

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG  
ESCOLA DE ENGENHARIA**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPMec**

**TÊMPERA INTERROMPIDA EM FERROS FUNDIDOS  
NODULARES E FERROS FUNDIDOS MALEÁVEIS**

**ANGELO ORES BONAMIGO**

**Rio Grande  
2020**

**ANGELO ORES BONAMIGO**

**TÊMPERA INTERROMPIDA EM FERROS FUNDIDOS NODULARES E  
FERROS FUNDIDOS MALEÁVEIS**

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

**Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Braz de Medeiros.**

**Rio Grande**

**2020**

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros  
Universidade Federal do Rio Grande - FURG

---

Prof. Dr. Luciano V. Biehl  
Universidade Federal do Rio Grande - FURG

---

Prof. Dr. Alex Fabiano Bueno  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Amantino Bonamigo e Leda Bonamigo, que estão sempre ao meu lado, apoiando e aconselhando.

Ao meu orientador, Professor Doutor Jorge Braz, pela amizade, apoio, orientação e confiança na realização deste trabalho.

Aos amigos que sempre estiveram ajudando, sendo direta ou indiretamente, ao longo de todo o curso.

Aos colegas e técnicos que contribuíram para a realização desta dissertação.

## RESUMO

Neste trabalho foi realizado o desenvolvimento do tratamento térmico de têmpera interrompida, em ferros fundidos nodulares e ferro fundidos maleáveis, utilizando resfriamento em polímeros a base de água, para aumentar a resistência mecânica, sem diminuir drasticamente sua tenacidade. O tratamento de têmpera interrompida consistiu em aquecer as amostras a uma temperatura de 940°C, resfriando as mesmas em três diferentes tempos, 30 segundos, 60 segundos e 300 segundos, em quatro percentuais de polímeros, 10%, 15%, 20% e 25%. Após o tratamento foi encontrada uma microestrutura composta de austenita, martensita e grafita, quando do resfriamento em polímero, com maior concentração. No resfriamento com polímeros com concentrações inferiores a 25%, o percentual de transformação da fase martensítica apresentou variação constante em diferentes tempos de resfriamento, com aumento do volume de martensita conforme a diminuição da concentração de polímeros. Em relação a microdureza não houve uma variação significativa conforme a mudança do tempo de resfriamento, mas uma diminuição, conforme o aumento da concentração de polímero. Como não detectou-se uma variação dos parâmetros relacionados ao tempo de resfriamento efetuados, verificou-se que o aumento da resistência mecânica originada na transformação martensítica e tenacidade pela presença de austenita foram associados a concentração de polímeros, comprovando-se a efetividade do processo com a utilização de percentual de polímero no resfriamento de 25%.

Palavras chave: Têmpera interrompida, Tempo de resfriamento, Polímeros, Ferros fundidos.

## **ABSTRACT**

In this work it was carried out the development of the thermal treatment of interrupted quenching, in nodular cast iron and malleable cast iron, using cooling in water-based polymers, to increase the mechanical resistance, without drastically decreasing its toughness. The quenching treatment consisted of heating the samples to a temperature of 940 ° C, cooling them in three different times, 30 seconds, 60 seconds and 300 seconds, in four percentages of polymers, 10%, 15%, 20% and 25%. After treatment, a microstructure composed of austenite, martensite and graphite was observed, when cooling in polymer, with greater concentration. In cooling with polymers with concentrations below 25%, the percentage of transformation of the martensitic phase showed constant variation at different cooling times, with an increase in the volume of martensite as the concentration of polymers decrease. In relation to microhardness, there was no significant variation as the cooling time changed, but a decrease, as the polymer concentration increased. As a variation of the parameters related to the cooling time was not detected, it was found that the increased mechanical resistance caused by the martensitic transformation and tenacity due to the presence of austenite were associated with the concentration of polymers, proving the effectiveness of the process with the use of percentage of polymer in the cooling of 25%.

**Keywords:** Interrupted Quenching, Cooling Time, Polymers, Cast Iron.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Formas estruturais da grafita, 1- Lamelar, 2- Pontiagudo, 3- Vermicular, 4- Nodular Irregular, 5- Nodular Incerto e 6- Nodular Regular. .... | 18 |
| Figura 2- Microestrutura do ferro fundido nodular. ....   | 19 |
| Figura 3 Microestrutura do ferro fundido maleável. ....   | 21 |
| Figura 4 - Diagrama TTT, (a) Resfriamento em água, (b) Martempêra, (c) Austempêra e (d) Tempêra Isotermica. ....  | 23 |
| Figura 5- Diagrama TTT da Austêmpera. ....  | 25 |
| Figura 6 - Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI). ....   | 27 |
| Figura 7- Diagrama TTT da Têmpera e Partição. ....  | 28 |
| Figura 8 - Microestrutura do Ferro Fundido Nodular após Têmpera e Partição. ....  | 29 |
| Figura 9 – (a) Têmpera em Óleo e (b) Têmpera em Polímero. ....  | 31 |
| Figura 10- Fluxograma Estrutural. ....  | 32 |
| Figura 11 – Diagrama TTT para Têmpera Interrompida. ....  | 33 |
| Figura 12- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 10%/300s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico ....                             | 37 |
| Figura 13- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 10%/60s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico ....                              | 37 |
| Figura 14- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 10%/30s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico ....                              | 38 |
| Figura 15- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 15%/300s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico ....                             | 38 |
| Figura 16- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 15%/60s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico ....                              | 39 |
| Figura 17- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 15%/30s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico ....                              | 39 |
| Figura 18- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 20%/300s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico ....                             | 40 |
| Figura 19- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 20%/60s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico ....                              | 41 |
| Figura 20- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 20%/30s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico ....                              | 41 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 21- Descarboxinação da Amostra Ferro Fundido Maleável 25%/300s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico .....  | 42 |
| Figura 22- Descarboxinação da Amostra Ferro Fundido Maleável 25%/60s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico .....   | 42 |
| Figura 23- Descarboxinação da Amostra Ferro Fundido Maleável 25%/30s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico .....   | 43 |
| Figura 24 - MEV da Amostra Base de Ferro Fundido Maleável sem Ataque Químico, (a) Imagem Real, (b) Mapa de Elementos, (c) Mapa do Carbono e (d) Mapa do Ferro ..... | 44 |
| Figura 25- MEV da Amostra Base de Ferro Fundido Nodular sem Ataque Químico, (a) Imagem Real, (b) Mapa de Elementos, (c) Mapa do Carbono e (d) Mapa do Ferro .....   | 45 |
| Figura 26 - Microestrutura Base das Amostras de Ferro Fundido, (a) Maleável e (b) Nodular .....   | 46 |
| Figura 27 - Microestrutura das Amostras Tratadas em 10% de Polímero do Ferro Fundido Maleável nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.....                          | 47 |
| Figura 28 – MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Maleável Tratada com 10% de Polímero.....  | 48 |
| Figura 29 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Maleável Tratada com 10% de Polímero. ....   | 48 |
| Figura 30- Microestrutura das Amostras Tratadas em 10% de Polímero do Ferro Fundido Nodular nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. ....                           | 49 |
| Figura 31– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Tratada com 10% de Polímero.....  | 50 |
| Figura 32 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Nodular Tratada com 10% de Polímero. ....  | 50 |
| Figura 33- Microestrutura das Amostras Tratadas em 15% de Polímero do Ferro Fundido Maleável nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.....                           | 51 |
| Figura 34 – MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Maleável Tratada com 15% de Polímero.....  | 52 |
| Figura 35 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Maleável Tratada com 15% de Polímero. ....   | 52 |
| Figura 36- Microestrutura das Amostras Tratadas em 15% de Polímero do Ferro Fundido Nodular nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. ....                           | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 37– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Tratada com 15% de Polímero.....  | 54 |
| Figura 38 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Nodular Tratada com 15% de Polímero. ....  | 54 |
| Figura 39- Microestrutura das Amostras Tratadas em 20% de Polímero do Ferro Fundido Maleável nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s..... | 55 |
| Figura 40– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Maleável Tratada com 20% de Polímero.....   | 56 |
| Figura 41 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Maleável Tratada com 20% de Polímero. ....   | 56 |
| Figura 42- Microestrutura das Amostras Tratadas em 20% de Polímero do Ferro Fundido Nodular nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. .... | 57 |
| Figura 43– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Tratada com 20% de Polímero.....  | 58 |
| Figura 44 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Nodular Tratada com 20% de Polímero. ....  | 58 |
| Figura 45- Microestrutura das Amostras Tratadas em 25% de Polímero do Ferro Fundido Maleável nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s..... | 59 |
| Figura 46 – MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Maleável Tratada com 25% de Polímero.....  | 60 |
| Figura 47 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Maleável Tratada com 25% de Polímero. ....   | 60 |
| Figura 48- Microestrutura das Amostras Tratadas em 25% de Polímero do Ferro Fundido Nodular nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. .... | 61 |
| Figura 49– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Tratada com 25% de Polímero.....  | 62 |
| Figura 50 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Nodular Tratada com 25% de Polímero. ....  | 62 |
| Figura 51 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Maleável Temperado em 10% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. ....          | 64 |
| Figura 52 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Nodular Temperado em 10% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. ....           | 65 |
| Figura 53 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Maleável Temperado em 15% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. ....          | 67 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 54 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Nodular Temperado em 15% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. ....  | 68 |
| Figura 55 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Maleável Temperado em 20% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. .... | 70 |
| Figura 56 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Nodular Temperado em 20% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. ....  | 71 |
| Figura 57 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Maleável Temperado em 25% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. .... | 73 |
| Figura 58 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Nodular Temperado em 25% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s. ....  | 74 |
| Figura 59 –Tipo de referência usados. ....   | 83 |
| Figura 60 -Classificação dos artigos usados. ....  | 83 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação dos ferros fundido nodulares segundo a ASM. ....                           | 20 |
| Tabela 2 - Proporção de Austenita das Amostras Temperada em 10% de Polímero .....                   | 63 |
| Tabela 3 - Proporção de Austenita das Amostras Temperada em 15% de Polímero .....                   | 66 |
| Tabela 4 - Proporção de Austenita das Amostras Temperada em 20% de Polímero .....                   | 69 |
| Tabela 5 - Proporção de Austenita das Amostras Temperada em 25% de Polímero .....                   | 72 |
| Tabela 6 - Microdureza Média antes do Tratamento Térmico .....                                      | 74 |
| Tabela 7 - Microdureza Média das Amostras de Ferro Fundido Nodular, após o Tratamento Térmico.....  | 75 |
| Tabela 8 - Microdureza Média das Amostras de Ferro Fundido Maleável, após o Tratamento Térmico..... | 75 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1- Classificação dos ferros fundido segundo a ASM..... | 18 |
|---|----|

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                     | 15 |
| 1.1 OBJETIVOS.....                                      | 16 |
| 1.1.1 Objetivos Específicos.....                        | 16 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                           | 17 |
| 3.1 Ferro Fundido e Sua Evolução.....                   | 17 |
| 3.1.1 Ferro fundido nodular .....                       | 19 |
| 3.1.2 Ferro fundido maleável .....                      | 21 |
| 3.2 Têmpera e Suas Características .....                | 22 |
| 3.3 Têmpera Interrompida .....                          | 22 |
| 3.4 Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI).....       | 23 |
| 3.5 Têmpera e Partição .....                            | 27 |
| 3.6 Resfriamento por Polímeros .....                    | 29 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS .....                            | 32 |
| 4.1 Amostras.....                                       | 33 |
| 4.2 Têmpera Interrompida .....                          | 33 |
| 4.3 Preparação Metalográfica .....                      | 34 |
| 4.4 Análise Micrográfica e de Trincas .....             | 34 |
| 4.5 Análise de Microdureza.....                         | 35 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                         | 36 |
| 5.1 Análise Microestrutural Pós Tratamento Térmico..... | 36 |
| 5.1.1 Ferro fundido maleável 10% de polímero .....      | 36 |
| 5.1.2 Ferro fundido maleável 15% de polímero .....      | 38 |
| 5.1.3 Ferro fundido maleável 20% de polímero .....      | 40 |
| 5.1.4 Ferro fundido maleável 25% de polímero .....      | 41 |
| 5.2 Caracterização Microestrutural .....                | 43 |

|   |    |
|---|----|
| 5.2.1 Polímero 10% .....                | 46 |
| 5.2.2 Polímero 15% .....                | 50 |
| 5.2.3 Polímero 20% .....                | 55 |
| 5.2.4 Polímero 25% .....                | 59 |
| 5.3 Proporção De Fases .....            | 63 |
| 5.3.1 Polímero 10% .....                | 63 |
| 5.3.2 Polímero 15% .....                | 65 |
| 5.3.3 Polímero 20% .....                | 68 |
| 5.3.4 Polímero 25% .....                | 71 |
| 5.4 Microdureza .....                   | 74 |
| 6 CONCLUSÕES .....                      | 77 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....     | 79 |
| 7.1 Classificação das Referências ..... | 82 |

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo do tratamento térmico de têmpera interrompida em ferros fundidos nodulares e ferros fundidos maleáveis busca preencher uma lacuna de conhecimento, procurando criar uma nova linha de pesquisa para o aumento da resistência mecânica e a resistência ao desgaste em ferros fundidos e obtenção de tenacidade nestes materiais.

O ferro fundido nodular austemperado, também conhecido por ADI, obtido a partir de um tratamento térmico de austêmpera tem ganhado uma atenção especial em pesquisas atuais. Nele existe uma combinação de alta resistência a tração, resistência ao desgaste, alta ductilidade e boa tenacidade. O ADI tem sido utilizado em componente com alta solicitação de desgaste, como em empresas automobilísticas, de mineração, engrenagens e peças estruturais (PIMENTEL, 2017).

Outro tratamento muito utilizado em ferros fundidos nodulares é a têmpera e partição, que diferentemente da austêmpera, que cria a microestrutura bainítica, a têmpera e partição cria em sua microestrutura uma matriz austenítica estável com ilhas de martensita (SILVA Et.al, 2010).

Este presente estudo visa a elaboração de um novo método para a criação de um ferro fundido com duas fases (*dual-phased cast iron*) distintas, diferenciando dos métodos de austêmpera (ADI) e têmpera e partição (*quenching and partitioning*) pelo tempo de têmpera, taxa de resfriamento e o meio em qual será realizada. Sendo o diferencial para os outros processos as microestruturas encontradas, sendo estas uma matriz austenítica e ilhas de martensita; e a aplicabilidade do tratamento em ferros fundidos maleáveis.

## 2. OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo geral desenvolver o processo de tratamento térmico de têmpera interrompida em ferros fundidos maleáveis e ferros fundidos nodulares, variando os parâmetros de têmpera e comparando-os.

### 2.1 Objetivos Específicos

Esta dissertação tem como objetivos específicos:

1. Análise microestrutural antes e após o tratamento de têmpera interrompida, avaliando a influência do tempo e meio de resfriamento.
2. Analisar a microdureza antes e após o tratamento de têmpera interrompida, sendo feita uma comparação entre os tempos e meios de resfriamento.
3. Verificar a presença de anisotropias nas amostras tratadas termicamente.
4. Comparar as propriedades das amostras de um mesmo ferro fundido variando os parâmetros da têmpera interrompida.
5. Comparar as propriedades entre as amostras de ferro fundido nodular e ferro fundido maleável.
6. Avaliar o procedimento de têmpera interrompida em ferros fundidos.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é abordado a fundamentação teórica do processo de têmpera interrompida em ferros fundidos nodulares e ferro fundidos maleáveis.

#### 3.1 Ferro Fundido e Sua Evolução

Os ferros fundidos têm grande aplicação na indústria automobilística na fabricação de blocos de motores, virabrequins, bielas, etc. Apresentam custos de produção relativamente baixos, propriedades mecânicas como resistência ao desgaste, resistência a fadiga, além de elevada resistência à corrosão em altas temperaturas (PATATUNDA, 2001; CUI, 2017; SOLIC Et.al, 2016, ZHANG Et.al, 2018).

O ferro fundido é uma liga de ferro e carbono, contendo acima de 2,11% de carbono, como apresenta um alto percentual de carbono isso resulta nos carbonos em forma de partículas de grafita (ASM, 2001).

Os ferros fundidos são classificados em seis tipos: ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido mesclado, ferro fundido maleável, ferro fundido de grafita compactada e ferro fundido nodular (ASM, 2001).

Primeiramente os ferros fundidos foram classificados de acordo com a cor da sua fratura, sendo elas: cinzentos, brancos ou mesclados (mistura entre o cinzento e o branco). Após foi feita uma análise microestrutural, mostrando que os ferros fundidos cinzentos apresentavam a grafita, e os ferros fundidos brancos apresentam carbonetos (ASM, 2001).

O Quadro 1 mostra a classificação dos ferros fundidos comerciais, conforme sua matriz metálica, estrutura da grafita, cor da fratura e qual o processo de obtenção das mesmas (ASM, 2001).

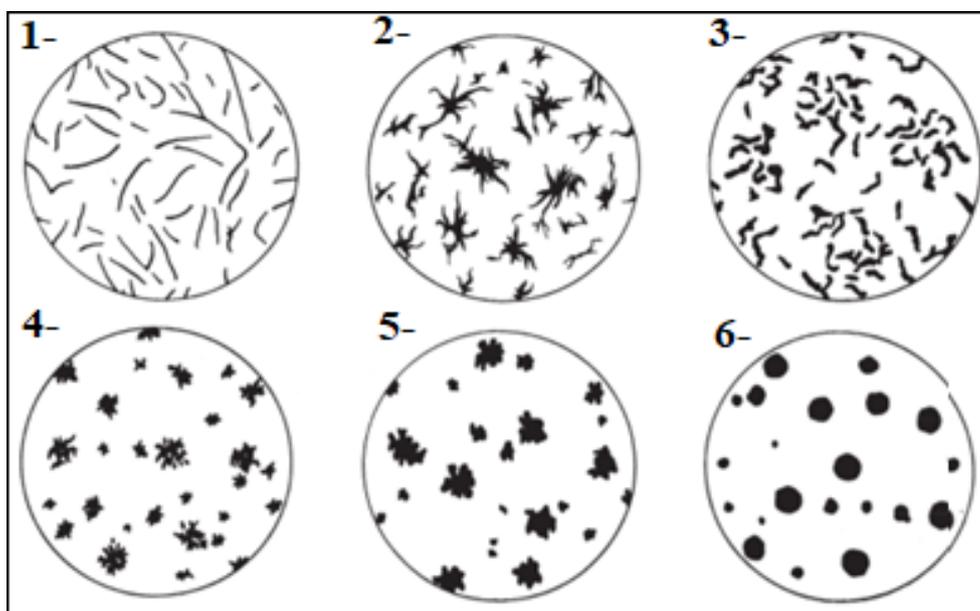
**Quadro 1- Classificação dos ferros fundido segundo a ASM.**

| FERRO FUNDIDO                      | FORMA DA GRAFITA                    | MATRIX                                | FRATURA                    | ESTRUTURA FINAL DA GRAFITA APÓS     |
|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Ferro Fundido Cinzento             | Grafita Lamelar                     | Perlitica                             | Cinza                      | Solidificação                       |
| Ferro Fundido Nodular              | Grafita Esfeiroidal                 | Ferritica,<br>Perlitica,<br>Austenita | Cinza-Prateada             | Solidificação ou Tratamento Térmico |
| Ferro Fundido Vermicular           | Grafita Vermicular Compacta         | Ferritica,<br>Perlitica               | Cinza                      | Solidificação                       |
| Ferro Fundido Branco               | Fe <sub>3</sub> C                   | Perlitica,<br>Martensitica            | Branca                     | Solidificação e Tratamento Térmico  |
| Ferro Fundido Mesclado             | Grafita Lamelar + Fe <sub>3</sub> C | Perlitica                             | Mesclada<br>(cinza/branca) | Solidificação                       |
| Ferro Fundido Maleável             | Grafita Temper                      | Ferritica,<br>Perlitica               | Cinza-Prateada             | Tratamento Térmico                  |
| Ferro Fundido Nodular Austemperado | Grafita Esfeiroidal                 | Bainitica                             | Cinza-Prateada             | Tratamento Térmico                  |

Fonte: Adaptado de ASM, 2001.

Conforme a norma ISO 945-1:2017 a grafita pode se apresentar sob a seis formas distintas, a Figura 1 apresenta as possíveis formas desta:

**Figura 1 - Formas estruturais da grafita, 1- Lamelar, 2- Pontagudo, 3- Vermicular, 4- Nodular Irregular, 5- Nodular Incerto e 6- Nodular Regular.**

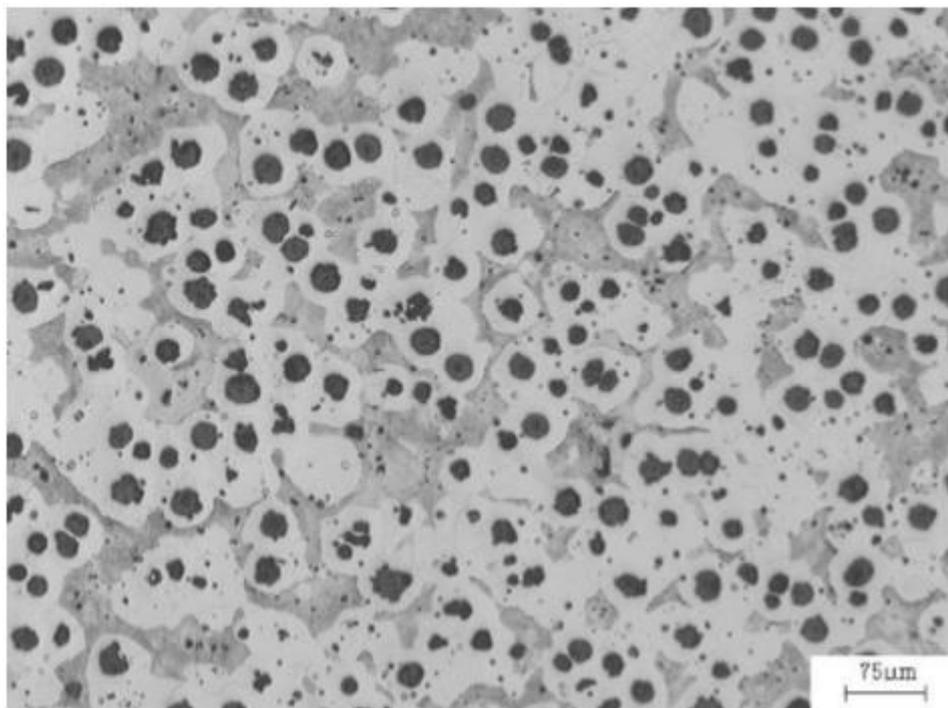


Fonte: ISO 945-1:2017.

### 3.1.1 Ferro fundido nodular

O ferro fundido nodular é um material que mantém uma ótima relação de propriedades físicas e mecânicas, baixo custo de produção e processamento comparado aos aços forjados (PATATUNDA, 2001; MEIER Et.al, 2013). A principal característica que diferencia o ferro nodular dos outros ferros fundido é a grafita em forma de nódulos em sua microestrutura, como na Figura 2 (PANNEERSELVAN Et.al, 2017).

**Figura 2- Microestrutura do ferro fundido nodular.**



Fonte: Silva Et.al, 2010.

Por possuir os nódulos de grafita, os ferros fundidos nodulares possuem menor massa específica do que os aços, podendo chegar a uma redução de 7% no peso (ZHANG Et.al, 2018).

A ASM (2001) classifica os ferros fundidos nodulares de acordo com suas propriedades. Sendo os ferros nodulares brutos classificados em cinco tipos principais conforme apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Classificação dos ferros fundido nodulares segundo a ASM.**

|                                     | Série | 60-40-18 | 65-45-12 | 80-55-06 | 100-70-03 | 120-90-02 |
|-------------------------------------|-------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Resistência á tração mín [Mpa]      |       | 414      | 448      | 552      | 689       | 827       |
| Resistência ao escoamento mín [Mpa] |       | 276      | 310      | 379      | 483       | 621       |
| Alongamento [%]                     |       | 18       | 12       | 6        | 3         | 2         |

Fonte: Adaptado de ASM, 2001.

A solidificação é determinante para a obtenção de diferentes propriedades e classes do ferro fundido nodular. O ferro fundido nodular de qualidade possui uma boa dispersão dos nódulos de grafita na microestrutura, e um grau de nodularização acima de 85%, sendo esse o índice do nível de perfeição e circularidade dos nódulos. Também deve estar com o mínimo de não-conformidades, como a presença de microtrincas, microrechupes; e com a mínima quantidade de carbonetos ( $Fe_3C$ ) (KEOUGH Et.al, 2010). Sendo um processo que necessita de um alto controle de parâmetros de fabricação (WANG Et.al, 2017).

Para a fabricação do ferro nodular, é utilizado sucata de aço, ferro gusa e material de retorno. Sendo de extrema importância o controle da composição química de cada um destes materiais para atingir a composição química desejada. Devendo-se evitar excessos de enxofre (S) e Manganês (Mn) (OYETUNJI, 2014; GUESSER, 2009) que prejudicam a qualidade da nodularização (DASGUPTA Et.al, 2012; RAO Et.al, 2014).

O controle de temperatura é fundamental na fusão do material, sendo importante no controle da nucleação da ferrita. Altas temperaturas mantidas durante muito tempo pode ocasionar uma desnucleação, aumentando a oxidação, e com o aumento do oxigênio dificultando a modularização (DASGUPTA Et.al, 2012).

A etapa de inoculação é a principal influenciadora na determinação da composição química, e o processo que mais dispersa os nódulos na matriz metalúrgica (SKALAND, 2001). O número de nódulos tem influência tanto na

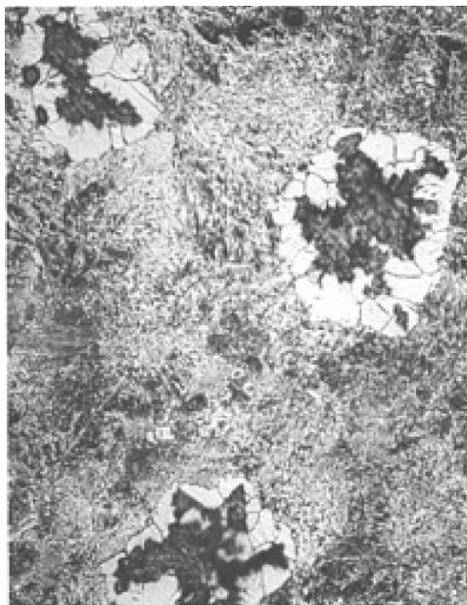
qualidade do material inicial, quanto no material que for para tratamentos térmicos (GHADERI Et.al, 2003), pois a distância entre os nódulos de grafita determina a distância da difusão de carbono na matriz (CARMO, 2001).

### 3.1.2 Ferro fundido maleável

Ferros fundido maleáveis são usualmente selecionados pela sua excelente usinabilidade, significativa ductilidade, boa dureza e boa resistência ao choque (ASM, 2001).

O ferro fundido maleável tem praticamente toda grafita em forma pontiaguda irregular, diferente da forma nodular do ferro fundido nodular, mostrado na Figura 3. Ele é produzido a partir do ferro fundido branco tratado termicamente para converter os carbonetos em nódulos de grafita irregular, sendo esta formada no estado sólido durante o tratamento térmico (ASM, 2001).

**Figura 3 Microestrutura do ferro fundido maleável.**



Fonte: (ASM, 2001).

O ferro fundido maleável, assim como o ferro fundido nodular, possui uma considerável dutibilidade e dureza por causa da combinação dos nódulos de grafita e uma matriz metálica de baixo carbono, conseqüentemente ela é utilizada em aplicações que requerem boa dutibilidade e resistência.

### 3.2 Têmpera e Suas Características

A têmpera é o processo de resfriamento rápido de peças metálicas em uma temperatura de austenitização ou aquecimento intercrítico, normalmente na faixa de 815°C a 870°C para os aços (ASM [2], 2001).

A têmpera é um dos métodos de melhoria de desempenho das propriedades dos materiais na indústria de manufatura. O endurecimento bem realizado alcança a microestrutura, a dureza, a resistência e/ou a tenacidade necessárias (ASM [2], 2001; HUIPING Et.al, 2006). No entanto esta também é uma das principais causas de rejeições e retrabalhos em componentes e peças. A distorção e a tensão residual de componentes temperados é um dos maiores problemas enfrentados por técnicos e projetistas (HUIPING Et.al, 2006).

A temperatura inicial de uma peça a ser temperada mesmo, sendo uniforme, o gradiente de temperatura nas diferentes regiões da peça temperada será muito grande. As variáveis como a fração de volume transformado de fase, coeficientes de troca de calor, coeficientes de transferência de calor superficial, calor específico variam com o tempo de resfriamento, sendo a taxa de remoção de calor por um meio de resfriamento e a maneira como ele é usado afeta substancialmente o desempenho desejado (ASM [2], 2001; HUIPING Et.al, 2006).

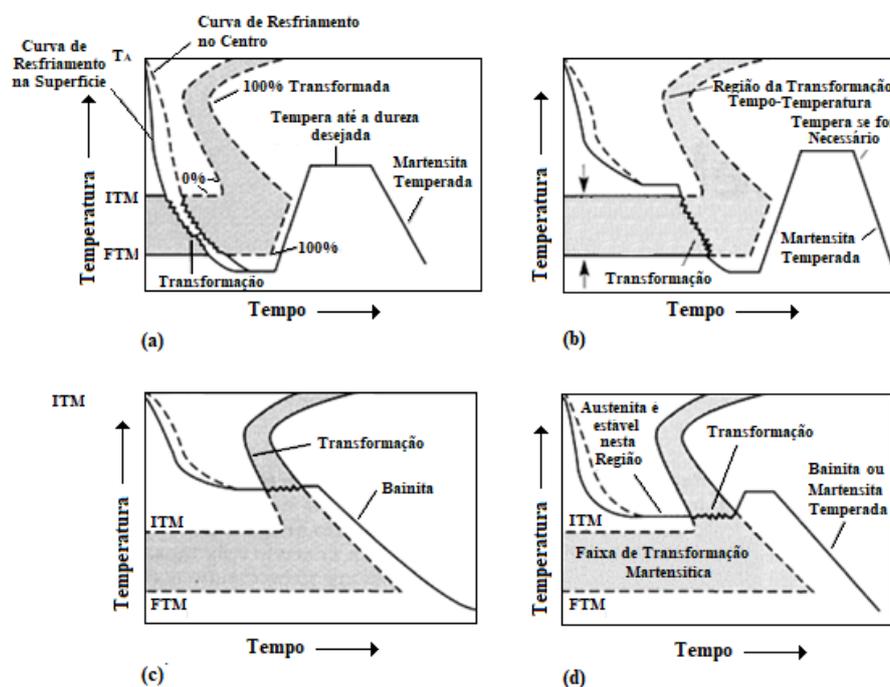
Para obter-se os efeitos desejáveis do endurecimento por têmpera, tem que se controlar as tensões residuais e a distorção, evitar o início de fissuras, e verificar a evolução microestrutural para se obter as propriedades melhoradas quanto a resistência ao desgaste, a tenacidade e a distribuição de dureza específica (HUIPING Et.al, 2006).

### 3.3 Têmpera Interrompida

Têmpera interrompida refere-se ao resfriamento rápido do metal da temperatura de austenitização, em um meio mais agressivo como por exemplo água, até um ponto acima do início da transformação da martensita onde é mantido por um período de tempo especificado, seguido por resfriamento no ar (ASM [2], 2001).

Existem três tipos de têmpera interrompida: austêmpera, martêmpera e têmpera isotérmica. As comparações de ciclos de resfriamento direto e interrompido, feitas no diagrama TTT, são mostradas na Figura 4: (a) Processos convencionais de têmpera e revenimento que usam como meio de resfriamento óleo, água ou polímero; (b) Martêmpera, que usa sal ou óleo quente como meio de resfriamento; (c) Austêmpera, que usa um sal como meio de resfriamento e (d) Têmpera isotérmica, que usa sal ou óleo quente como meio de resfriamento (ASM [2], 2001).

**Figura 4 - Diagrama TTT, (a) Resfriamento em água, (b) Martempêra, (c) Austempêra e (d) Têmpera Isotérmica.**



Fonte: Adaptado de ASM [2], 2001.

### 3.4 Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI)

O ferro fundido nodular austemperado (ADI) é um ferro fundido nodular que passou por um tratamento isotérmico chamado de austêmpera (MEIER Et.al, 2013), tendo este atraído a atenção por sua alta resistência mecânica com boa ductilidade, boa resistência ao desgaste, ótima resistência a fadiga e excelente coeficiente de resistência/peso (PATATUNDA, 2001; SOLIC Et.al, 2016; ZHANG Et.al, 2018). O custo de manufatura do ferro fundido nodular

austêmperado é muito menor do que o aço forjado, tendo uma densidade menor e a resistência específica maior que os aços forjados; está sendo empregado na substituição de aços forjados e até peças de alumínio (PATATUNDA, 2001; MEIER Et.al, 2013). Sendo amplamente utilizado na indústria automotiva na fabricação de virabrequins, bielas e engrenagens de transmissão; na indústria bélica na fabricação de canhões e nas indústrias de mineração e transporte de minérios (PATATUNDA, 2001; CUI, 2017).

A composição química do ADI é semelhante ao ferro fundido nodular, porem pode-se acrescentar elementos de liga como níquel, molibdênio, cobre e manganês para melhorar a temperabilidade e atrasar a decomposição da austenita em perlita (PATATUNDA,2001). Com o uso do tratamento térmico de austêmpera cria-se uma microestrutura específica composta de bainita, carbonetos eutéticos e grafita (CHEN Et.al, 2018).

Existem duas rotas para se obter a microestrutura bainítica: a primeira consiste em modificar a curva TTT para os ferros fundidos, isso sendo feito através da otimização dos elementos de liga como molibdênio, níquel, manganês e cobre, sendo adicionando entre 0,2% e 5,0%; com isto tem-se uma amplificação da faixa de transformação bainítica e também um distanciamento e separação desta faixa para a faixa de transformação perlítica. A segunda rota consiste no controle do processo de austêmpera, sendo feito pelo controle dos parâmetros, como o tempo de permanência e a temperatura; sem modificar a curva TTT (CHEN Et.al, 2018).

O ferro fundido nodular austêmperado pode ter propriedades variáveis para cada aplicação, para aplicações que necessitam de resistência ao desgaste, este pode ter um resistência a tração superior a 1600 MPa, alongamento de 1% e dureza na faixa de 60 HRc. Para aplicações em que deseja-se uma boa ductilidade pode-se encontrar resistência a tração entre 800 MPa e 1200 MPa e alongamento máximo de 14% (PANNEERSELVAM Et.al, 2014).

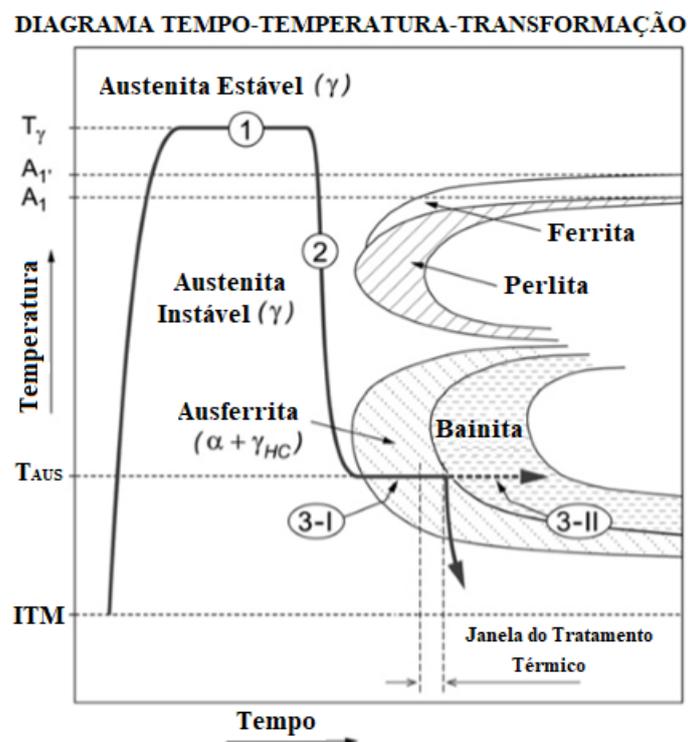
A produção do ferro fundido nodular austemperado necessita de um grande controle dos parâmetros, pois a morfologia final ausferrita pode ser

influenciada pela composição química, pelo tempo de permanência na temperatura de austêmpera, pela taxa de resfriamento, etc (WANG Et.al, 2017).

O processamento do ferro fundido nodular austemperado consiste em duas partes: inicialmente deve-se aquecer o material na faixa de austenitização, entre 850°C e 950°C, por tempo suficiente para que toda a microestrutura seja de austenita ( $\gamma$ ), essa temperatura é chamada de  $T_\gamma$  (PATATUNDA, 2001; MEIER Et.al, 2013), onde a austenita fica enriquecida pelo carbono presente nos nódulos de grafita (MEIER Et.al, 2013).

Após a austenitização do material é feito o tratamento térmico de austêmpera, sendo este resfriado em um banho de sal na temperatura na faixa de 250°C e 400°C, chamada de  $T_{aus}$ , por um tempo de duas a quatro horas (PATATUNDA, 2001; MEIER Et.al, 2013). A Figura 5 mostra o diagrama tempo, temperatura e transformação (TTT), para o tratamento térmico de austêmpera.

**Figura 5- Diagrama TTT da Austêmpera.**



Fonte: Adaptado de ASM [2], 2001.

A cinética de transformação das fases na austêmpera ocorre em duas etapas. Primeiramente a austenita ( $\gamma$ ) decompõem-se em ferrita ( $\alpha$ ) e austenita

de alto carbono ( $\gamma_{HC}$ ). Se o ferro fundido nodular for mantido por muito tempo na temperatura de austêmpera, a segunda reação ocorre, onde a austenita de alto carbono ( $\gamma_{HC}$ ) se decompõem em ferrita ( $\alpha$ ) e carbonetos, formando uma estrutura com carbonetos que deixam o material frágil, devendo esta ser evitada (PATATUNDA, 2001; PANNEERSELVAN Et.al, 2017; PANNEERSELVAM Et.al, 2014, DIAS Et.al, 2012; PATATUNDA Et.al, 2016).

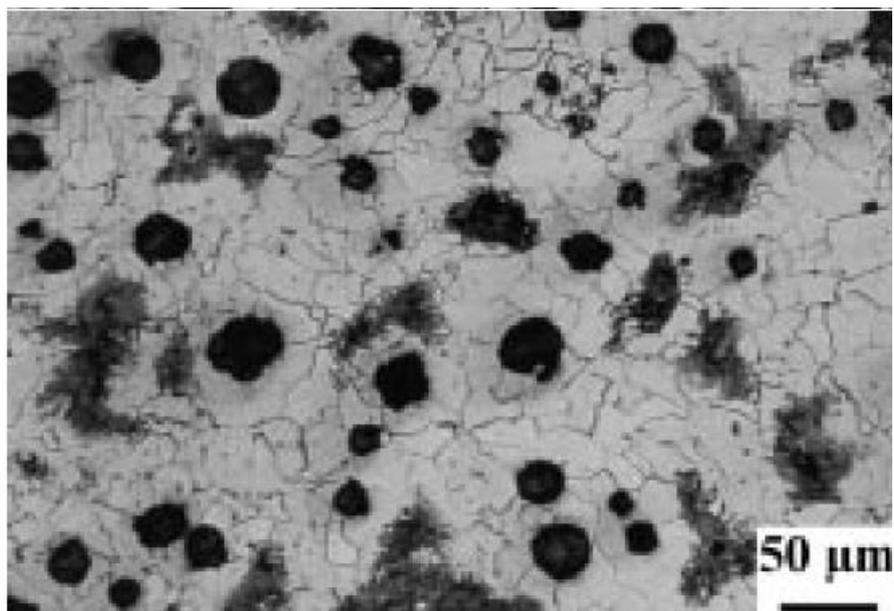
A melhor combinação se dá após o primeiro estágio, mas antes do segundo estágio, criando a bainita, que consiste em austenita de alto carbono ( $\gamma_{HC}$ ) e ferrita acicular com nódulos de grafita dispersa nas fases (PATATUNDA, 2001; PANNEERSELVAN Et.al, 2017; DIAS Et.al, 2012; PATATUNDA Et.al, 2016).

A diminuição do tempo de austêmpera produz um material contendo menos fase de austenita estável, dando um aumento da resistência a abertura de trincas por fadiga, porém a um aumento da propagação das trincas em fadiga. Sendo assim a diminuição do tempo de austêmpera aumenta a nucleação de trincas por fadiga, mas aumenta a sua propagação; suas propriedades mecânicas, como resistência a tração e resistência ao desgaste, permanecem inalteradas (DIAS Et.al, 2012).

O tratamento térmico de austêmpera feito corretamente tende a eliminar a formação das microestruturas indesejáveis, como a perlita, martensita e a formação de carbonetos (PATATUNDA, 2001).

A microestrutura encontrada por Hellal (1999), mostrada na Figura 6, apresenta uma matriz bainítica com algumas ilhas de martensita.

**Figura 6 - Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI).**



Fonte: HELLAL, 1999.

### 3.5 Têmpera e Partição

A têmpera e partição (*Quenching and Partitioning*) é uma linha de pesquisa proposta em 2003, sendo considerada a terceira geração de aços de alta resistência, sendo muito utilizado na fabricação de peças na indústria automobilística (ALLAIN Et.al, 2017). O aumento do interesse em aços e ferros fundidos processados por têmpera e partição deve-se a boa combinação entre a resistência mecânica e a dutibilidade resultantes, onde a melhora dessas propriedades acarretaram a uma diminuição do peso e dos custos, sendo essa feita sem a adição de elementos de liga (somente em aços) ou com pouca adição de elementos de ligas (aços e ferros fundidos) (SEO Et.al, 2016; MELADO Et.al, 2017, ALLAIN Et.al, 2016).

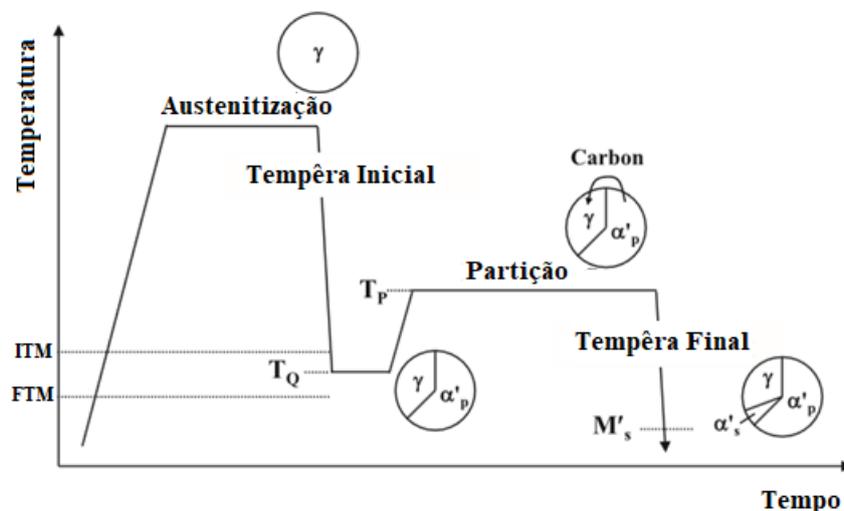
A têmpera e partição produz uma microestrutura duplex consistida de uma matriz martensítica com ilhas de austenita (ALLAIN Et.al, 2017; SEO Et.al, 2016). O conceito envolve em transformar parcialmente, por têmpera, a austenita em martensita, sendo que o passo chamado partição o material é mantido isotermicamente a uma temperatura maior que a temperatura do início da transformação martensítica, promovendo a difusão do carbono da martensita supersaturada para a austenita. O sucesso deste processo depende da

supressão das outras reações que usam o carbono, como a precipitação de carbonetos (SILVA Et.al, 2014; NISHIKAWA Et.al, 2017).

O processo de têmpera e partição é consistido de três estágios: austenitização e têmpera inicial, partição e têmpera final (SEO Et.al, 2016). No primeiro estágio o material é austenitizado e feita a têmpera inicial a uma temperatura ( $T_Q$ ) na faixa entre o início da transformação martensítica (ITM) e o final da transformação martensítica (FTM); onde é formado inicialmente uma fração controlada do volume de martensita supersaturada de carbono ( $\alpha'_p$ ) e austenita. O segundo estágio é chamado de partição, onde o material é reaquecido a uma temperatura de partição ( $T_p$ ) superior a temperatura ITM; onde o carbono presente na martensita supersaturada difunde na austenita presente, criando um enriquecimento de carbono na mesma e estabilizando-a. O terceiro estágio é feito a têmpera final; onde a austenita a qual não ocorreu muita difusão de carbono é transformada em martensita ( $\alpha'_s$ ) (SEO Et.al, 2016; ALLAIN Et.al, 2016; TOJI Et.al, 2014; SEO Et.al [2], 2016; SEO Et.al, 2014; KIIJF Et.al, 2014).

A Figura 7 mostra o diagrama temperatura por tempo do processo de têmpera e partição, mostrando as fases encontradas em cada estágio do processo.

**Figura 7- Diagrama TTT da Têmpera e Partição.**



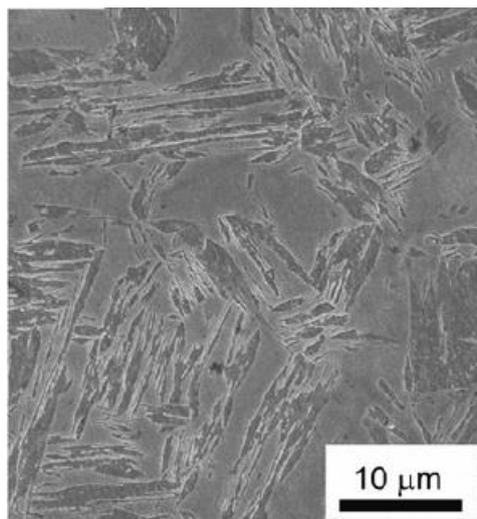
Fonte: Adaptado de ASM [2], 2001.

A temperatura do primeiro resfriamento ( $T_q$ ) é de extrema importância, sendo ela a principal influenciadora na porcentagem de fases na microestrutura; as propriedades mecânicas dos aços e ferros fundidos feitos por têmpera e partição tem uma relação direta com o percentual das fases contidas (SEO Et.al, 2016).

Em ferros fundidos a estabilização da austenita usando o carbono presente na martensita supersaturada ( $\alpha'_p$ ) só é possível com a existência de austenita não transformada após a têmpera inicial e se a precipitação de carbonetos é suprimida ou retardada. Sendo essa supressão ou retardamento feito com a adição de elementos de liga como o silício e o alumínio (SILVA Et.al, 2014).

De acordo com o encontrado por Santofimia, et.al (2011), a microestrutura da têmpera e partição encontrada foi de martensita e austenita, mostrada na Figura 8.

**Figura 8 - Microestrutura do Ferro Fundido Nodular após Têmpera e Partição.**



Fonte: SANTOFIMIA, 2011.

### 3.6 Resfriamento por Polímeros

Para têmpera de aços carbono e aços liga o fluido mais comum para o seu resfriamento tem sido os óleos minerais, tendo este potenciais riscos como

incêndios, tendo assim uma necessidade de equipamentos mais onerosos (CANALE Et.al, 1999).

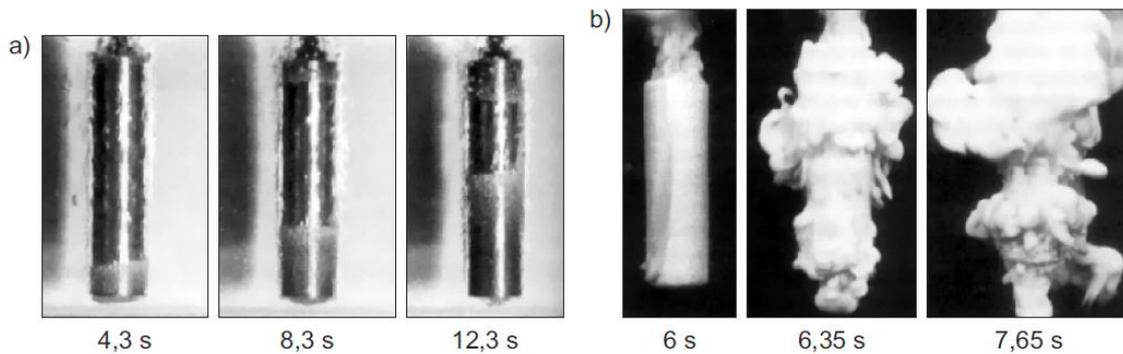
A troca por resfriamento em soluções poliméricas tem sido a alternativa mais comum. Tendo como vantagens em comparação com óleos minerais, como: o custo, o desempenho, flexibilidade, limpeza no processo, além de eliminar o risco de incêndio (CANALE Et.al, 1999).

Na têmpera por óleo, quando o metal quente é imerso no fluido imediatamente é envolto em uma camada de vapor, que resulta em um resfriamento lento. Quando a temperatura da superfície chega a temperatura de ebulição do óleo ocorre uma nucleação de bolhas, elevando a taxa de resfriamento aos valores mais altos do processo. Quando a temperatura da superfície atinge um valor menor que o ponto de ebulição do óleo ocorre o resfriamento convectivo e a taxa de resfriamento atinge os menores valores no processo de resfriamento. As três processos ocorrem simultaneamente na superfície da peça contribuindo para o aumento do gradiente térmico, aumentando distorções e trincamentos (CANALE Et.al, 1999; VIEIRA Et.al, 2019).

Na têmpera por polímero, quando ocorre a imersão do metal há a formação de um filme contínuo de polímero ao redor da peça, separado da superfície por um vapor superaquecido. Com o resfriamento o filme de polímero tem um colapso súbito, onde a água rompe o filme, obtendo-se taxas de resfriamento bastantes rápidas e uniformes na peça (CANALE Et.al, 1999; VIEIRA Et.al, 2019).

A Figura 9(a) apresenta uma amostra sendo temperada em óleo e a camada de vapor em volta da superfície da peça. Na Figura 9(b) apresenta uma amostra sendo temperada em polímero, mostrando o colapso do filme de polímero.

**Figura 9 – (a) Têmpera em Óleo e (b) Têmpera em Polímero.**



Fonte: CANALE, 1999.

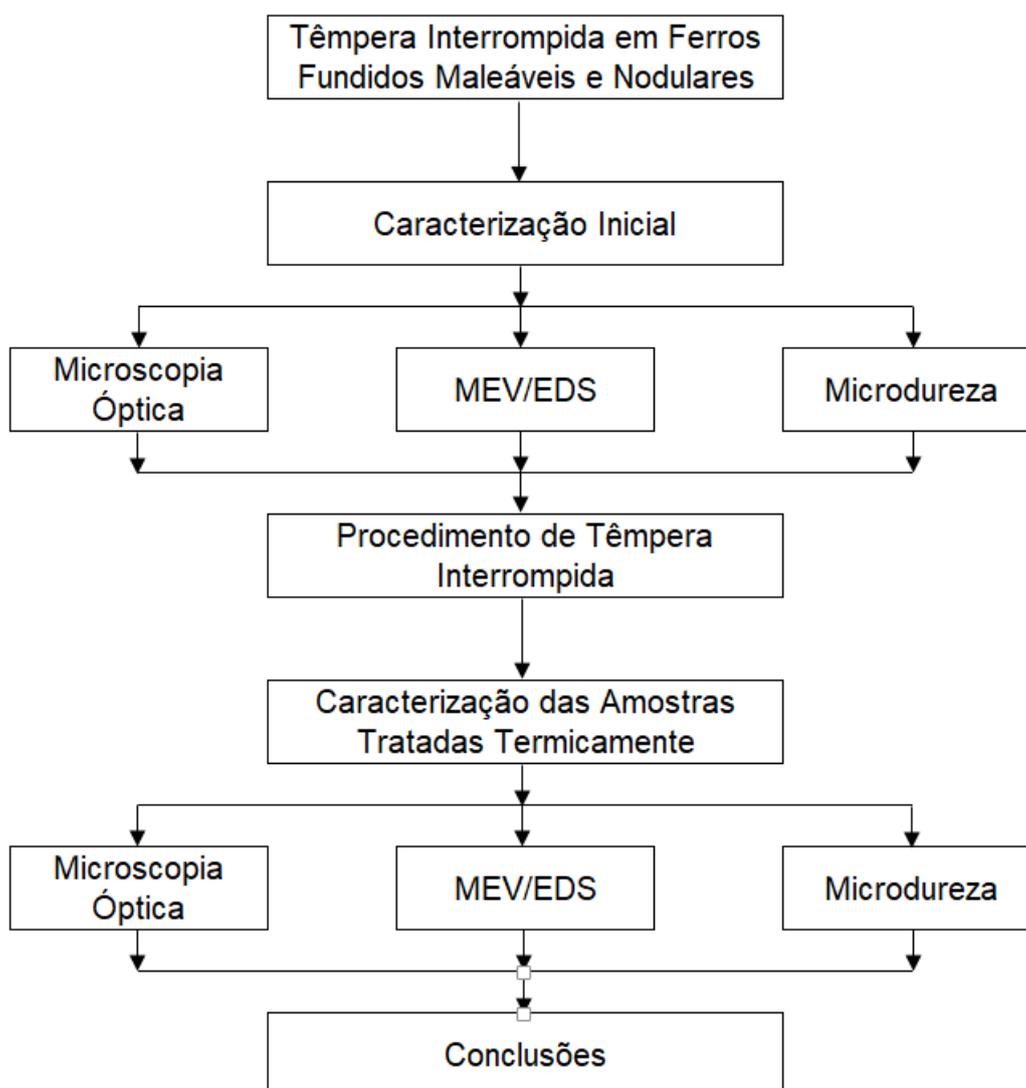
No processo de resfriamento em solução polimérica há uma redução substancial dos gradientes térmicos, resultando em um menor potencial de aparecimento de distorções e trincas, comparando com o resfriamento em óleos (CANALE Et.al, 1999; VIEIRA Et.al, 2019).

O principal parâmetro de processo de resfriamento com uma solução polimérica é a concentração de polímero, está afetando diretamente a capacidade de troca térmica. Elevando a porcentagem de polímero aumenta-se a viscosidade da solução, diminuindo a velocidade de resfriamento e conseqüentemente a diminuindo a transformação martensítica. Com o aumento da viscosidade a camada de vapor torna-se mais espessa, dificultando o colapso (VIEIRA Et.al, 2019).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é abordado a metodologia utilizada para desenvolver a pesquisa seguindo os passos descritos no fluxograma, mostrados na Figura 10.

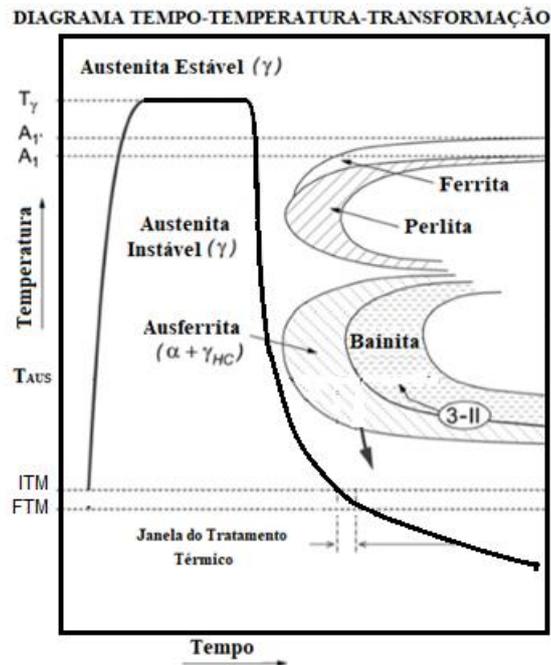
**Figura 10- Fluxograma Estrutural.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 11 mostra o diagrama TTT do processo de têmpera interrompida proposto na dissertação, sendo este mais detalhado a seguir.

**Figura 11 – Diagrama TTT para Têmpera Interrompida.**



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.1 Amostras

No estudo foram utilizadas treze amostras de ferro fundido nodular e treze amostras de ferro fundido maleável, sendo o material base disponibilizado pela Universidade Federal do Rio Grande.

Uma amostra de ferro fundido nodular e uma amostra de ferro fundido maleável foram utilizadas para a caracterização inicial dos materiais e as outras doze amostras utilizadas para o tratamento térmico de têmpera interrompida.

#### 4.2 Têmpera Interrompida

No processo de têmpera interrompida as amostras foram aquecidas a temperatura de 940°C pelo tempo de uma hora dentro do forno elétrico com atmosfera controlada da marca EDG, presente no laboratório de engenharia mecânica da FURG.

Para o resfriamento foi utilizado uma solução polimérica a base de PVP, preparadas a partir do polímero base Durquench 90, da marca Durferrit. Foram preparadas quatro soluções com diferentes concentrações de polímero, sendo estas de 10%, 15%, 20% e 25% de polímero.

O polímero polivinilpirolidona (PVP) tem alta solubilidade em água e arrefecimento variável conforme sua concentração. Ele apresenta um fase de filme de vapor mais curta, ao passo que os estágios de ebulição e convecção são prorrogados (VIEIRA, 2019).

As amostras foram resfriadas em um meio contendo água e polímero sem agitação, pelo tempo proposto, e após o resfriamento ao ar. Foi verificado a temperatura de 40°C da solução polimérica antes do processo de têmpera; e a temperatura média de 50°C após procedimento.

Para o estudo as variáveis de têmperas são as concentrações de polímero misturado na água, sendo utilizado 5%, 10%, 15% e 20% de polímero; e o tempo de têmpera, sendo o tempo utilizado de 30 segundos, 1 minutos e 5 minutos. Obteve-se um total de doze amostras de ferro fundido nodular e doze amostras de ferro fundido maleável, cada uma sendo temperada com um parâmetro diferente das outras amostras.

#### 4.3 Preparação Metalográfica

Na preparação metalográfica utilizou-se a norma ASTM E3-11 (2001), consistindo em lixar as amostras em lixa d'água com granulometrias de 120, 240, 320, 400, 600, 800 e 1200; sequencialmente. Sendo que a amostra deve ser rotacionada em 90° a cada mudança de lixa, sendo trocada a lixa quando todos os riscos da amostra estiverem no mesmo sentido de lixamento.

Após o processo de lixamento foi feito o polimento, utilizando um disco giratório com feltro, sendo usado alumina 0,05 µm como abrasivo. O polimento foi feito até não existirem riscos na superfície (ASTM E3-11, 2001).

Para a análise de trincamentos não foi utilizado ataque químico, já para a análise das microestruturas utilizou-se um ataque químico com reagente Nital 3%, sendo este composto por 97mL de álcool etílico e 3 mL de ácido nítrico, por um tempo de 30 segundos.

#### 4.4 Análise Micrográfica e de Trincas

Na análise microestrutural foram utilizadas duas técnicas sendo as mesmas microscopia óptica e eletrônica de varredura.

Por utilizar um feixe de elétrons, o microscópio eletrônico por varredura (MEV) alcança ampliações de até 300000 vezes. O MEV possibilita diferentes maneiras de obtenção de imagens, sendo um dos modos o *secondary electron induced* (SEI). Neste modo os elétrons secundários interagem com o feixe de elétrons criando um contraste pelo relevo da amostra (DEDAVID Et.al, 2007).

Para a análise de trincas, as amostras foram utilizadas sem o ataque químico. Foi utilizado o microscópio Olympus QX 51, do Laboratório de Metalógrafia da FURG e o Microscópio Eletrônico de Varredura, Jeol, JSM-6610LV, com microsonda de EDS, presente no CEME-SUL. Verificando a presença de não-conformidades nas amostras, como porosidade e trincas, tanto nas amostras sem tratamento térmico como nas tratadas termicamente.

Para a análise da microestrutura usou-se o microscópio Olympus QX 51 e o Microscópio Eletrônico de Varredura, Jeol, JSM-6610LV, com microsonda de EDS. Onde as amostras atacadas pelo reagente químico Nital 3% foram verificadas quanto sua microestrutura, e suas mudanças de microestruturais após o tratamento térmico.

#### 4.5 Análise de Microdureza

A microdureza de cada fase foi determinada utilizando o método de análise da norma ASTM E384-17. Fazendo 5 pontos em cada fase, totalizando 10 pontos por amostra.

Foi utilizado o microdurômetro Shimadzu HV2, com penetrador do tipo Vickers, presente no Laboratório de metalógrafia da FURG, usando um HV0,01 e um tempo de permanência de 10 segundos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após realizados ensaios para caracterização das amostras antes e depois do tratamento de têmpera interrompida. São apresentados nesse item os resultados das amostras.

### 5.1 Análise Microestrutural Pós Tratamento Térmico

Na verificação de trincas e defeitos decorrentes do tratamento térmico de têmpera interrompida foi utilizado o microscópio ótico, sendo que as amostras foram preparadas sem o ataque do reagente químico para a verificação de trincas, e com ataque químico na verificação de descarbonetação. A verificação focou-se mais na superfície das amostras pois essa é uma área mais suscetível a defeitos decorrentes do tratamento térmico.

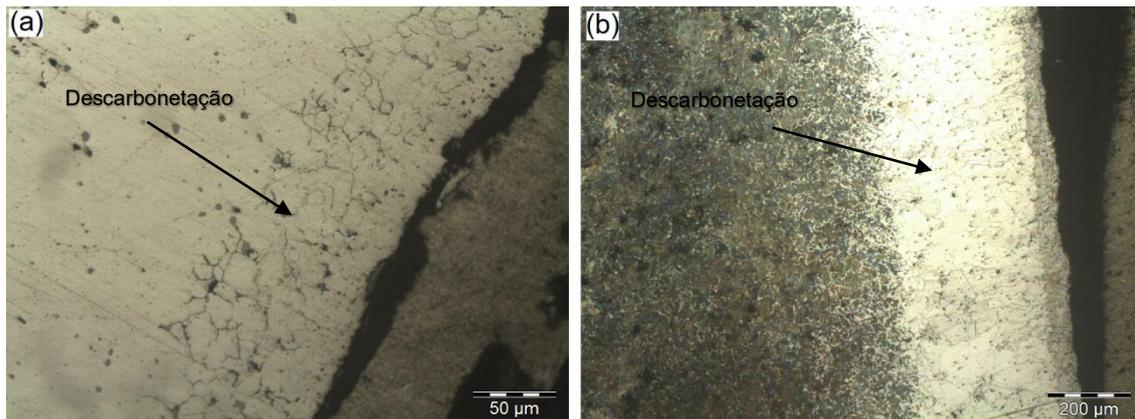
As amostras de ferro fundido nodular não apresentaram defeitos em todas as imagens analisadas, não sendo encontrado trincas e nem descarbonetações superficiais. Porém as amostras de ferro fundido maleável apresentaram não conformidades apresentadas a seguir.

#### 5.1.1 Ferro fundido maleável 10% de polímero

Todas as amostras de ferro fundido maleável apresentaram descarbonetação preliminar na sua superfície, em contrapartida nenhuma delas apresentaram trincas. As descarbonetações foram originadas no aquecimento posterior a fusão da liga e anterior a têmpera devido ao aquecimento não ter sido realizado em atmosfera controlada [1].

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 300 segundos, pode-se notar a descarbonetação na imagem tanto sem o ataque químico, Figura 12 (a); tanto como na atacada quimicamente, Figura 12 (b).

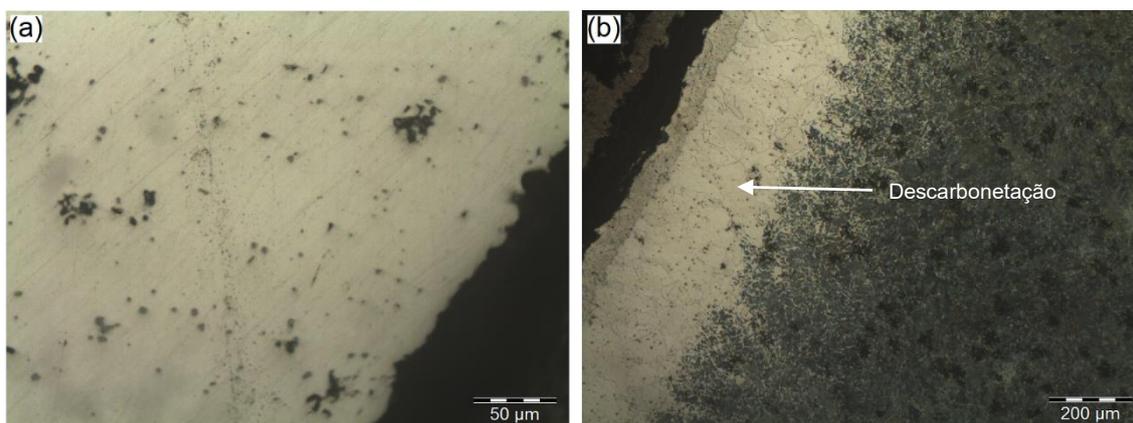
**Figura 12- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 10%/300s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



Fonte: Próprio Autor.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, não é possível notar a descarbonetação na imagem sem o ataque químico, Figura 13(a); entretanto na imagem atacada quimicamente fica nítido a descarbonetação superficial da amostra, Figura 13(b). A descarbonetação superficial colabora para a redução da resistência ao desgaste nas ligas ferrosas [2].

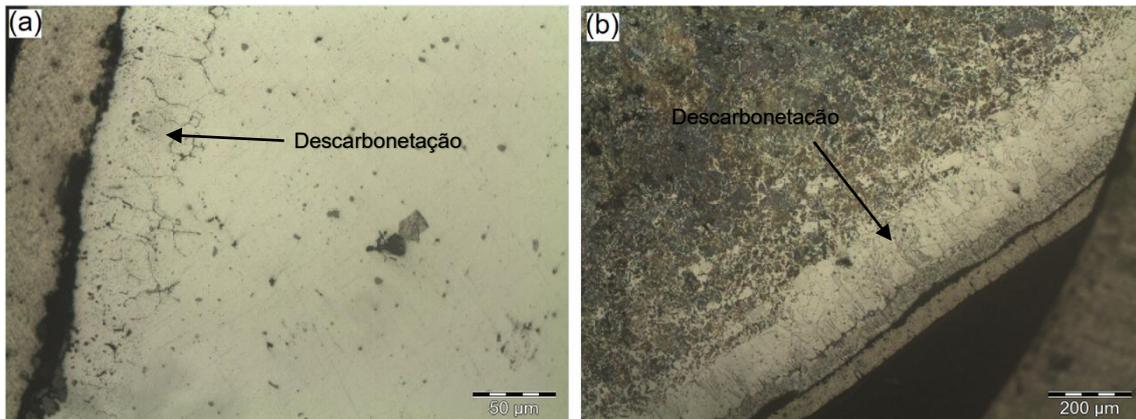
**Figura 13- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 10%/60s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



Fonte: Próprio Autor.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, pode-se notar a descarbonetação na imagem tanto sem o ataque químico, Figura 14(a); como na atacada quimicamente, Figura 14(b).

**Figura 14- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 10%/30s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



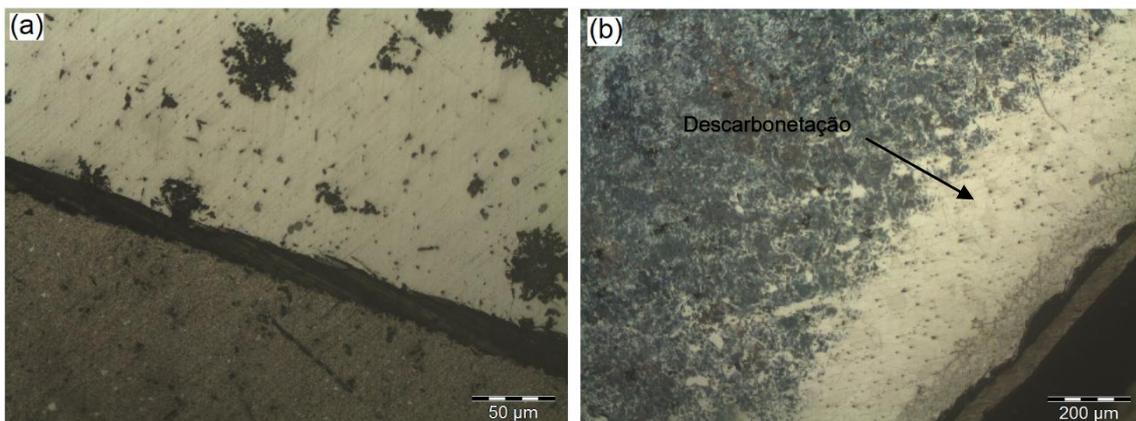
Fonte: Próprio Autor.

### 5.1.2 Ferro fundido maleável 15% de polímero

Todas as amostras de ferro fundido maleável apresentaram decarbonetação na sua superfície, em contrapartida nenhuma delas apresentaram trincas.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 300 segundos, não é possível notar a decarbonetação na imagem sem o ataque químico, Figura 15(a); entretanto na imagem atacada quimicamente fica nítido a decarbonetação superficial da amostra, Figura 15(b).

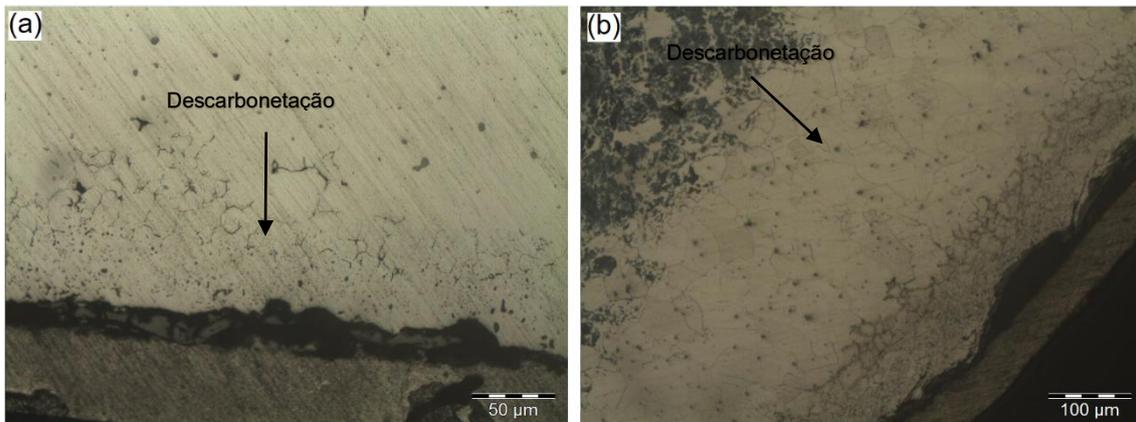
**Figura 15- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 15%/300s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



Fonte: Próprio Autor.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, pode-se notar a descarbonetação na imagem tanto sem o ataque químico, Figura 16(a); como na atacada quimicamente, Figura 16(b).

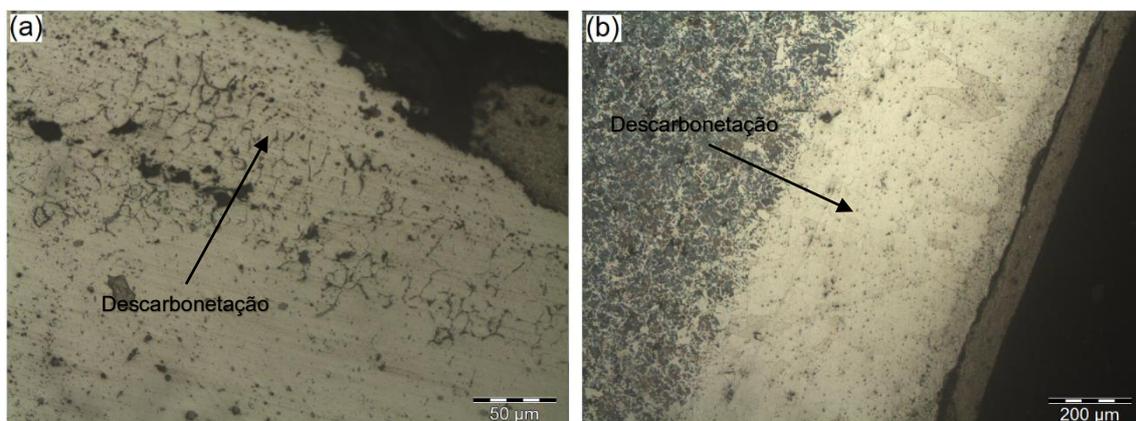
**Figura 16- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 15%/60s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



Fonte: Próprio Autor.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, pode-se notar a descarbonetação na imagem tanto sem o ataque químico, Figura 17(a); como na atacada quimicamente, Figura 17(b).

**Figura 17- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 15%/30s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



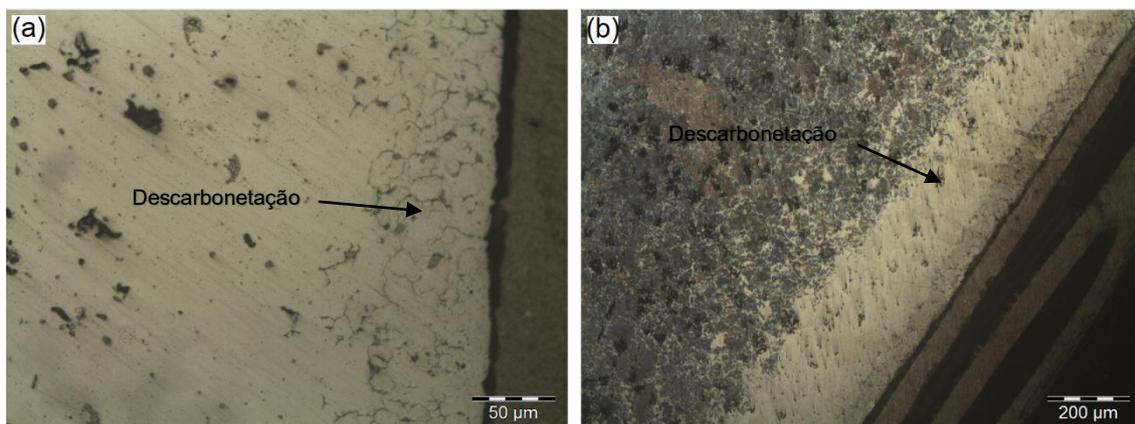
Fonte: Próprio Autor.

### 5.1.3 Ferro fundido maleável 20% de polímero

Todas as amostras de ferro fundido maleável apresentaram descarbonetação na sua superfície, em contrapartida nenhuma delas apresentaram trincas.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 300 segundos, pode-se notar a descarbonetação na imagem tanto sem o ataque químico, Figura 18(a); como na atacada quimicamente, Figura 18(b).

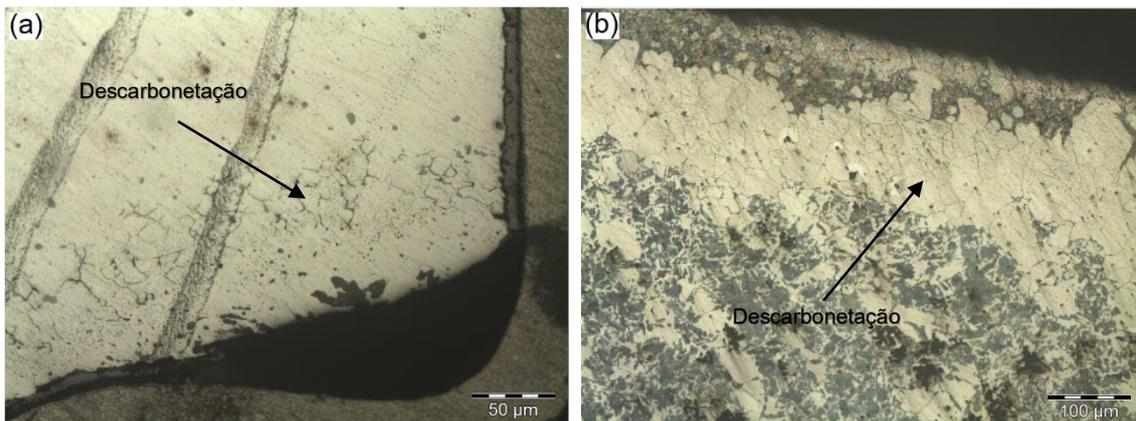
**Figura 18- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 20%/300s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



Fonte: Próprio Autor.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, pode-se notar a descarbonetação na imagem tanto sem o ataque químico, Figura 19(a); como na atacada quimicamente, Figura 19(b).

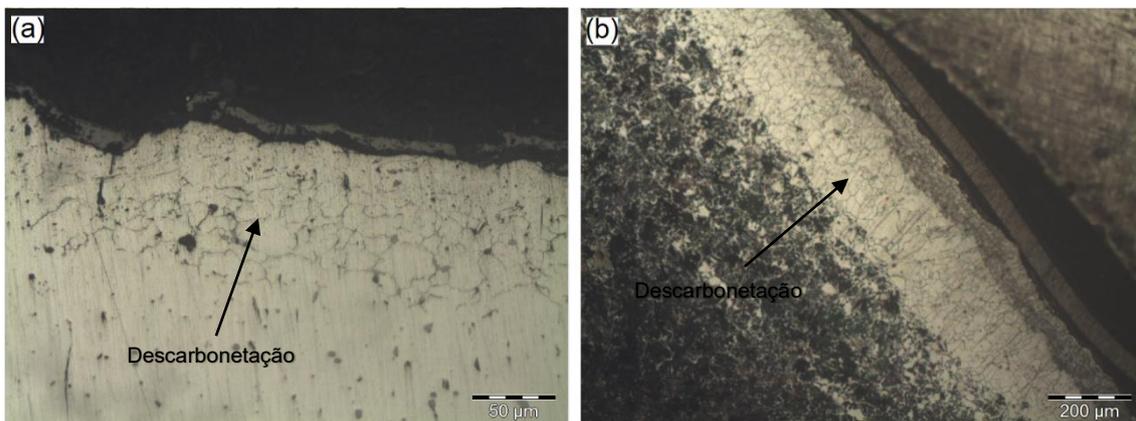
**Figura 19- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 20%/60s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



Fonte: Próprio Autor.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, pode-se notar a descarbonetação na imagem tanto sem o ataque químico, Figura 20(a); como na atacada quimicamente, Figura 20(b).

**Figura 20- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 20%/30s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



Fonte: Próprio Autor.

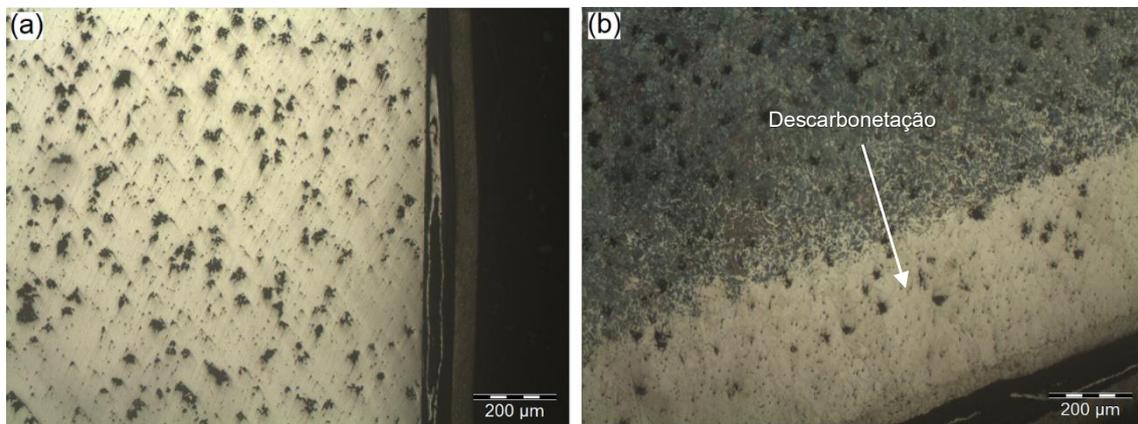
#### 5.1.4 Ferro fundido maleável 25% de polímero

Todas as amostras de ferro fundido maleável apresentaram descarbonetação na sua superfície, em contrapartida nenhuma delas apresentaram trincas.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 300 segundos, não é possível notar a descarbonetação na

imagem sem o ataque químico, Figura 21(a); entretanto na imagem atacada quimicamente fica nítido a descarbonetação superficial da amostra, Figura 21(b).

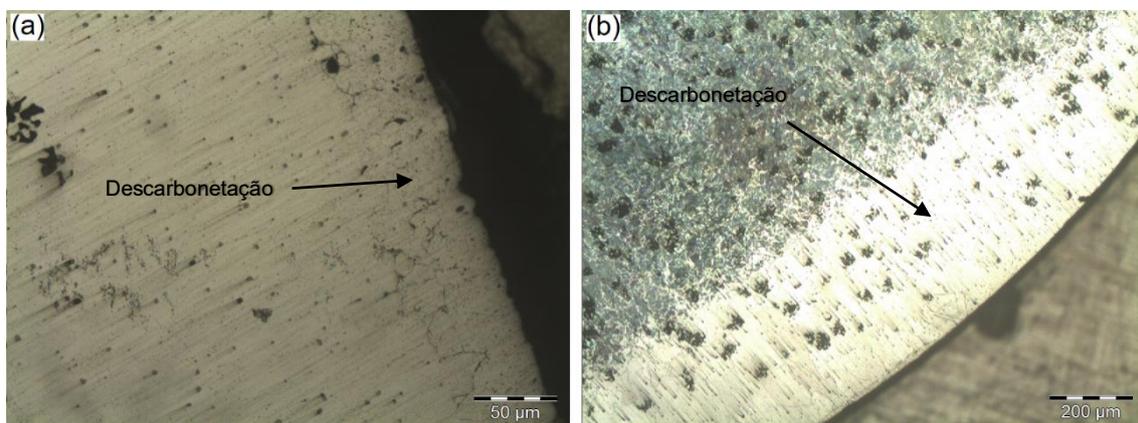
**Figura 21- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 25%/300s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



Fonte: Próprio Autor.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, pode-se notar a descarbonetação na imagem tanto sem o ataque químico, Figura 22(a); como na atacada quimicamente, Figura 22(b).

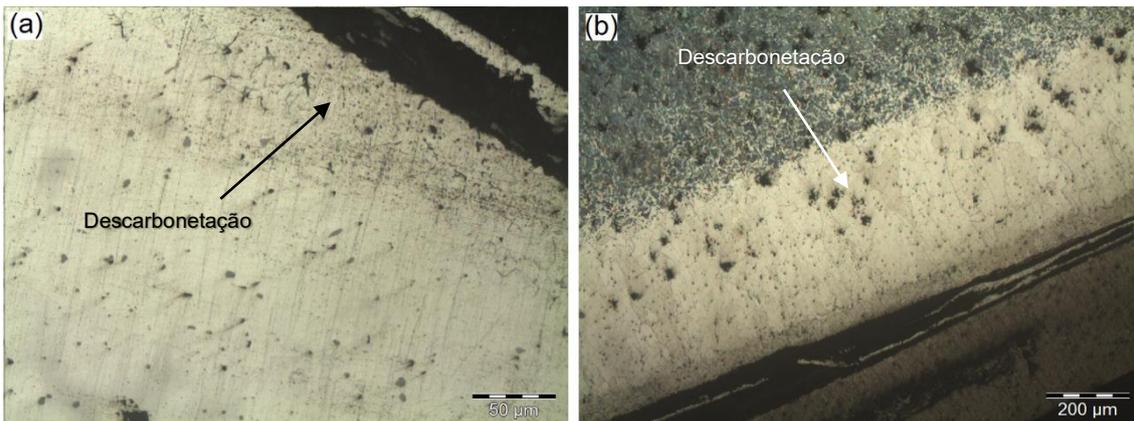
**Figura 22- Descarbonetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 25%/60s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



Fonte: Próprio Autor.

Para amostra de ferro fundido maleável temperada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, pode-se notar a descarbonetação na imagem tanto sem o ataque químico, Figura 23(a); como na atacada quimicamente, Figura 23(b).

**Figura 23- Descarboxetação da Amostra Ferro Fundido Maleável 25%/30s, (a) Sem Ataque Químico e (b) Com Ataque Químico**



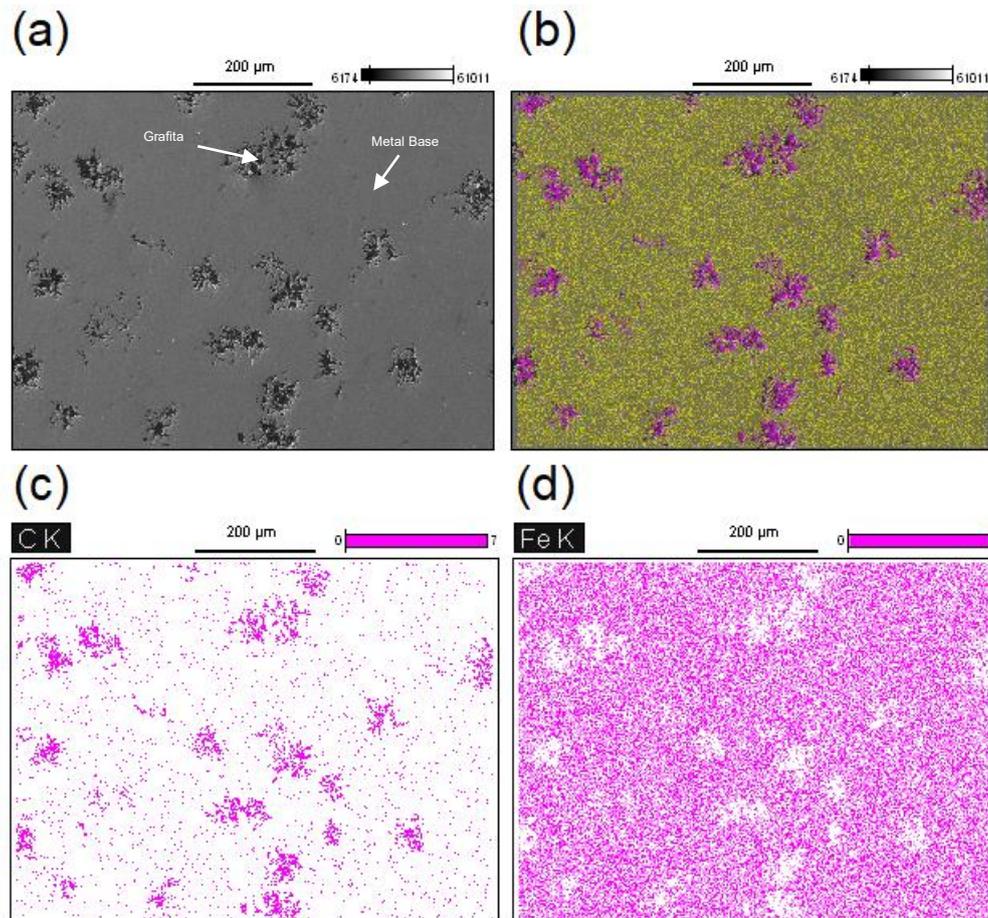
Fonte: Próprio Autor.

## 5.2 Caracterização Microestrutural

Primeiramente, a caracterização microestrutural foi realizada com auxílio do microscópio eletrônico de varredura, utilizando a microsonda EDS, para verificação do material base e da grafita. Para isso as amostras sem tratamento térmico foram preparadas para a utilização no MEV sem o ataque químico de Nital 3%. Sendo assim foi criado um mapa de distribuição dos elementos.

A Figura 24 apresenta os resultados do MEV e do EDS da amostra de ferro fundido maleável, sendo a Figura 24(a) a imagem obtida pelo MEV, a área cinza o metal base e as áreas pretas as grafitas. A Figura 24(b) mostra o mapa de distribuição de elementos para a mesma imagem 24(a), sendo em amarelo o elemento Ferro e em roxo o elemento Carbono; essa imagem comprova que os pontos em preto da Figura 24(a) são realmente grafita. As Figuras 24(c) e 24(d) mostram respectivamente o mapa de distribuição do carbono e o mapa de distribuição do ferro.

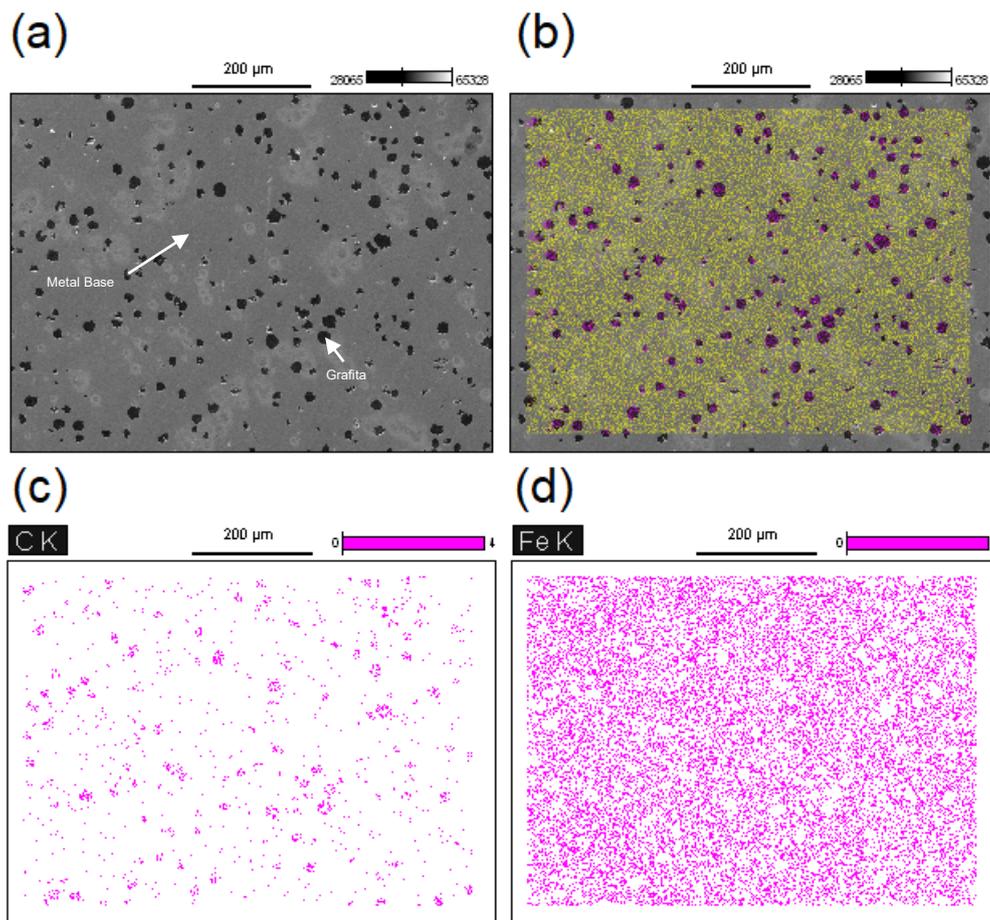
**Figura 24 - MEV da Amostra Base de Ferro Fundido Maleável sem Ataque Químico, (a) Imagem Real, (b) Mapa de Elementos, (c) Mapa do Carbono e (d) Mapa do Ferro**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 25 apresenta os resultados do MEV e do EDS da amostra de ferro fundido nodular, sendo a Figura 25(a) a imagem obtida pelo MEV, a área cinza o metal base e as áreas pretas as grafitas. A Figura 25(b) mostra o mapa de distribuição de elementos para a mesma imagem 25(a), sendo em amarelo o elemento Ferro e em roxo o elemento Carbono; essa imagem comprova que os pontos em preto da Figura 25(a) são realmente grafita. As Figuras 25(c) e 25(d) mostram respectivamente o mapa de distribuição do carbono e o mapa de distribuição do ferro.

**Figura 25- MEV da Amostra Base de Ferro Fundido Nodular sem Ataque Químico, (a) Imagem Real, (b) Mapa de Elementos, (c) Mapa do Carbono e (d) Mapa do Ferro**

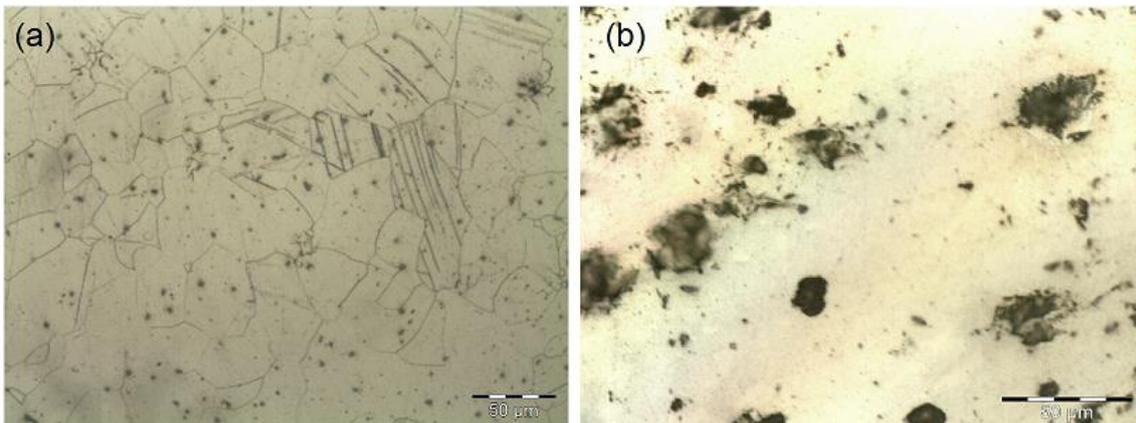


Fonte: Próprio Autor.

Após, as amostras foram novamente preparadas, sendo que também foram atacadas quimicamente com Nital 3% para o aparecimento de suas microestruturas no metal de base, sendo feitas imagens destas microestruturas formadas.

A Figura 26(a) apresenta a microestrutura da amostra de ferro fundido maleável sem o processo de têmpera interrompida, onde podemos verificar a presença de austenita em uma coloração mais clara, e da grafita em uma coloração preta. A Figura 26(b) apresenta a microestrutura da amostra de ferro fundido nodular antes do processo de têmpera interrompida; presente em uma cor mais clara a austenita e em preto a grafita.

**Figura 26 - Microestrutura Base das Amostras de Ferro Fundido, (a) Maleável e (b) Nodular**



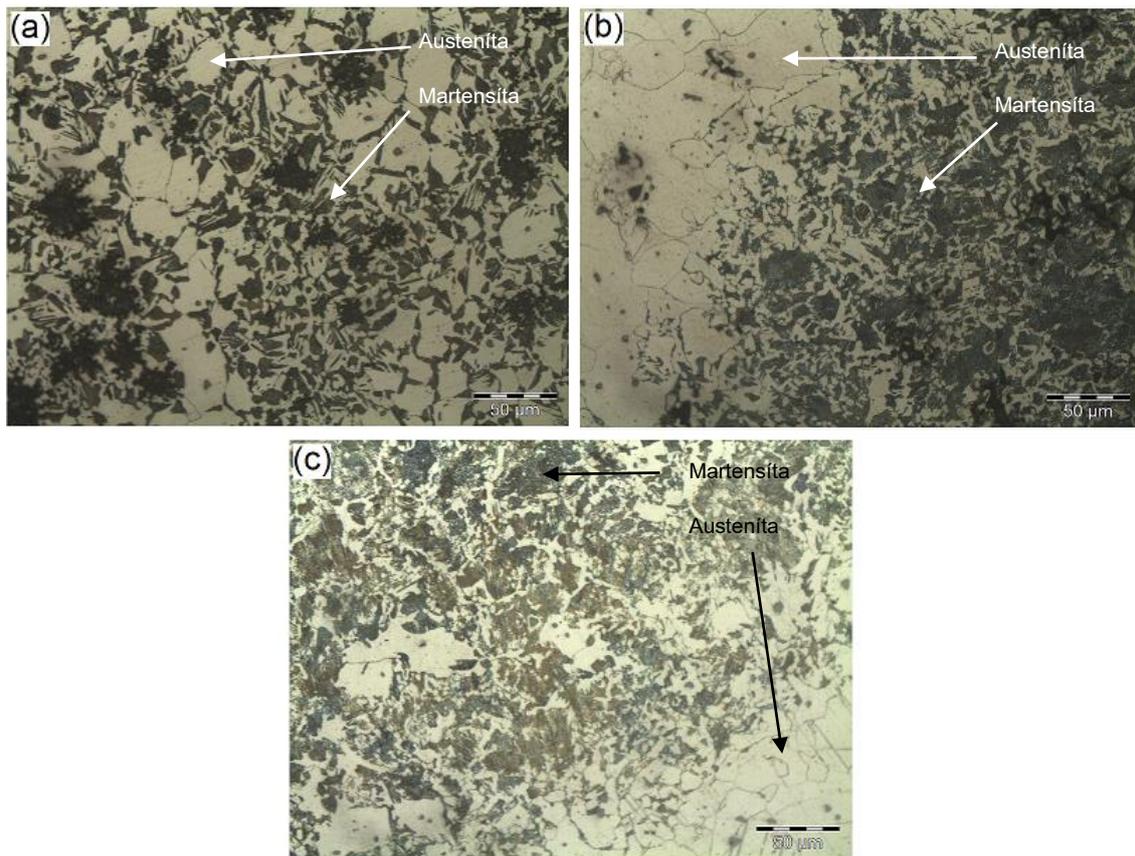
Fonte: Próprio Autor.

### 5.2.1 Polímero 10%

As amostras de ferro fundido maleável apresentaram uma microestrutura muito parecida com as encontradas por Santofimia (2011) no processo de têmpera e partição, sendo constituído de uma matriz austenítica e ilhas de martensita.

As amostras expostas na Figura 27, apresentam as microestruturas do ferro fundido maleável pós têmpera interrompida. A Figura 27(a) apresenta a microestrutura da amostra retirada com o tempo de resfriamento de 300 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras constituídas de martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 27(b) a amostra retirada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras são martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 27(c) a amostra foi retirada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, e assim como as amostras anteriores apresenta uma região clara de austenita, uma região escura constituída de martensita e regiões pretas de grafita.

**Figura 27 - Microestrutura das Amostras Tratadas em 10% de Polímero do Ferro Fundido Maleável nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**

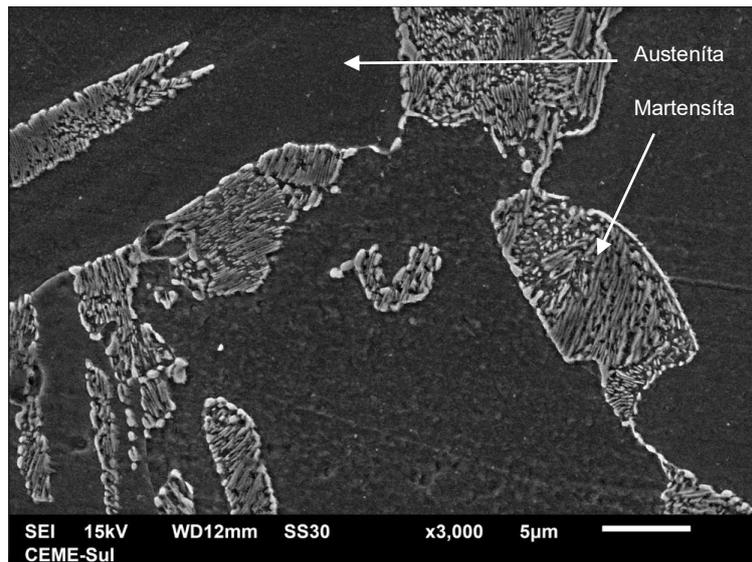


Fonte: Próprio Autor.

Com o auxílio do microscópio ótico de varredura, que consegue magnitudes maiores que um microscópio eletrônico, pode-se identificar a estrutura da martensita mais claramente.

A Figura 28 apresenta a imagem formada em uma das amostras de ferro fundido maleável, da microestrutura martensítica, região mais clara e a microestrutura austenítica na região mais escura.

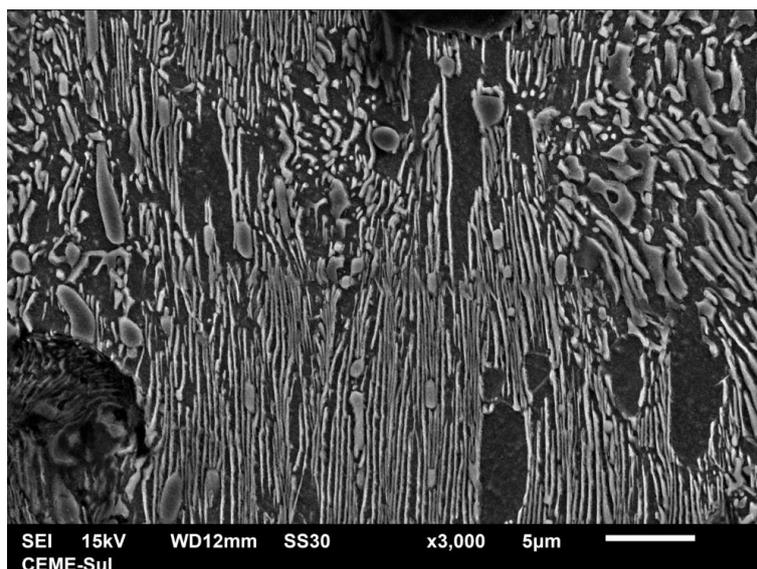
**Figura 28 – MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Maleável Tratada com 10% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 29 mostra uma região martensítica da amostra de ferro fundido maleável, sendo possível visualizar melhor o padrão dessa microestrutura.

**Figura 29 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Maleável Tratada com 10% de Polímero.**

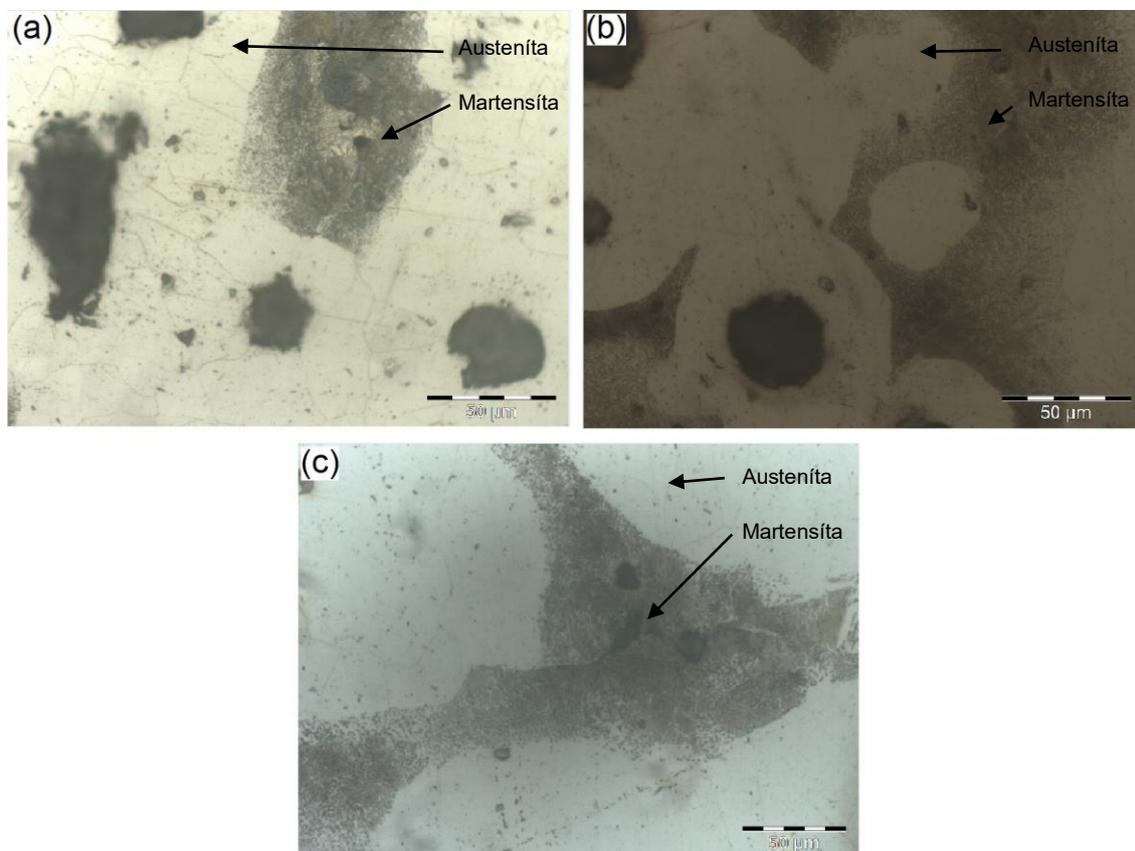


Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido nodular, a microestrutura martensítica comportou-se de uma maneira similar a encontrada por Hellal (1999). Diferenciando que Hellal (1999) obteve uma matriz bainítica e no presente estudo foi encontrado uma matriz austenítica.

As amostras apresentadas na Figura 30, apresentam as microestruturas do ferro fundido Nodular pós têmpera interrompida. A Figura 30(a) apresenta a microestrutura da amostra retirada com o tempo de resfriamento de 300 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras constituídas de martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 30(b) a amostra retirada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras são martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 30(c) a amostra foi retirada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, e assim como as amostras anteriores apresenta uma região clara de austenita, uma região escura constituída de martensita e regiões pretas de grafita.

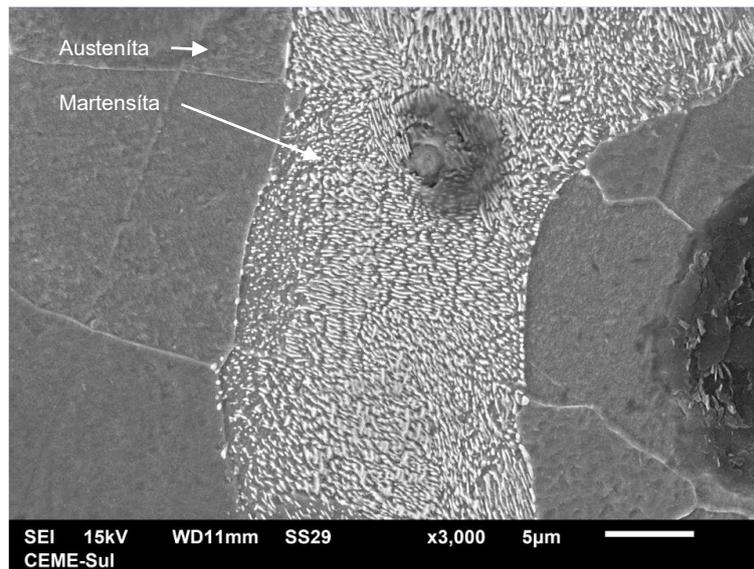
**Figura 30- Microestrutura das Amostras Tratadas em 10% de Polímero do Ferro Fundido Nodular nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 31 apresenta a imagem formada em uma das amostras de ferro fundido Nodular, da microestrutura martensítica, região mais clara e a microestrutura austenítica na região mais escura.

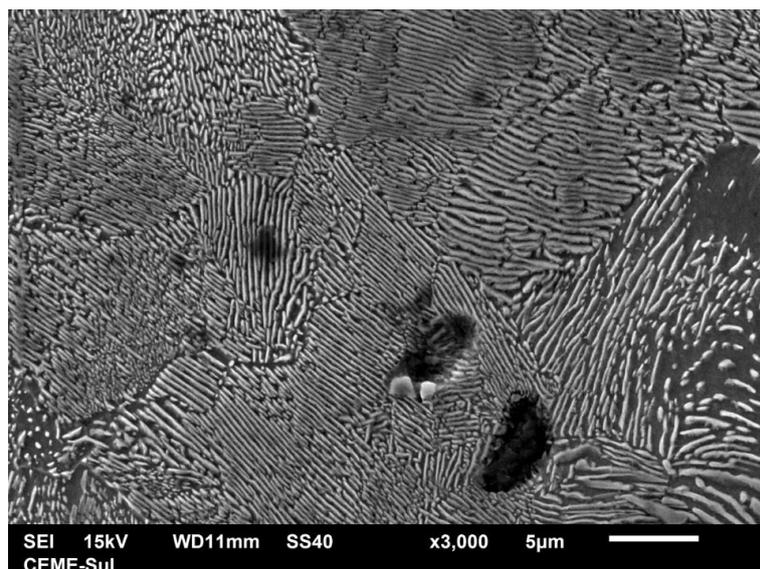
**Figura 31– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Tratada com 10% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 32 mostra uma região martensítica da amostra de ferro fundido Nodular, sendo possível visualizar melhor o padrão dessa microestrutura.

**Figura 32 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Nodular Tratada com 10% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

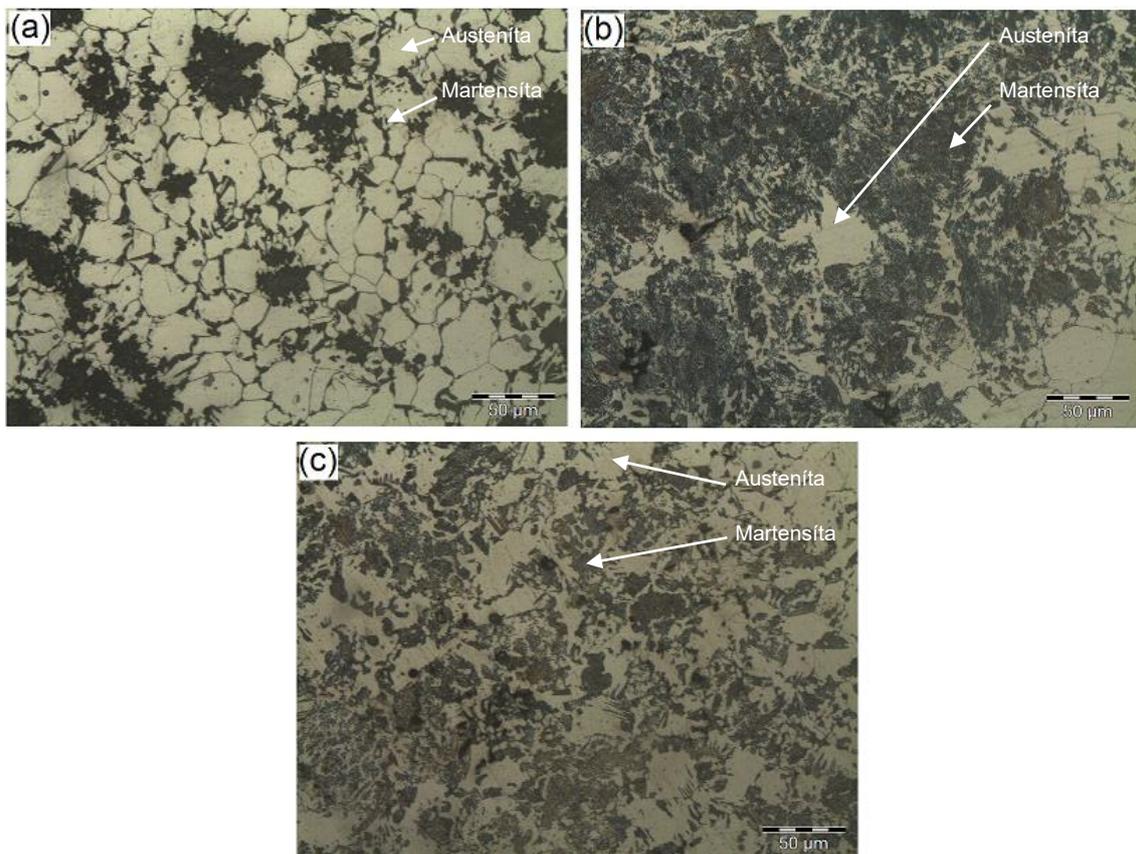
### 5.2.2 Polímero 15%

As amostras de ferro fundido maleável apresentaram uma microestrutura muito parecida com as encontradas por Santofimia (2011) no

processo de têmpera e partição, sendo constituído de uma matriz austenítica e ilhas de martensita.

As amostras expostas na Figura 33, apresentam as microestruturas do ferro fundido maleável pós têmpera interrompida. A Figura 33(a) apresenta a microestrutura da amostra retirada com o tempo de resfriamento de 300 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras constituídas de martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 33(b) a amostra retirada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras são martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 33(c) a amostra foi retirada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, e assim como as amostras anteriores apresenta uma região clara de austenita, uma região escura constituída de martensita e regiões pretas de grafita.

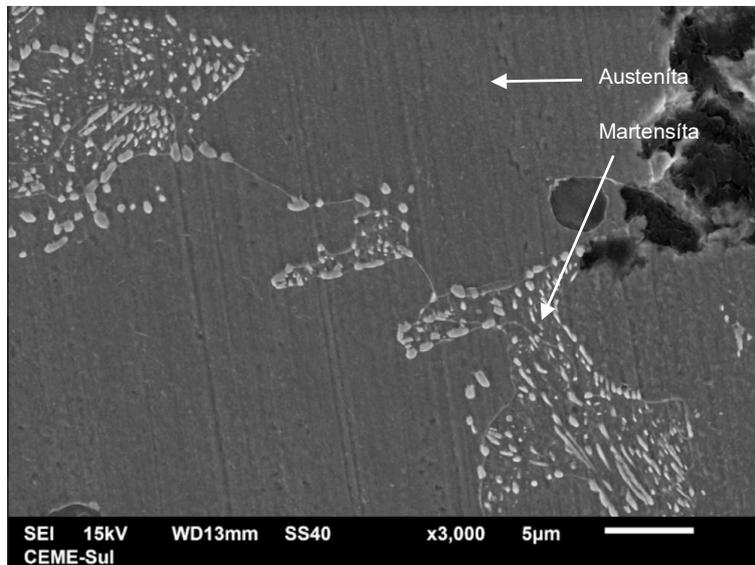
**Figura 33- Microestrutura das Amostras Tratadas em 15% de Polímero do Ferro Fundido Maleável nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 34 apresenta a imagem formada em uma das amostras de ferro fundido maleável, da microestrutura martensítica, região mais clara e a microestrutura austenítica na região mais escura.

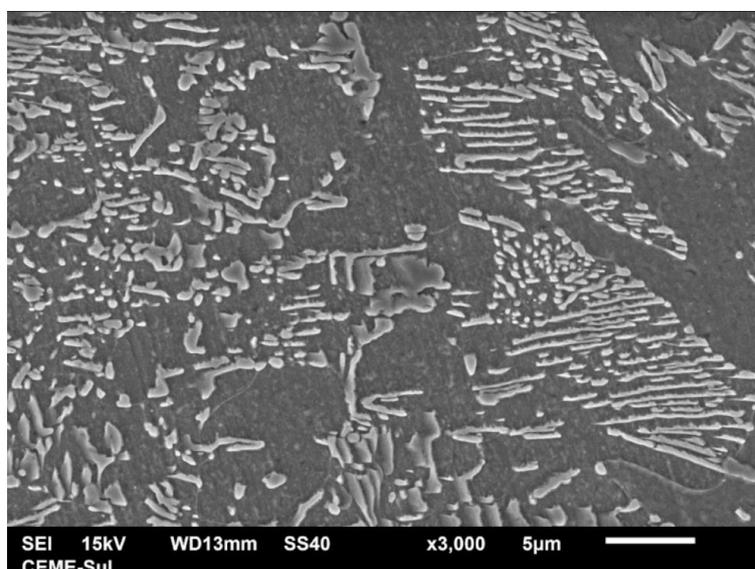
**Figura 34 – MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Maleável Tratada com 15% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 35 mostra uma região martensítica da amostra de ferro fundido maleável, sendo possível visualizar melhor o padrão dessa microestrutura.

**Figura 35 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Maleável Tratada com 15% de Polímero.**

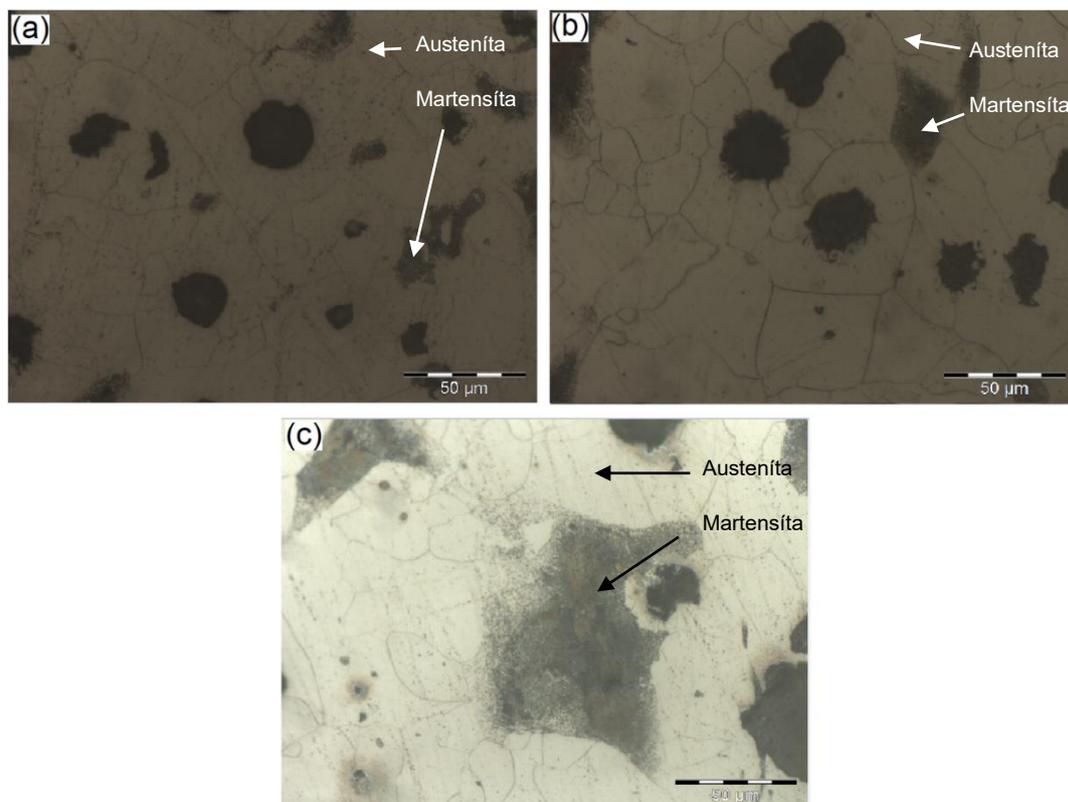


Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido nodular, a microestrutura martensítica comportou-se de uma maneira similar a encontrada por Hellal (1999). Diferenciando que Hellal (1999) obteve uma matriz bainítica e no presente estudo foi encontrado uma matriz austenítica.

As amostras apresentadas na Figura 36, apresentam as microestruturas do ferro fundido Nodular pós têmpera interrompida. A Figura 36(a) apresenta a microestrutura da amostra retirada com o tempo de resfriamento de 300 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras constituídas de martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 36(b) a amostra retirada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras são martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 36(c) a amostra foi retirada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, e assim como as amostras anteriores apresenta uma região clara de austenita, uma região escura constituída de martensita e regiões pretas de grafita.

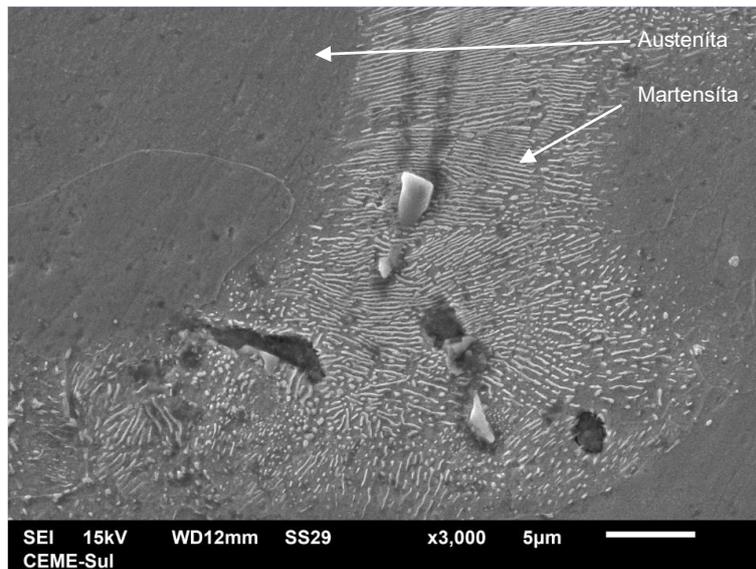
**Figura 36- Microestrutura das Amostras Tratadas em 15% de Polímero do Ferro Fundido Nodular nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 37 apresenta a imagem formada em uma das amostras de ferro fundido Nodular, da microestrutura martensítica, região mais clara e a microestrutura austenítica na região mais escura.

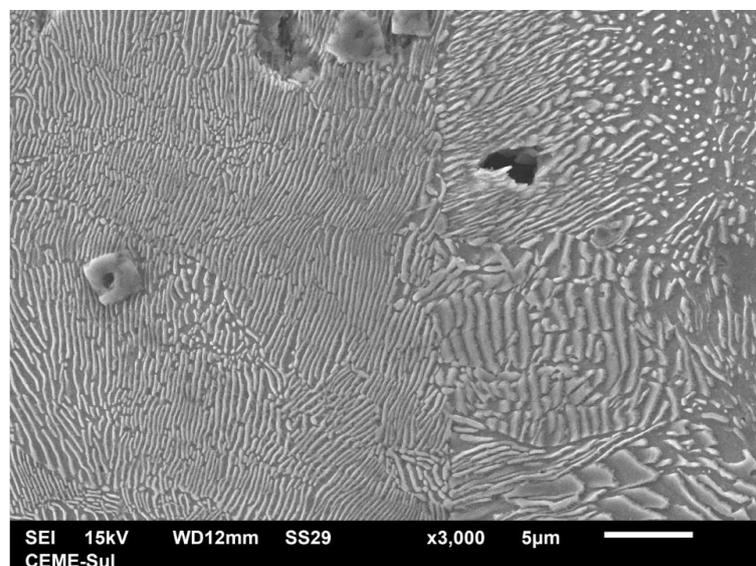
**Figura 37– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Tratada com 15% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 38 mostra uma região martensítica da amostra de ferro fundido Nodular, sendo possível visualizar melhor o padrão dessa microestrutura.

**Figura 38 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Nodular Tratada com 15% de Polímero.**



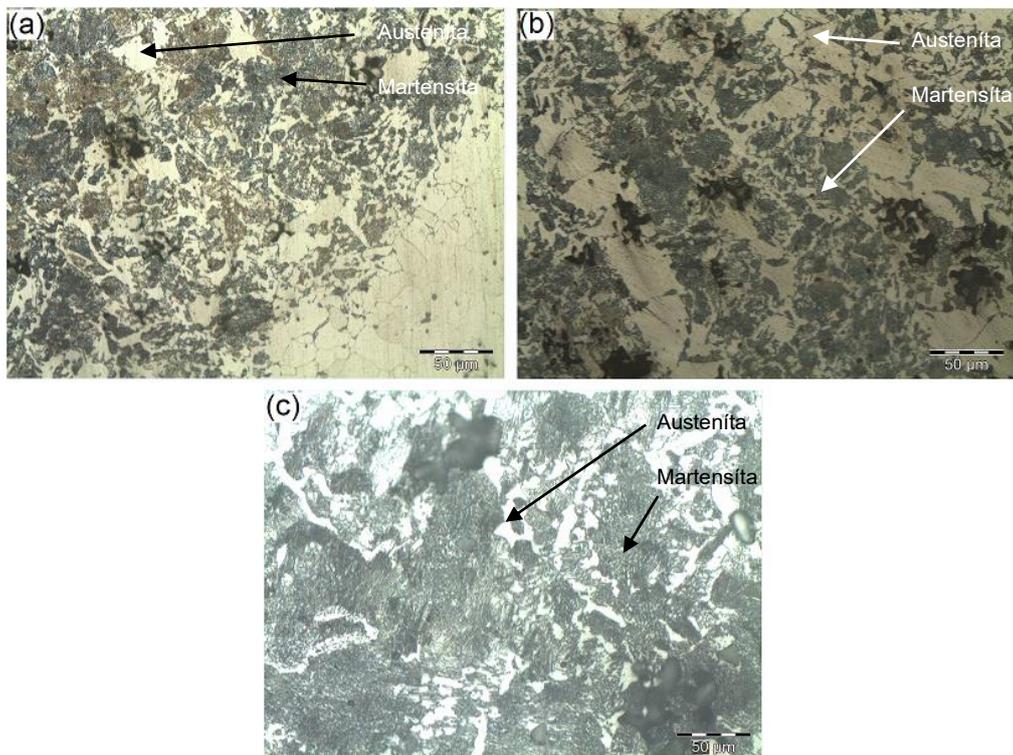
Fonte: Próprio Autor.

### 5.2.3 Polímero 20%

As amostras de ferro fundido maleável apresentaram uma microestrutura muito parecida com as encontradas por Santofimia (2011) no processo de têmpera e partição, sendo constituído de uma matriz austenítica e ilhas de martensita.

As amostras expostas na Figura 39, apresentam as microestruturas do ferro fundido maleável pós têmpera interrompida. A Figura 39(a) apresenta a microestrutura da amostra retirada com o tempo de resfriamento de 300 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras constituídas de martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 39(b) a amostra retirada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras são martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 39(c) a amostra foi retirada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, e assim como as amostras anteriores apresenta uma região clara de austenita, uma região escura constituída de martensita e regiões pretas de grafita.

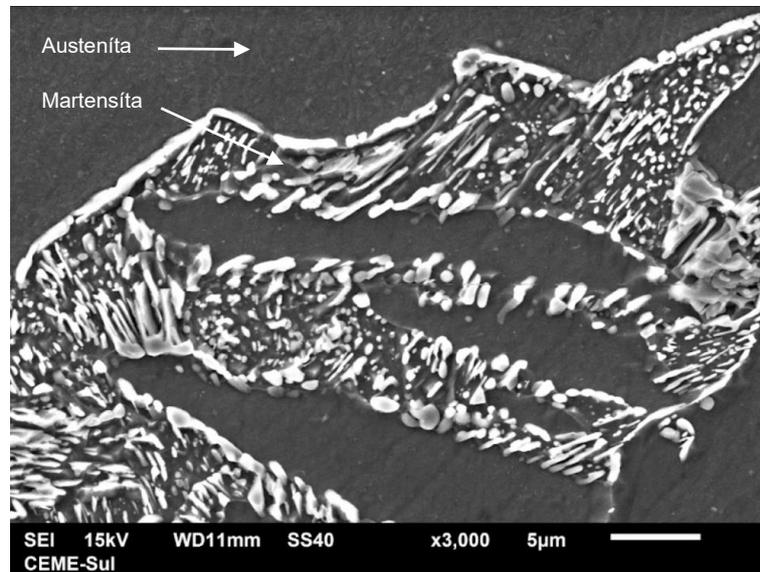
**Figura 39- Microestrutura das Amostras Tratadas em 20% de Polímero do Ferro Fundido Maleável nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 40 apresenta a imagem formada em uma das amostras de ferro fundido maleável, da microestrutura martensítica, região mais clara e a microestrutura austenítica na região mais escura.

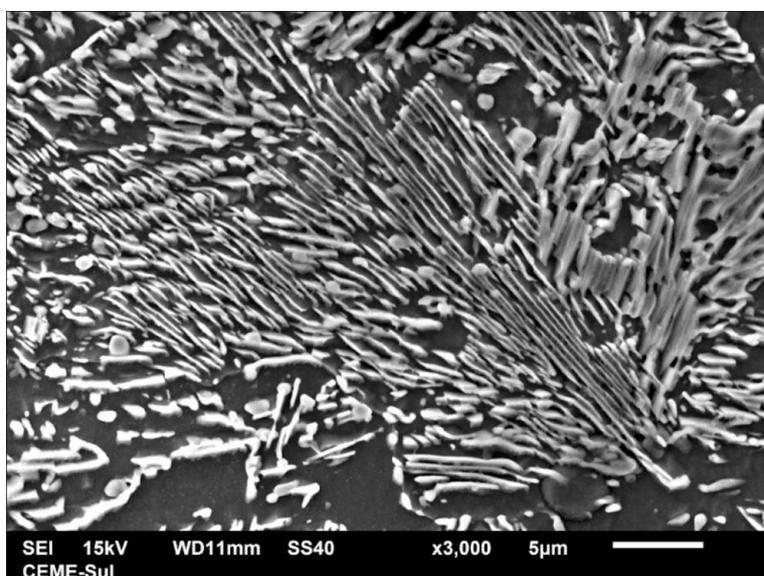
**Figura 40– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Maleável Tratada com 20% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 41 mostra uma região martensítica da amostra de ferro fundido maleável, sendo possível visualizar melhor o padrão dessa microestrutura.

**Figura 41 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Maleável Tratada com 20% de Polímero.**

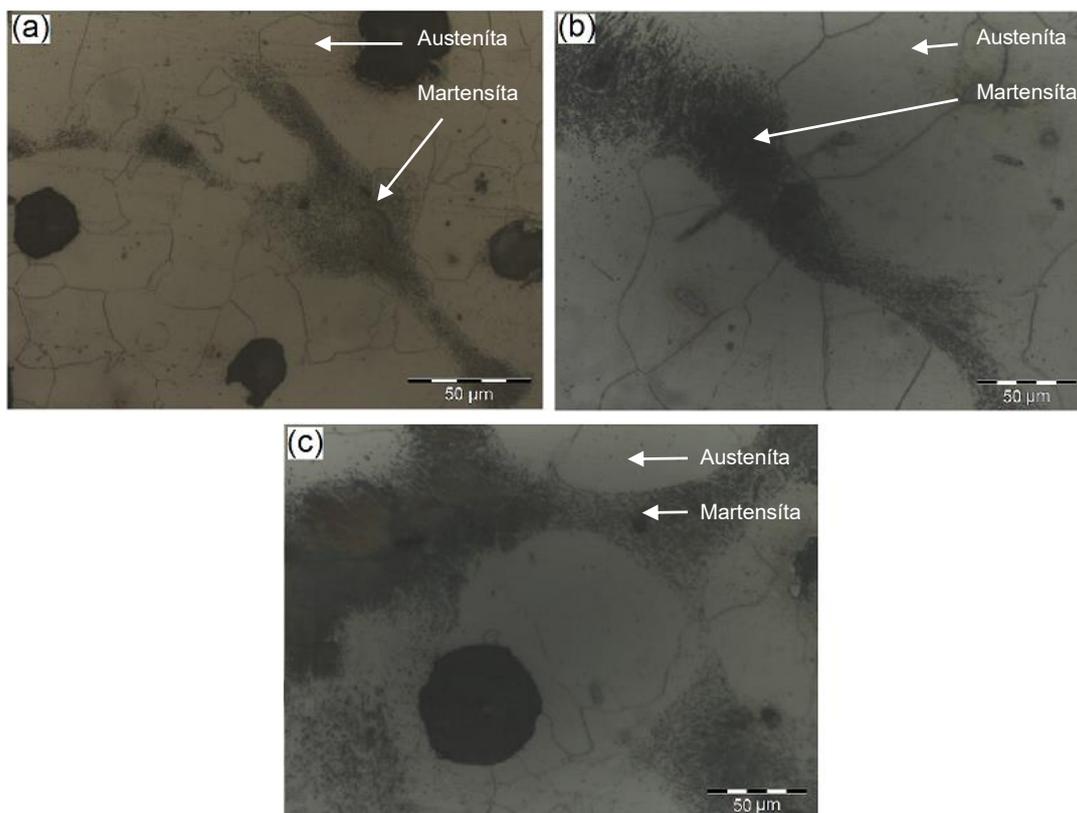


Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido nodular, a microestrutura martensítica comportou-se de uma maneira similar a encontrada por Hellal (1999). Diferenciando que Hellal (1999) obteve uma matriz bainítica e no presente estudo foi encontrado uma matriz austenítica.

As amostras apresentadas na Figura 42, apresentam as microestruturas do ferro fundido Nodular pós têmpera interrompida. A Figura 42(a) apresenta a microestrutura da amostra retirada com o tempo de resfriamento de 300 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras constituídas de martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 42(b) a amostra retirada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras são martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 42(c) a amostra foi retirada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, e assim como as amostras anteriores apresenta uma região clara de austenita, uma região escura constituída de martensita e regiões pretas de grafita.

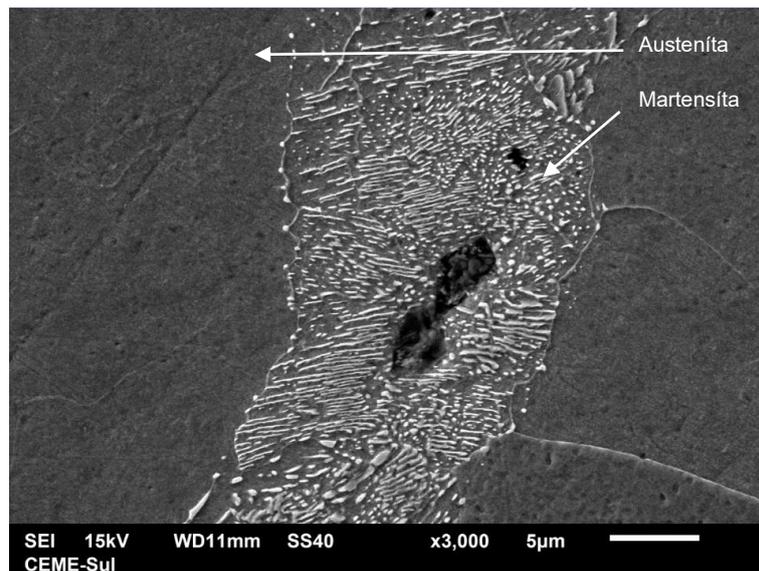
**Figura 42- Microestrutura das Amostras Tratadas em 20% de Polímero do Ferro Fundido Nodular nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 43 apresenta a imagem formada em uma das amostras de ferro fundido Nodular, da microestrutura martensítica, região mais clara e a microestrutura austenítica na região mais escura.

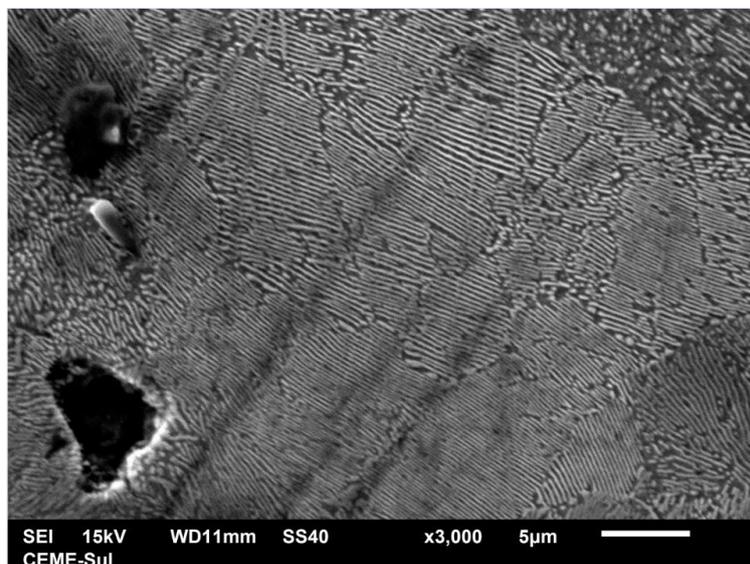
**Figura 43– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Tratada com 20% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 44 mostra uma região martensítica da amostra de ferro fundido Nodular, sendo possível visualizar melhor o padrão dessa microestrutura.

**Figura 44 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Nodular Tratada com 20% de Polímero.**



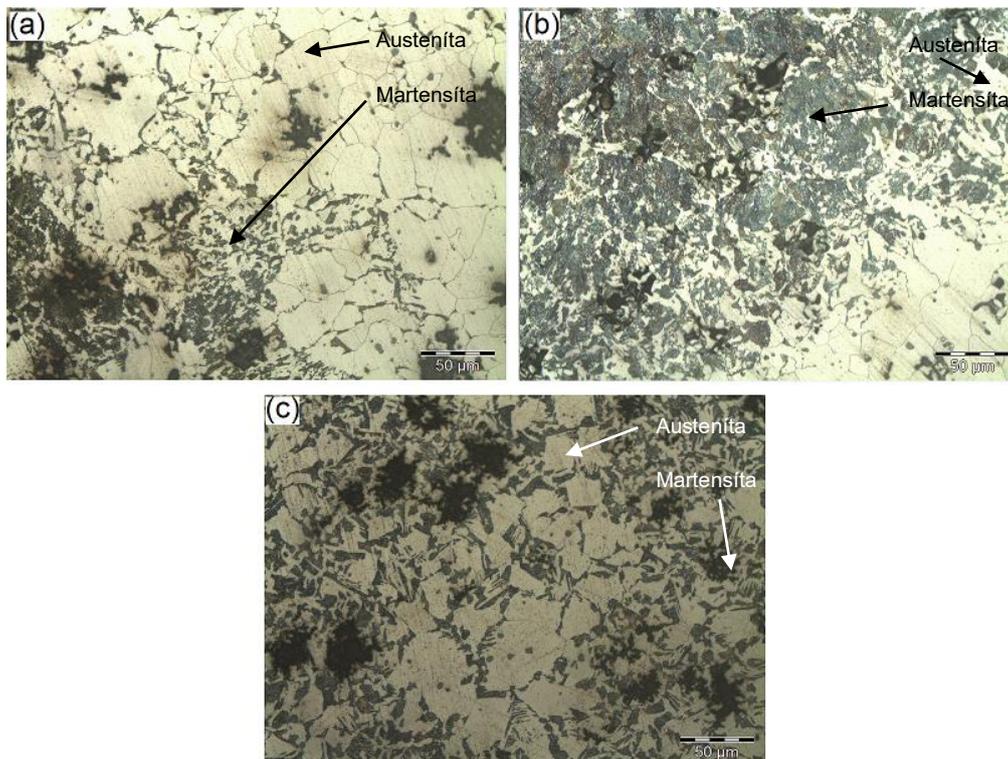
Fonte: Próprio Autor.

#### 5.2.4 Polímero 25%

As amostras de ferro fundido maleável apresentaram uma microestrutura muito parecida com as encontradas por Santofimia (2011) no processo de têmpera e partição, sendo constituído de uma matriz austenítica e ilhas de martensita.

As amostras expostas na Figura 45, apresentam as microestruturas do ferro fundido maleável pós têmpera interrompida. A Figura 45(a) apresenta a microestrutura da amostra retirada com o tempo de resfriamento de 300 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras constituídas de martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 45(b) a amostra retirada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras são martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 45(c) a amostra foi retirada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, e assim como as amostras anteriores apresenta uma região clara de austenita, uma região escura constituída de martensita e regiões pretas de grafita.

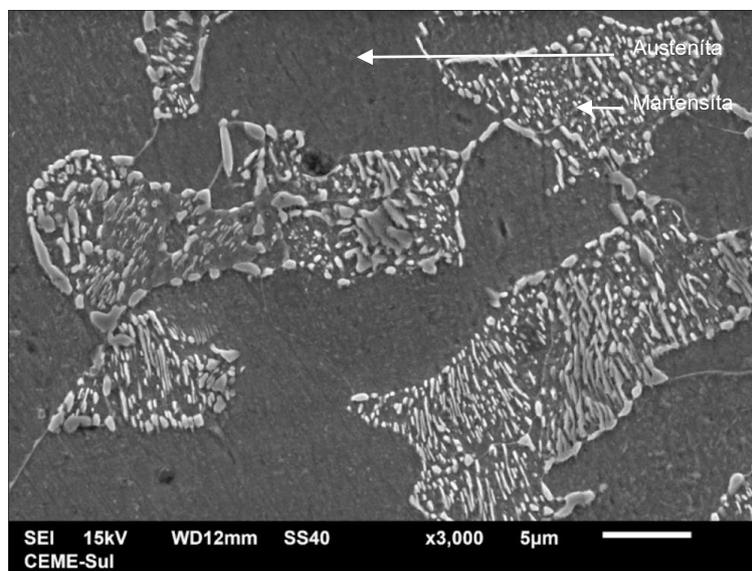
**Figura 45- Microestrutura das Amostras Tratadas em 25% de Polímero do Ferro Fundido Maleável nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 46 apresenta a imagem formada em uma das amostras de ferro fundido maleável, da microestrutura martensítica, região mais clara e a microestrutura austenítica na região mais escura.

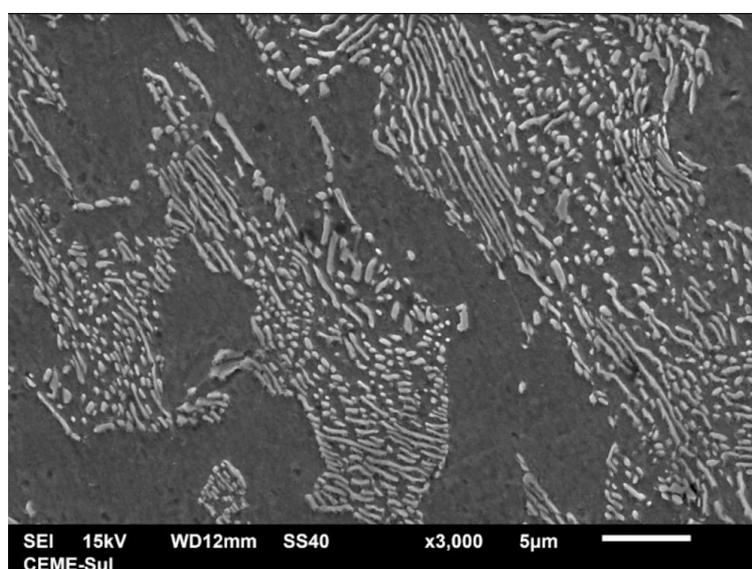
**Figura 46 – MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Maleável Tratada com 25% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 47 mostra uma região martensítica da amostra de ferro fundido maleável, sendo possível visualizar melhor o padrão dessa microestrutura.

**Figura 47 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Maleável Tratada com 25% de Polímero.**

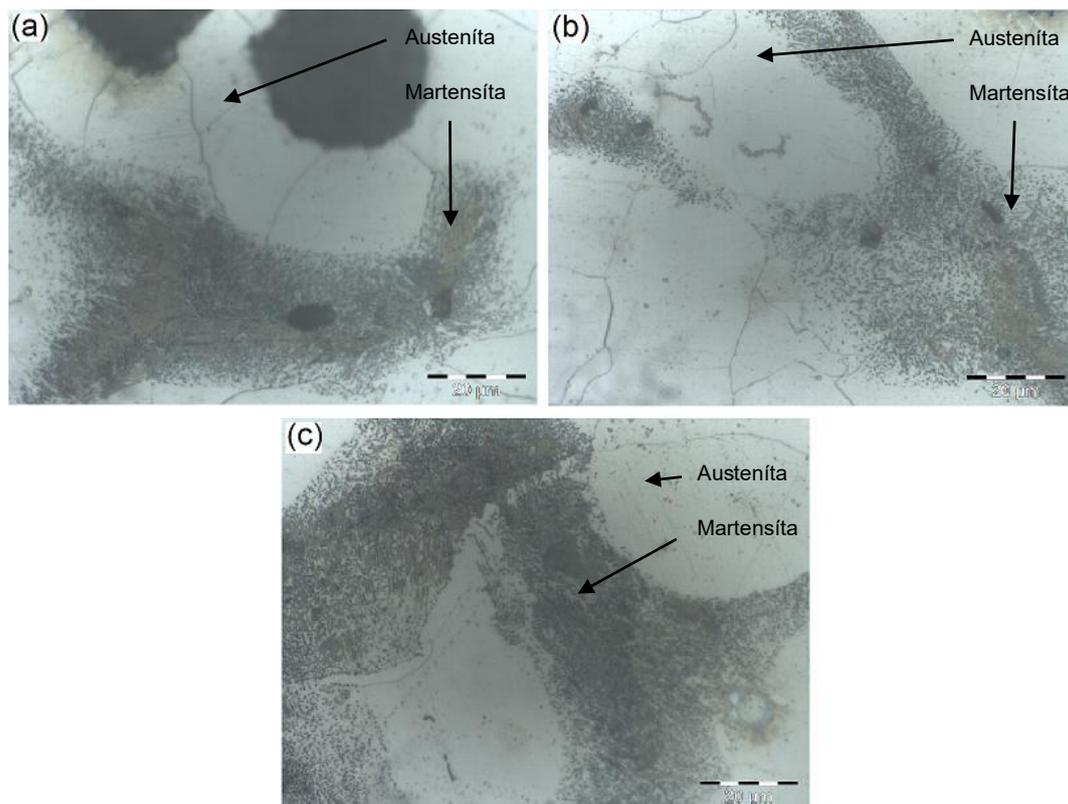


Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido nodular, a microestrutura martensítica comportou-se de uma maneira similar a encontrada por Hellal (1999). Diferenciando que Hellal (1999) obteve uma matriz bainítica e no presente estudo foi encontrado uma matriz austenítica.

As amostras expostas na Figura 48, apresentam as microestruturas do ferro fundido Nodular pós têmpera interrompida. A Figura 48(a) apresenta a microestrutura da amostra retirada com o tempo de resfriamento de 300 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras constituídas de martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 48(b) a amostra retirada com um tempo de resfriamento de 60 segundos, onde as regiões mais claras são austenita, as regiões mais escuras são martensita e as regiões pretas a grafita. Na Figura 48(c) a amostra foi retirada com um tempo de resfriamento de 30 segundos, e assim como as amostras anteriores apresenta uma região clara de austenita, uma região escura constituída de martensita e regiões pretas de grafita.

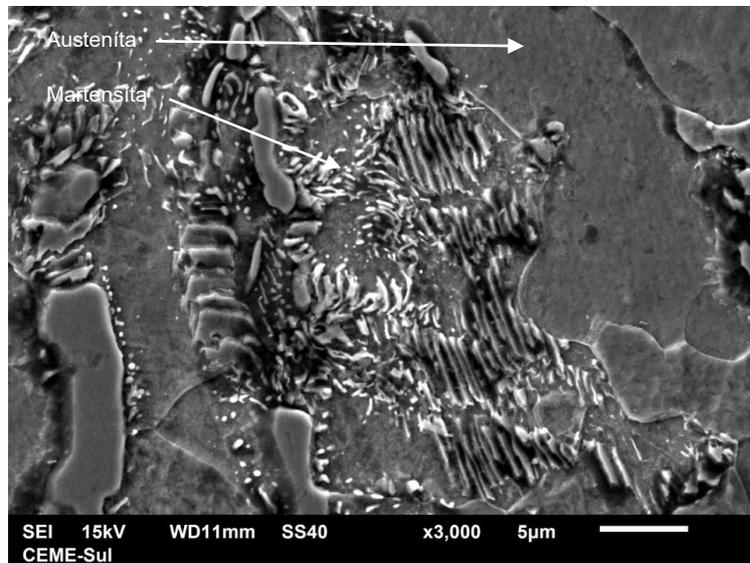
**Figura 48- Microestrutura das Amostras Tratadas em 25% de Polímero do Ferro Fundido Nodular nos Tempos: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 49 apresenta a imagem formada em uma das amostras de ferro fundido Nodular, da microestrutura martensítica, região mais clara e a microestrutura austenítica na região mais escura.

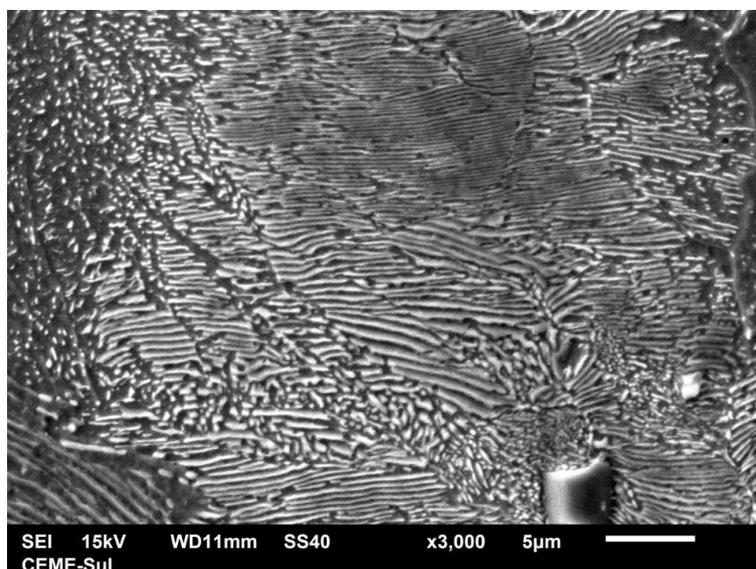
**Figura 49– MEV da Microestrutura do Ferro Fundido Nodular Tratada com 25% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 50 mostra uma região martensítica da amostra de ferro fundido Nodular, sendo possível visualizar melhor o padrão dessa microestrutura.

**Figura 50 – MEV da Martensita do Ferro Fundido Nodular Tratada com 25% de Polímero.**



Fonte: Próprio Autor.

### 5.3 Proporção De Fases

Com auxílio do *software* de análise de imagens ImageJ, pode-se calcular a fração aparente de cada fase, austenita e martensita, presente nas amostras tratadas por têmpera interrompida. Seguindo como base a norma ASTM E1245-3 foram feitas as medias de 5 imagens aleatórias de cada amostra.

#### 5.3.1 Polímero 10%

A Tabela 4 mostra os resultados médios de cada amostra tratada em uma concentração de 10% de polímero obtidos pelo processamento de imagens, como o procedimento faz uma análise de cores, a martensita e a grafita ficam ambas pretas, sendo assim foi utilizado a porcentagem de austenita para comparação. Com os resultados pode-se perceber que as amostras de ferro fundido maleável não variaram muito a porcentagem de austenita conforme muda-se o tempo de resfriamento, essa baixa variação de área de austenita conforme o tempo também é observado nas amostras de ferro fundido nodular. Se compararmos as amostras de ferro fundido maleável com as amostras de ferro fundido nodular verifica-se uma maior área de austenita nas amostras de ferro fundido nodular.

**Tabela 2 - Proporção de Austenita das Amostras Temperada em 10% de Polímero**

| Tempo (s) | Amostras (% austenita) |         |
|-----------|------------------------|---------|
|           | Maleável               | Nodular |
| 300       | 50,15                  | 72,33   |
| 60        | 51,57                  | 65,81   |
| 30        | 46,34                  | 68,87   |

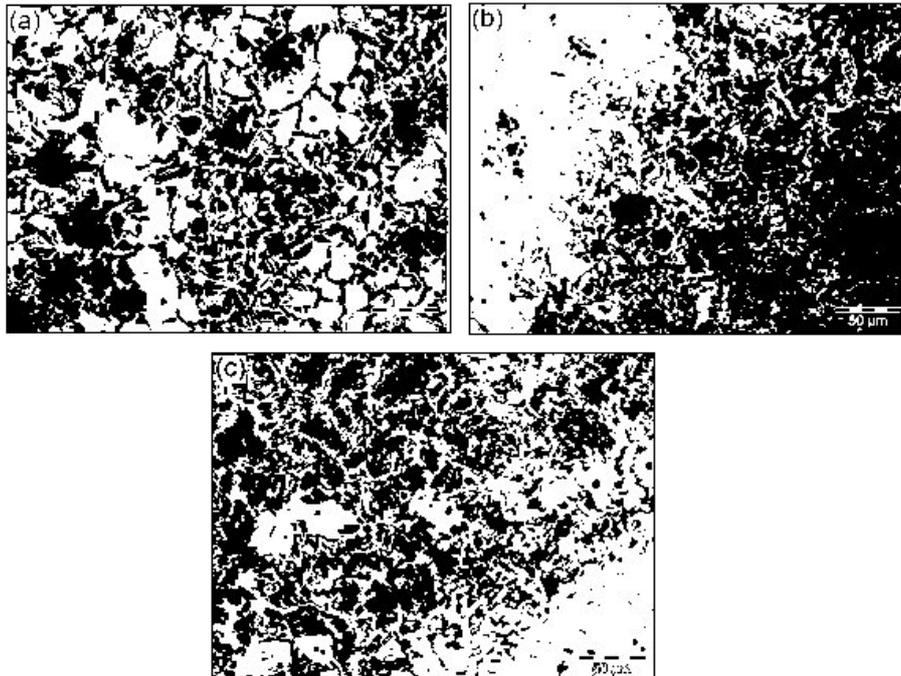
Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido maleável a proporção de martensita teve pouca variação para os diferentes tempos de têmpera interrompida.

A Figura 51(a) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada com o tempo de 300 segundos após a análise pelo *software* ImageJ, sendo as partes em preto a martensita somada com a grafita, e a área em branco a austenita. A Figura 51(b) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada

no tempo de 60 segundos, onde a área preta representa a martensita e a grafita, e a área escura representa a austenita. A Figura 51(C) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada no tempo de 30 segundos, e assim como as outras duas amostras em preto apresenta-se a martensita e a grafita, e em branco a austenita.

**Figura 51 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Maleável Temperado em 10% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**

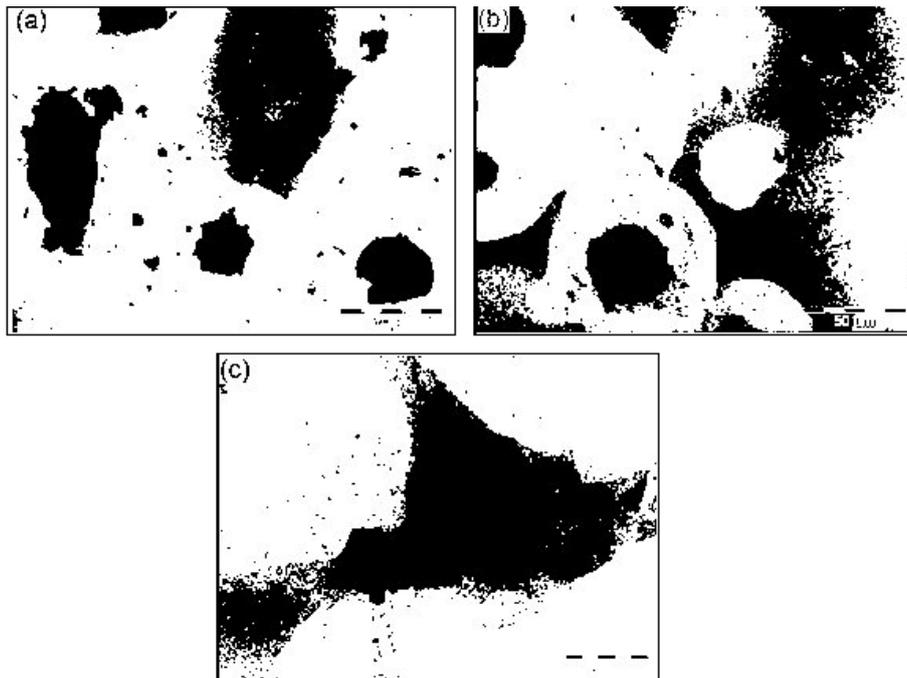


Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido Nodular a proporção de martensita teve pouca variação para os diferentes tempos de têmpera interrompida.

A Figura 52(a) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada com o tempo de 300 segundos após a análise pelo *software* ImageJ, sendo as partes em preto a martensita somada com a grafita, e a área em branco a austenita. A Figura 52(b) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada no tempo de 60 segundos, onde a área preta representa a martensita e a grafita, e a área escura representa a austenita. A Figura 52(c) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada no tempo de 30 segundos, e assim como as outras duas amostras em preto apresenta-se a martensita e a grafita, e em branco a austenita.

**Figura 52 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Nodular Temperado em 10% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

### 5.3.2 Polímero 15%

A Tabela 5 mostra os resultados médios de cada amostra tratada em uma concentração de 15% de polímero, obtidos pelo processamento de imagens, como o procedimento faz uma análise de cores, a martensita e a grafita ficam ambas pretas, sendo assim foi utilizado a porcentagem de austenita para comparação. Com os resultados pode-se perceber que as amostras de ferro fundido maleável não variaram muito a porcentagem de austenita conforme muda-se o tempo de resfriamento. Nas amostras de ferro fundido nodular observa-se uma variação menor de 2% na área de austenita conforme muda-se o tempo de resfriamento, mas sem seguir um padrão conforme o tempo. Se compararmos as amostras de ferro fundido maleável com as amostras de ferro fundido nodular verifica-se uma maior área de austenita nas amostras de ferro fundido nodular.

**Tabela 3 - Proporção de Austenita das Amostras Temperada em 15% de Polímero**

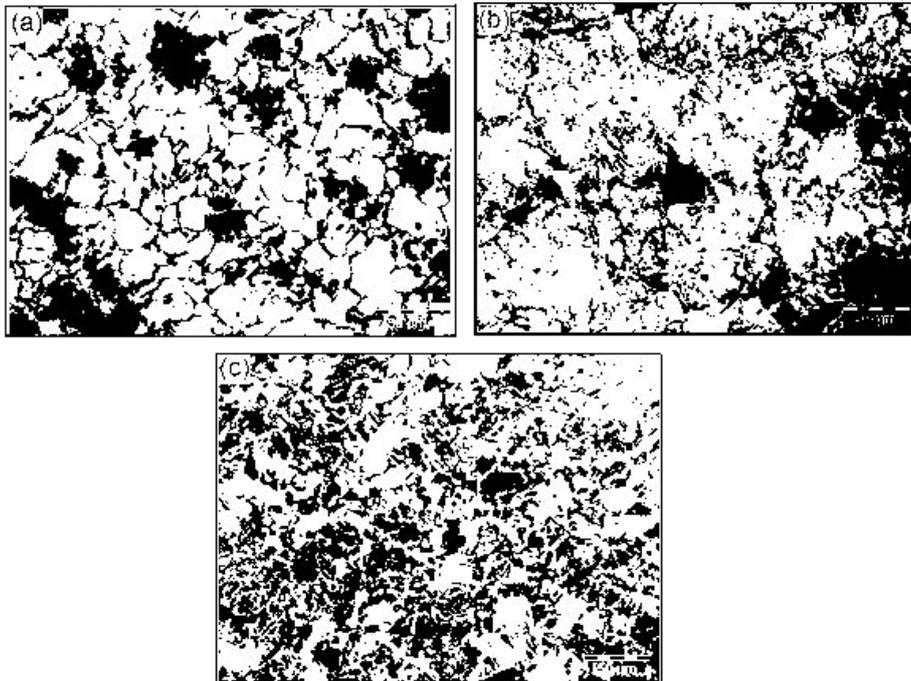
| Tempo (s) | Amostras (% austenita) |         |
|-----------|------------------------|---------|
|           | Maleável               | Nodular |
| 300       | 65,02                  | 75,85   |
| 60        | 62,98                  | 70,81   |
| 30        | 61,18                  | 73,54   |

Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido maleável a proporção de martensita teve pouca variação para os diferentes tempos de têmpera interrompida.

A Figura 53(a) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada com o tempo de 300 segundos após a análise pelo *software* ImageJ, sendo as partes em preto a martensita somada com a grafita, e a área em branco a austenita. A Figura 53(b) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada no tempo de 60 segundos, onde a área preta representa a martensita e a grafita, e a área escura representa a austenita. A Figura 53(C) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada no tempo de 30 segundos, e assim como as outras duas amostras em preto apresenta-se a martensita e a grafita, e em branco a austenita.

**Figura 53 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Maleável Temperado em 15% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**

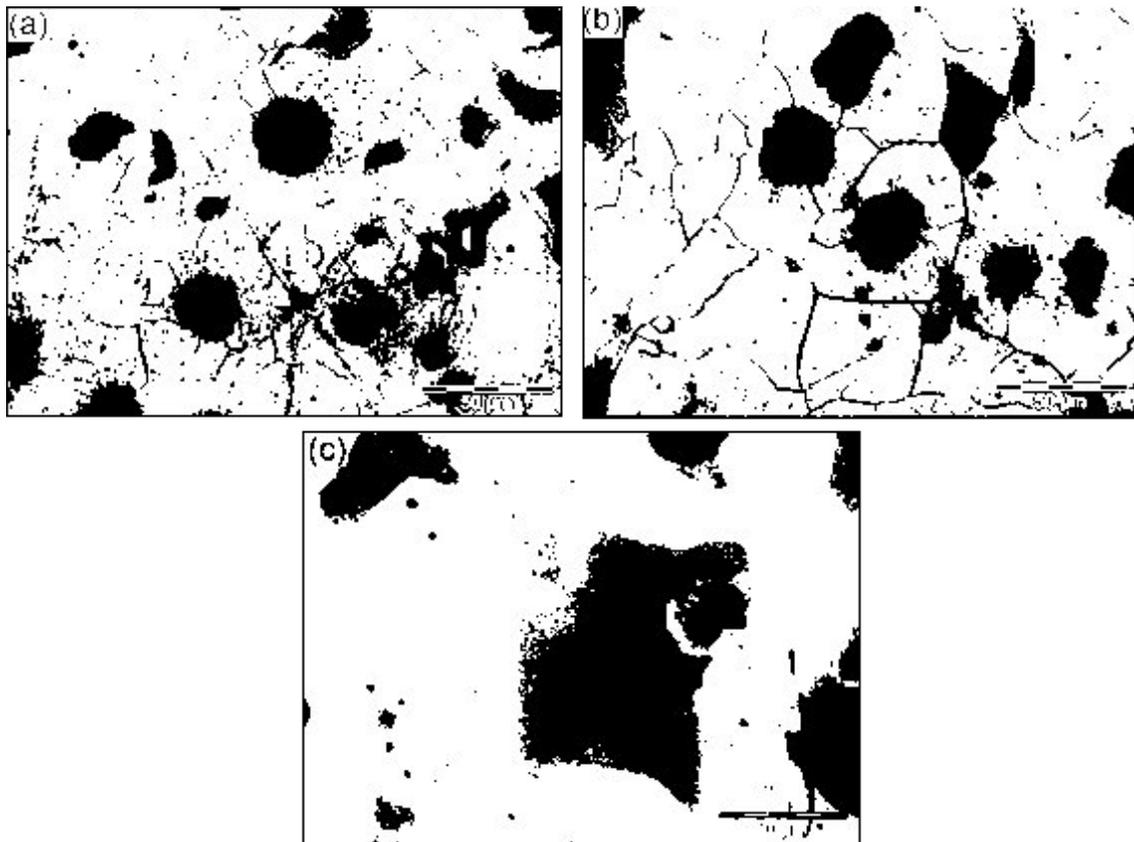


Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido Nodular a proporção de martensita teve pouca variação para os diferentes tempos de têmpera interrompida.

A Figura 54(a) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada com o tempo de 300 segundos após a análise pelo *software* ImageJ, sendo as partes em preto a martensita somada com a grafita, e a área em branco a austenita. A Figura 54(b) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada no tempo de 60 segundos, onde a área preta representa a martensita e a grafita, e a área escura representa a austenita. A Figura 54(c) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada no tempo de 30 segundos, e assim como as outras duas amostras em preto apresenta-se a martensita e a grafita, e em branco a austenita.

**Figura 54 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Nodular Temperado em 15% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

### 5.3.3 Polímero 20%

A Tabela 6 mostra os resultados médios de cada amostra tratada em uma concentração de 20% de polímero obtidos pelo processamento de imagens, como o procedimento faz uma análise de cores, a martensita e a grafita ficam ambas pretas, sendo assim foi utilizado a porcentagem de austenita para comparação. Com os resultados pode-se perceber que as amostras de ferro fundido maleável aumentaram em cerca de 5% na porcentagem de austenita conforme o tempo de resfriamento diminui. Nas amostras de ferro fundido nodular observa-se uma variação menor de 2% na área de austenita conforme muda-se o tempo de resfriamento, mas no caso sem seguir um padrão conforme o tempo. Se compararmos as amostras de ferro fundido maleável com as amostras de ferro fundido nodular verifica-se uma maior área de austenita nas amostras de ferro fundido nodular.

**Tabela 4 - Proporção de Austenita das Amostras Temperada em 20% de Polímero**

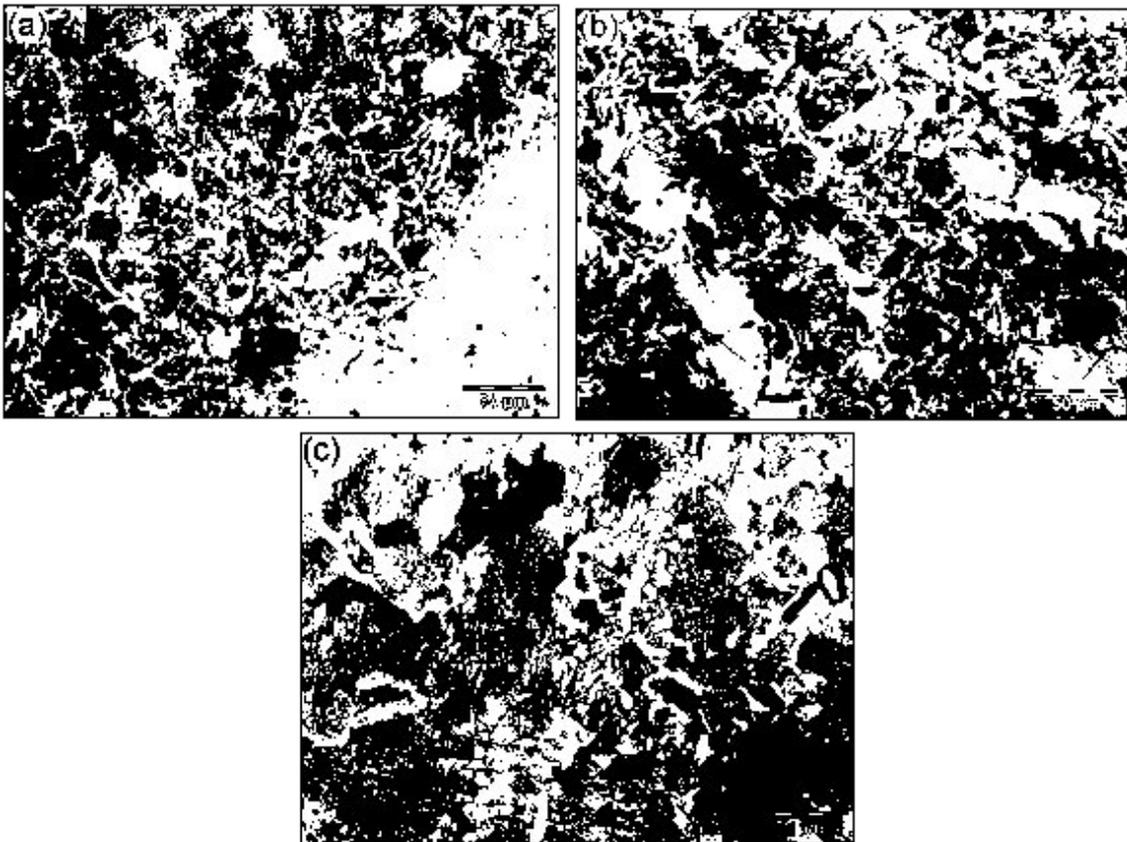
| Tempo (s) | Amostras (% austenita) |         |
|-----------|------------------------|---------|
|           | Maleável               | Nodular |
| 300       | 50,69                  | 79,4    |
| 60        | 55,63                  | 77,83   |
| 30        | 60,35                  | 75,73   |

Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido maleável a proporção de martensita teve pouca variação para os diferentes tempos de têmpera interrompida.

A Figura 55(a) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada com o tempo de 300 segundos após a análise pelo *software* ImageJ, sendo as partes em preto a martensita somada com a grafita, e a área em branco a austenita. A Figura 55(b) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada no tempo de 60 segundos, onde a área preta representa a martensita e a grafita, e a área escura representa a austenita. A Figura 55(c) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada no tempo de 30 segundos, e assim como as outras duas amostras em preto apresenta-se a martensita e a grafita, e em branco a austenita.

**Figura 55 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Maleável Temperado em 20% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**

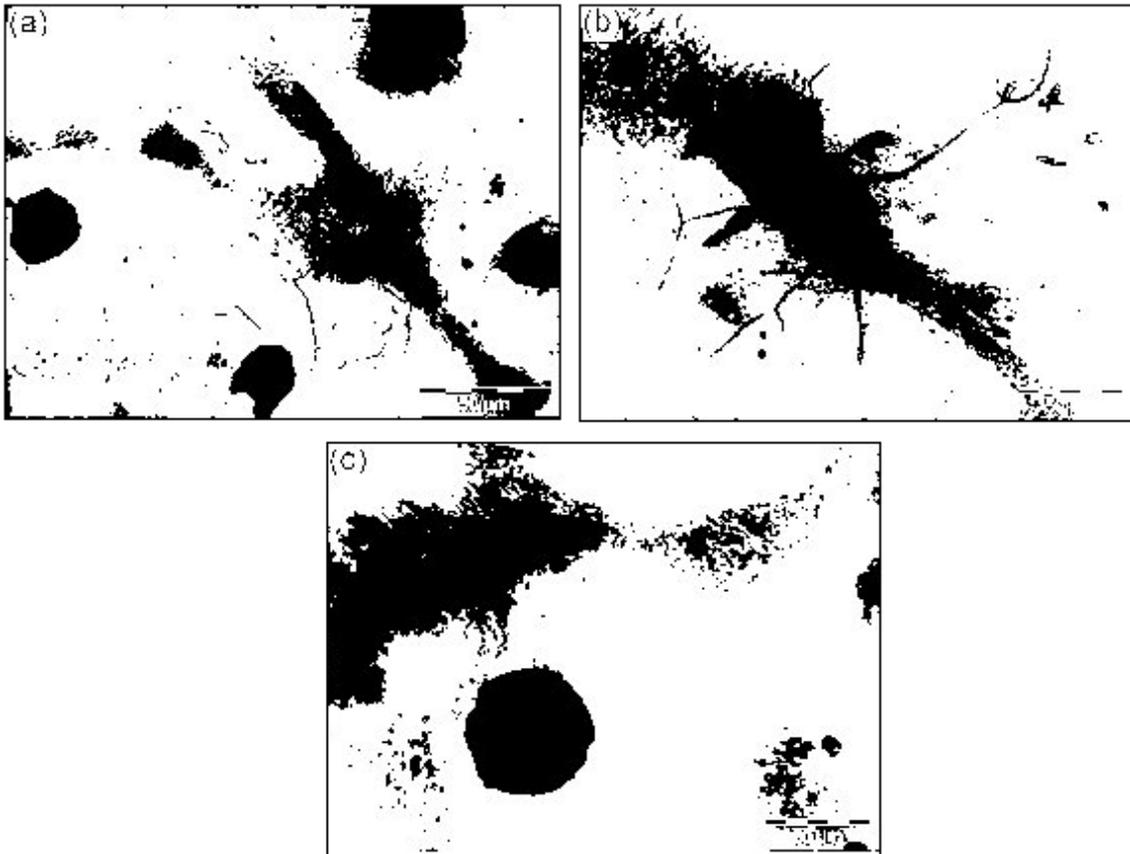


Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido Nodular a proporção de martensita teve pouca variação para os diferentes tempos de têmpera interrompida.

A Figura 56(a) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada com o tempo de 300 segundos após a análise pelo *software* ImageJ, sendo as partes em preto a martensita somada com a grafita, e a área em branco a austenita. A Figura 56(b) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada no tempo de 60 segundos, onde a área preta representa a martensita e a grafita, e a área escura representa a austenita. A Figura 56(c) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada no tempo de 30 segundos, e assim como as outras duas amostras em preto apresenta-se a martensita e a grafita, e em branco a austenita.

**Figura 56 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Nodular Temperado em 20% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

#### 5.3.4 Polímero 25%

A Tabela 7 mostra os resultados médios de cada amostra tratada em uma concentração de 25% de polímero obtidos pelo processamento de imagens, como o procedimento faz uma análise de cores, a martensita e a grafita ficam ambas pretas, sendo assim foi utilizado a porcentagem de austenita para comparação. Com os resultados pode-se perceber que as amostras de ferro fundido maleável variou a porcentagem de austenita conforme a mudança do tempo de resfriamento de uma maneira aleatória. Nas amostras de ferro fundido nodular essa variação aleatória de área de austenita conforme o tempo também é observado nas amostras. Se compararmos as amostras de ferro fundido maleável com as amostras de ferro fundido nodular verifica-se uma maior área de austenita nas amostras de ferro fundido nodular.

**Tabela 5 - Proporção de Austenita das Amostras Temperada em 25% de Polímero**

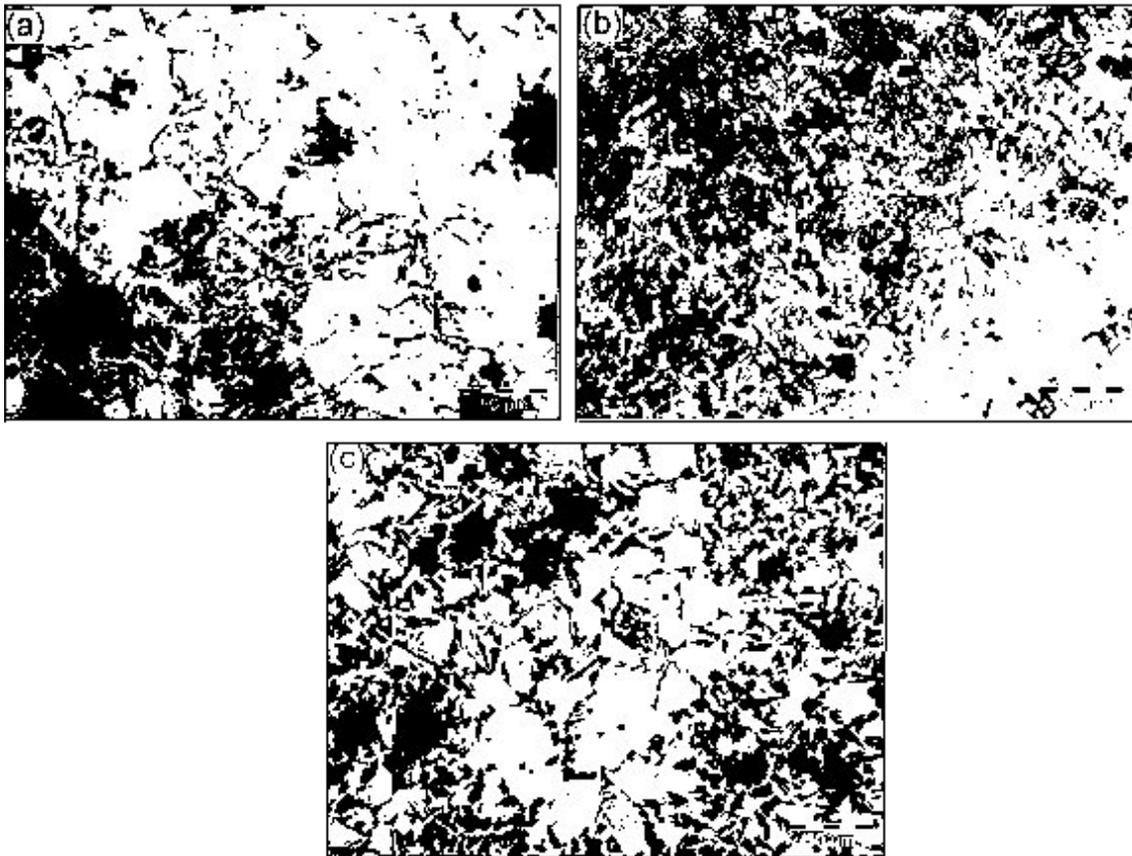
| Tempo (s) | Amostras (% austenita) |         |
|-----------|------------------------|---------|
|           | Maleável               | Nodular |
| 300       | 69,37                  | 67,09   |
| 60        | 58,76                  | 73,61   |
| 30        | 59,64                  | 65,59   |

Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido maleável a proporção de martensita teve pouca variação para os diferentes tempos de têmpera interrompida.

A Figura 57(a) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada com o tempo de 300 segundos após a análise pelo *software* ImageJ, sendo as partes em preto a martensita somada com a grafita, e a área em branco a austenita. A Figura 57(b) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada no tempo de 60 segundos, onde a área preta representa a martensita e a grafita, e a área escura representa a austenita. A Figura 57(c) apresenta a amostra de ferro fundido maleável tratada no tempo de 30 segundos, e assim como as outras duas amostras em preto apresenta-se a martensita e a grafita, e em branco a austenita.

**Figura 57 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Maleável Temperado em 25% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**

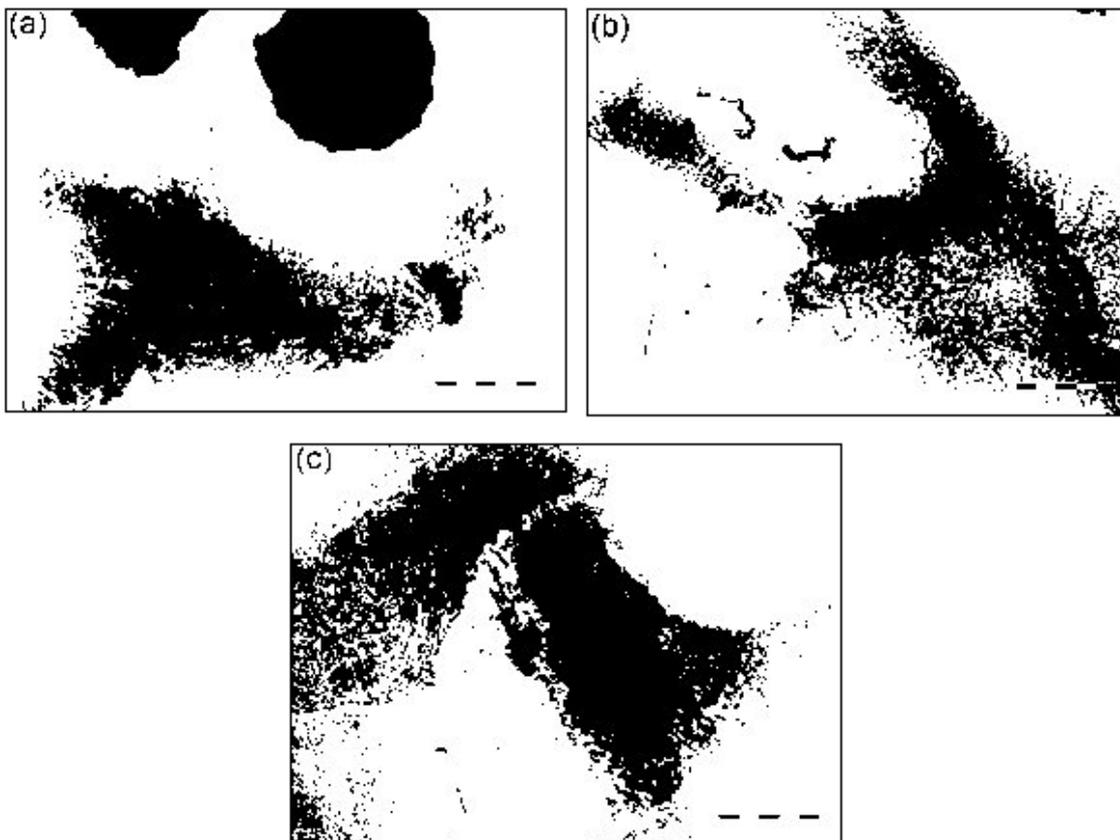


Fonte: Próprio Autor.

Para as amostras de ferro fundido Nodular a proporção de martensita teve pouca variação para os diferentes tempos de têmpera interrompida.

A Figura 58(a) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada com o tempo de 300 segundos após a análise pelo *software* ImageJ, sendo as partes em preto a martensita somada com a grafita, e a área em branco a austenita. A Figura 58(b) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada no tempo de 60 segundos, onde a área preta representa a martensita e a grafita, e a área escura representa a austenita. A Figura 58(c) apresenta a amostra de ferro fundido nodular tratada no tempo de 30 segundos, e assim como as outras duas amostras em preto apresenta-se a martensita e a grafita, e em branco a austenita.

**Figura 58 - Proporção de Fase do Ferro Fundido Nodular Temperado em 25% de Polímero no tempo: (a) 300s, (b) 60s e (c) 30s.**



Fonte: Próprio Autor.

#### 5.4 Microdureza

A microdureza foi utilizando o HV0,01 por 10 segundos; sendo feita 5 medições em cada fase. A Tabela 8 apresenta a média da microdureza da fase austenítica das amostras, de ferro fundido nodular e de ferro fundido maleável, antes do tratamento de têmpera interrompida, mostrando que ambos apresentam uma microdureza média praticamente iguais.

**Tabela 6 - Microdureza Média antes do Tratamento Térmico**

| Nodular                 | Maleável                |
|-------------------------|-------------------------|
| A (HV <sub>0,01</sub> ) | A (HV <sub>0,01</sub> ) |
| 310,6                   | 312,2                   |

Fonte: Próprio Autor.

A tabela 9 mostra as microdurezas médias encontradas nas amostras de ferro fundido nodular que passaram pelo tratamento térmico de têmpera

interrompida, sendo feito 5 pontos na fase austenítica e 5 pontos na fase martensítica.

**Tabela 7 - Microdureza Média das Amostras de Ferro Fundido Nodular, após o Tratamento Térmico.**

| Tempo (s) | Polímero (%)               |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|           | 10%                        |                            | 15%                        |                            | 20%                        |                            | 25%                        |                            |
|           | A<br>(HV <sub>0,01</sub> ) | M<br>(HV <sub>0,01</sub> ) |
| 30        | 349                        | 557,2                      | 384,8                      | 633,4                      | 337,8                      | 619                        | 321,6                      | 495,2                      |
| 60        | 318,8                      | 624,4                      | 372                        | 640,8                      | 333                        | 627,4                      | 317,4                      | 473                        |
| 300       | 307,8                      | 534,4                      | 392                        | 639,2                      | 332,6                      | 621                        | 315,2                      | 480,2                      |

Fonte: Próprio Autor.

Com base nos dados retirados das microdurezas médias, o ferro fundido nodular teve um comportamento em que a variação do tempo de resfriamento não alterou as microdurezas das fases, sendo que a fase austenítica não teve um aumento substancial de microdureza comparado com a microdureza austenítica antes do tratamento de têmpera interrompida.

Entretanto se utilizarmos a variação de polímero, as amostras de 15% e 20% tiveram uma microdureza média da martensita maior do que as amostras de 10% e 25%, sendo as amostras de 25% as que tiveram as menores microdurezas na fase martensítica. Na fase austenítica todas as amostras obtiveram um mesmo patamar de microdureza média.

Para as amostras de ferro fundido maleável foram obtidos os seguintes resultados mostrados na tabela 10, onde foram feitos 5 pontos na fase austenítica e 5 pontos na fase martensítica.

**Tabela 8 - Microdureza Média das Amostras de Ferro Fundido Maleável, após o Tratamento Térmico.**

| Tempo (s) | Polímero (%)               |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|           | 10%                        |                            | 15%                        |                            | 20%                        |                            | 25%                        |                            |
|           | A<br>(HV <sub>0,01</sub> ) | M<br>(HV <sub>0,01</sub> ) |
| 30        | 213,8                      | 551,8                      | 235,4                      | 439                        | 227                        | 399,4                      | 257,6                      | 357,6                      |
| 60        | 223,8                      | 513,8                      | 238,4                      | 453,2                      | 226,4                      | 389,8                      | 246,6                      | 367                        |
| 300       | 213,6                      | 508,2                      | 234,2                      | 441,8                      | 223,6                      | 394,2                      | 246,4                      | 366,2                      |

Fonte: Próprio Autor.

As amostras de ferro fundido maleável, comparando pela variação do tempo, não apresentou influência na variação de microdureza médias das fases, sendo suas microdurezas médias muito próximas. Comparando a microdureza média da fase austenítica após o tratamento, com a microdureza média antes do tratamento verificou-se uma diminuição dessa nas amostras temperadas.

Comparando as microdurezas pela variação de polímero, verificou-se que a fase austenítica manteve-se praticamente inalterada, já a fase martensítica conforme aumenta-se a concentração de polímero há uma diminuição de microdureza.

Comparando as amostras de ferro fundido nodular com as amostras de ferro fundido maleável, pode-se observar que as amostras de ferro fundido nodular obtiveram uma microdureza média maior, tanto na fase austenítica quanto na martensítica, do que as amostras de ferro fundido maleável.

## 6 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, obteve-se as seguintes conclusões para os objetivos específicos:

- As amostras de ferro fundido maleável e de ferro fundido nodular, antes de passar pelo tratamento térmico de têmpera interrompida possuíam uma microestrutura homogênea. As amostras de ferro fundido maleável apresentaram descarbonetação superficial originada no processo de fundição. Ambas as amostras, após o tratamento apresentaram uma microestrutura composta de austenita, martensita e grafita, sendo que o tempo de resfriamento teve muito pouca influência, tanto qualitativamente quanto quantitativamente na transformação de martensita. Já o meio de resfriamento já apresentou uma influência na quantidade de martensita transformada e conseqüentemente na fração de austenita. Maiores concentrações de polímeros contribuíram para maiores percentuais de austenita e menores de martensita.
- As amostras de ambos os ferros fundidos preliminarmente ao tratamento térmico apresentaram microdurezas similares. Entretanto, após o tratamento de têmpera interrompida, as amostras de ferro fundido nodular obtiveram um aumento de microdureza na matriz, comparando-se com as amostras de ferro fundido maleável. Já na fase martensítica as amostras de ferro fundido nodular apresentaram microdureza superiores as amostras de ferro fundido maleável. O tempo de resfriamento não apresentou uma influência grande nos valores de microdurezas amostras. Já a concentração do meio de resfriamento teve uma grande influência nas mesmas, sendo menor a microdureza conforme o aumento da porcentagem de polímero.
- As amostras originais apresentavam descarbonetação superficial, sendo mais acentuada nos ferros fundidos maleáveis. Após tratadas termicamente as amostras de ferro fundido nodular mantiveram seu nível de descarbonetação e apresentaram-se isentas de microtrincas. Porém em todas as amostras de ferro fundido maleável apresentaram descarbonetação superficial mais acentuada, sendo também isentas de microtrincas.

- Comparando as amostras de ferro fundido nodular com as de ferro fundido maleável, com o tempo de resfriamento e concentração de polímeros iguais, as amostras apresentaram a mesma microestrutura, formada de austenita, martensita e grafita, porém as amostras de nodular apresentaram austenita e martensita com microdureza superiores ao do maleável. Já fração de austenita presente nos nodulares foi maior do que nos maleáveis, mostrando que os ferros fundidos maleáveis tiveram uma maior taxa de transformação martensítica.
- Com base nos dados de microdureza, e porção de fase, em que variando o tempo de resfriamento eles praticamente se mantiveram constantes, pode-se afirmar que com os tempos de 30s, 60s e 300s e concentrações de polímeros inferiores a 25% a fase austenítica não foi suficiente para a obtenção de propriedades antagônicas (aumento da resistência mecânica com boa tenacidade).

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAIN, S. Y.P; GAUDEZ, S; GEANDIER, G; HELL, J; GOUNÉ, M; DANOIX, F; SOLER, M; AOUED, S; POULON-QUINTIN, A. **Internal stresses and carbon enrichment in austenite of Quenching and Partitioning steels from high energy X-ray diffraction experiments.** Materials Science and Engineering A, Outubro, 2017.

ALLAIN, S. Y.P; GEANDIER, G; HELL, J; GOUNÉ, M; DANOIX, F; SOLER, M. **In-situ investigation of quenching and partitioning by High Energy X-Ray Diffraction experiments.** Acta Materialia, Dezembro, 2016.

ASM HANDBOOK VOL. 1. **Heat Treating.** Estados Unidos. 2001.

ASM HANDBOOK VOL. 1. **Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys.** Estados Unidos. 2001. [2].

ASTM INTERNATIONAL. E384 -17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. **ASTM International**, p. 1–40, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E3-11(2017) Preparation of Metallographic Specimens 1. **Area**, v. 03, n. July, p. 1–17, 2001.

CARMO, D. J. **Ferro Fundido Nodular Austemperado ADI.** Itaúna: 2001

CANALE, L. C. F; TOTTEN, G. E; CANALE, A. C. **Polimeros de têmpera à base de PAG.** Minerva, 1999.

CUI, J; CHEN, L. **Microstructure and abrasive wear resistance of an alloyed ductile iron subjected to deep cryogenic and austempering treatments.** Materials Science and Engineering, Agosto, 2017.

CHEN, L; CUI, J; TONG, W. **Effect of deep cryogenic treatment and tempering on microstructure and mechanical behaviors of a wear-resistant austempered alloyed bainitic ductile iron.** Disponível em: <http://www.matec-conferences.org>, 2018.

DASGUPTA, R; MONDAL, D; CHAKRABARTI, A; GANGULI, A. **Microstructure and Mechanical Properties of As-Cast Ductile Irons Alloyed with Manganese and Copper.** Journal Of Materials Engineering And Performance, 2012 Aug, Vol.21(8), pp.17281736.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: Edipucrs, 2007.

DIAS, J. F; RIBEIRO, G. O; CARMO, D. J; VILELA, J. J. **The effect of reducing the austempering time on the fatigue properties of austempered ductile iron**. Materials Science and Engineering A, Julho, 2012.

GHADERI, A. R; GHADERI, M; NILI, A. H. M; GHASEMI, H. M. **Effect of Graphite Morphologies On The Tribological Behavior of Austempered Cast Iron**. Wear, August 2003, Vol. 255(1-6), pp.410-416

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. São Paulo. Editora Blucher. 2009.

HUIPING, L; GUOQUN, Z; SHANTING, N; CHUANZHEN, H. **FEM simulation of quenching process and experimental verification of simulation results**. Materials Science and Engineering A, Novembro, 2006.

ISO 945-1. **Microstructure of cast irons — Part 1: Graphite classification by visual analysis**. 2017.

KEOUGH, J. R; HAYRYNEN, K. L; PIOSZAK, G. L. **Designing with Austempered Ductile Iron (ADI)**. AFS Proceedings, 2010.

KIIJF, D; PETROV, R; FÖJER, C; KESTENS, L. A. I. **Effect of fresh martensite on the stability of retained austenite in quenching and partitioning steel**. Materials Science and Engineering A, Julho, 2014.

MEIER, L; HOFMANN, M; SAAL, P; VOLK, W; HOFFMANN, H. **In-situ measurement of phase transformation kinetics in Austempered ductile iron**. Materials Characterization, Setembro, 2013.

MELADO, A. C; NISHIKAWA, A. S; GOLDENSTEIN, H; GILES, M. A; REED, P. A. S. **Effect of microstructure on fatigue behaviour of advanced high strength ductile cast iron produced by quenching and partitioning process**. International Journal of Fatigue, Julho, 2017.

NISHIKAWA, A. S; SANTOFIMIA, M. J; SIETSMA, J; GOLDENSTEIN, H. **Influence of bainite reaction on the kinetics of carbon redistribution during the Quenching and Partitioning process**. Acta Materialia, Dezembro, 2017.

OYETUNJI, A; OMOLE, S.O. **Achievement of Nodules in Ductile Iron having Sulphur Content Not Less Than 0,07% Weight.** Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 2014, Vol.12(4), pp.42-46.

PANNEERSELVAN, S; PATATUNDA, S. K; GUNDLACH, L; BOILEAU, J. **Influence of intercritical austempering on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI).** Materials Science and Engineering, Agosto, 2017.

PANNEERSELVAM, S; MARTIS, C. J; PATATUNDA S, K; BOILEAU, J. M. **An investigation on the stability of austenite in Austempered Ductile Cast Iron (ADI).** Materials Science and Engineering A, Dezembro, 2014.

PATATUNDA S, K; PANNEERSELVAM, S; ALSHWIGI, M. **Development of Nanostructured Austempered Ductile Cast Iron (ADI).** Researchgate, Outubro, 2016.

PATATUNDA, S, K. **Development of austempered ductile cast iron (ADI) with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process.** Materials Science and Engineering, Janeiro, 2001.

PIMENTEL, A, S, O. **Tratamento térmico de austêmpera em ferro fundido nodular com adições de nióbio e de cromo.** Revista Matéria, v.22, n. 2, Rio de Janeiro, 2017.

RAO, L; TAO, W; WANG, S. J; GENG, M. P; CHENG, G. **Influence of The Composition Ratio of Manganese and Copper on the Mechanical Properties and the Machining Performance of Ductile iron.** Indian Journal Of Engineering And Materials Sciences, 2014 Oct, Vol.21(5), pp.573-579.

SEO, E. J; CHO, L; ESTRIN, Y; COOMAN, B. C. **Microstructure-mechanical properties relationships for quenching and partitioning (Q&P) processed steel.** Acta Materialia, Abril, 2016.

SEO, E. J; CHO, L; COOMAN, B.C. **Kinetics of the partitioning of carbon and substitutional alloying elements during quenching and partitioning (Q&P) processing of medium Mn steel.** Acta Materialia, Janeiro, 2016. [2].

SEO, E. J; CHO, L; COOMAN, B.C. **Application of Quenching and Partitioning Processing to Medium Mn Steel.** Metallurgical and materials Transactions A, Novembro, 2014.

SILVA, A. J.S.T; CAMPOS, M. F; NISHIKAWA, A. S; GUESSER, W. L; GOLDENSTEIN, H. **Quenching and Partitioning process in Ductile Cast Irons**. 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron – SPCI10, 2010.

SILVA, A. J. S. T; GOLDNSTEIN, H; GUESSER, W. L; CAMPOS, M. F. **Quenching and Partitioning Heat Treatment in Ductile Cast Irons**. Materials Research, Outubro, 2014.

SKALAND, T. **Inoculation material improves graphite formation in ductile iron**. Modern Casting, Dec 2001, Vol. 91(12), p.43.

SOLIC, S; GODEC, M; SCHAUPEL, Z; DONIK, C. **Improvement in Abrasion Wear Resistance and Microstructural Changes with Deep Cryogenic Treatment of Austempered Ductile Cast Iron (ADI)**. Metallurgical and Materials Transactions A, Outubro, 2016.

TOJI, Y; MIYAMOTO, G; RAABE, D. **Carbon partitioning during quenching and partitioning heat treatment accompanied by carbide precipitation**. Acta Materialia, Novembro, 2014.

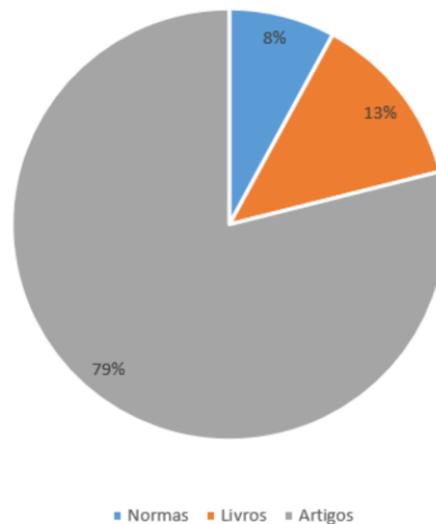
VIEIRA, E. R; BIEHL, L. V; MEDEIROS, J. L. B; SILVA, A. B; SILVA, M. S. **Efeitos da Variação da Concentração de Solução Polimerica Aquosa a Base de PVP na Têmpera de Aço AISI 4140**. Revista Matéria, Março, 2019.

WANG, B; BARBER, G. C; TAO, C; SUN, X; RAN, X. **Characteristics of tempering response of austempered ductile iron**. Materials Research and Technology, Novembro, 2017.

ZHANG, H; WU,Y; LI, Q; HONG, XIN. **Mechanical properties and rolling-sliding wear performance of dual phase austempered ductile iron as potential metro wheel**. Wear, Abril, 2018.

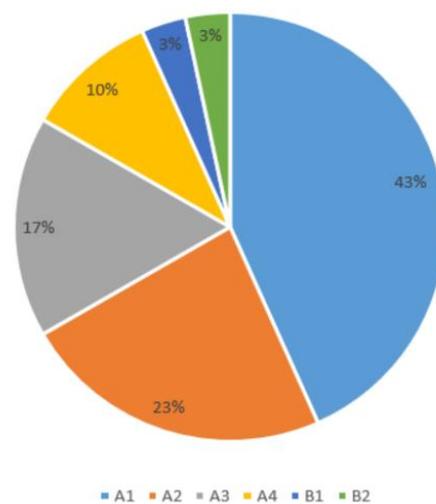
#### 7.1 Classificação das Referências

Para a escrita dessa dissertação foram utilizadas artigos, normas e livros. A quantidade de cada tipo é apresentada na Figura 59.

**Figura 59 –Tipo de referência usados.**

Fonte: Próprio Autor.

Os artigos utilizados foram classificados de acordo com seu percentual determinado pela Scopus, sendo apresentada na Figura 60.

**Figura 60 - Classificação dos artigos usados.**

Fonte: Próprio Autor.