. Giles, Philippa A. S. Reed **Effect of microstructure on fatigue behaviour of advanced high strength ductile cast iron produced by quenching and partitioning process**. *International Journal of Fatigue*, Volume 104, November 2017, Pages 397-407 DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.07.009
- [3] Souza, Tânia Nogueira Fonseca, Nogueira, Rogéria Alves Perilo Sousa, Franco, Francis José Saldanha, Aguilár, Maria Teresa Paulino, & Cetlin, Paulo Roberto. Mechanical and microstructural characterization of Nodular Cast Iron (NCI) with Niobium Additions. **Materials Research**, 2014. 17(5), 1167-1172. <https://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.249413>
- [4] Junjun Cui, Liqing Chen **Microstructure and abrasive wear resistance of an alloyed ductile iron subjected to deep cryogenic and austempering treatments**. *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 33, Issue 12, December 2017, Pages 1549-1554 DOI: 10.1016/j.jmst.2017.08.003
- [5] Spinola, Thiago Sartorello, & Spinelli, José Eduardo. Transient Directional Solidification of Cast Iron: Microstructure Formation, Columnar to Equiaxed Transition and Hardness. **Materials Research**, 2016. 19(4), 795-801. Epub May 31, 2016. <https://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0777>
- [6] Aravind Vadiraj, G. Balachandran, M. Kamaraj, Ekusa Kazuya **Mechanical and wear behavior of quenched and tempered alloyed hypereutectic gray cast iron**. *Materials & Design*, Volume 32, Issue 4, April 2011, Pages 2438-2443 DOI: 10.1016/j.matdes.2010.11.052
- [7] F. Mocellin, E. Melleras and W. L. Guesser, Study of the Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering** January-March 2004, Vol. 26, No. 1. p. 22-27.
- [8] D. I. Pedro, R. C. Dommarco **Rolling contact fatigue resistance of Carbide Austempered Ductile Iron (CADI)**. *Wear*, Volumes 418–419, 15 January 2019, Pages 94-101 DOI: 10.1016/j.wear.2018.11.005
- [9] Nishikawa, A. S., Miyamoto, G., Furuhashi, T., Tschiptschin, A. P., Goldenstein, H. **Phase transformation mechanisms during Quenching and Partitioning of a ductile cast iron**. *Acta Materialia*, In press, journal pre-proof, Available online 7 August 2019 DOI: 10.1016/j.actamat.2019.08.001
- [10] Silva, A. J. S. T. **Tratamento Térmico de Têmpera e Partição em Ferros Fundidos Nodulares**. 125 f. Dissertação. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

- [11] Junior, E.C.A. **Caracterização de ferro fundido nodular obtido por fundição contínua**. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2003.
- [12] Novikov, I. **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**, Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1994.
- [13] Chiaverini, V. **Aços e ferros fundidos**, 7<sup>a</sup> edição, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2002.
- [14] M. Soliman, A. Nofal, H. Palkowski **Alloy and process design of thermo-mechanically processed multiphase ductile iron**. *Materials & Design*, Volume 87, 15 December 2015, Pages 450-465 DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.159
- [15] Ali M Rashidi, M Moshrefi-Torbati **Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure (DMS)**. *Materials Letters*, Volume 45, Issues 3–4, September 2000, Pages 203-207 DOI: 10.1016/S0167-577X(00)00105-1
- [16] G. Krauss **5: Tempering of martensite in carbon steels**. Capítulo do Livro. *Phase Transformations in Steels*, 2012, Pages 126-150 DOI: 10.1533/9780857096111.1.126
- [17] Yusuf Kayali, YılmazYalçın **The effects of boro-tempering heat treatment on microstructural properties of ductile iron**. *Materials & Design*, Volume 32, Issue 3, March 2011, Pages 1414-1419 DOI: 10.1016/j.matdes.2010.09.005
- [18] A. S. M. A Haseeb, Md. Aminul Islam, Md. Mohar Ali Bepari **Tribological behaviour of quenched and tempered, and austempered ductile iron at the same hardness level**. *Wear*, Volume 244, Issues 1–2, 20 August 2000, Pages 15-19 DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00404-X
- [19] Wang, B., Barber, G. C., Tao, C., Sun, X., Ran, X. **Characteristics of tempering response of austempered ductile iron**. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 7, Issue 2, April–June 2018, Pages 198-202 DOI: 10.1016/j.jmrt.2017.08.011
- [20] Bingxu Wang, Minsheng He, Gary C. Barber, J. David Schall, Xichen Sun **Rolling contact fatigue resistance of austempered ductile iron processed at various austempering holding times**. *Wear*, Volumes 398–399, 15 March 2018, Pages 41-46 DOI: 10.1016/j.wear.2017.11.022
- [21] Diego O. Fernandez, Juan M. Massone, Roberto E. Boeri **Characterization of the austemperability of partially austenitized ductile iron**. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 10, October 2013, Pages 1801-1809 DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.05.002
- [22] J. R. Dueñas, W. Hormaza, G. M. Castro Güiza **Abrasion resistance and toughness of a ductile iron produced by two molding processes with a short austempering**. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 8, Issue 3, May–June 2019, Pages 2605-2612 DOI: /10.1016/j.jmrt.2019.02.014
- [23] Fontanari, V., Benedetti, M., Girardi, C., Giordanino, L. **Investigation of the lubricated wear behavior of ductile cast iron and quenched and tempered alloy steel for possible use in worm gearing** *Wear*, Volumes 350–351, 15 March 2016, Pages 68-73 DOI: 10.1016/j.wear.2016.01.006

- [24] Kadir Kocatepe, Melika Cerah, Mehmet Erdogan **The tensile fracture behaviour of intercritically annealed and quenched+tempered ferritic ductile iron with dual matrix structure**. *Materials & Design*, Volume 28, Issue 1, 2007, Pages 172-181 DOI: 10.1016/j.matdes.2005.04.012
- [25] Santos, Adalberto Bierrenbach de Souza. Efeitos Da Composição Química Na Produção De Ferro Fundido Nodulares. **55º Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM**, 16 a 20 de Julho de 2000, Rio de Janeiro (RJ).
- [26] Karsay, S. I., - Selecting chemical composition, Ductile iron production practices. Des Plaines, **American Foundrymen’s Society**, p. 77-101, 1975.
- [27] Mchardy, W. J., Wilson, M. J. And Tait, J.M. **Electron microscope and X-ray diffraction studies of filamentous illitic clay from sandstones of the Magnus Field**. *Clay Mineral*, USA, 1982, 17 23–39.
- [28] Marmontel, C. F. F.; Silva, J. M. G. G.; Oliveira, L. L.; Polioni, M. C. **Análise Metalografia de Metais**. Arte e Ciência; 2011.
- [29] Macedo, R.J. **Análise comportamental do ferro fundido nodular submetido ao tratamento térmico de têmpera e partição**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 2018.