



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS
(PÓS-ECM)

MICHELLE BEATRIZ DE ARAÚJO

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA DO INOCULANTE UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE
FERRO FUNDIDO CINZENTO**

JOINVILLE

2020

Michelle Beatriz de Araújo

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA DO INOCULANTE UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE
FERRO FUNDIDO CINZENTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Alexandre Mikowski, Dr.

Joinville

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Araújo, Michelle Beatriz de
Determinação da influência da granulometria e da
composição química do inoculante utilizado na produção de
ferro fundido cinzento / Michelle Beatriz de Araújo ;
orientador, Alexandre Mikowski , 2020.
141 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Ferro fundido
cinzento. 3. Inoculação. 4. Inoculantes diferentes. 5.
Granulometria. I. , Alexandre Mikowski. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Michelle Beatriz de Araújo

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DA COMPOSIÇÃO
QUÍMICA DO INOCULANTE UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE
FERRO FUNDIDO CINZENTO**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Claudimir Antonio Carminatti, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Diego Alexandre Duarte, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Diego Torres, Dr.
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Rafael de Camargo Catapan, Dr.
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação

Prof. Alexandre Mikowski, Dr.
Orientador

Joinville, 2020.

Este trabalho é dedicado especialmente à Deus e meu amado Pai
Dirceu.

AGRADECIMENTOS

À Deus que me guiou durante este período em todas as viagens de Jaraguá a Joinville e me deu forças para dar sempre o melhor de mim no meu trabalho e neste projeto. À empresa WEG Equipamentos Elétricos S/A, a qual me proporcionou a oportunidade de realizar este trabalho fornecendo toda a estrutura, suporte, confiança e incentivo para sua realização.

Ao meu gerente Felipe Amarante, que me apoiou em todo trabalho, disponibilizando horários, ensaios, estrutura e por estar sempre me motivando para realização deste projeto, mas principalmente por acreditar no meu potencial.

A todos os companheiros de trabalho dos metalúrgicos I e II, em especial a seção de fusão, pelo apoio, auxílio, incentivo, troca de experiências, conhecimentos e amizade durante todo o projeto.

À UFSC, à coordenação e aos professores do curso de pós-graduação em engenharia de ciências mecânicas, por todo apoio, estrutura de ensino, base teórica e pelas oportunidades de aprendizado oferecidas.

Ao meu orientador Alexandre Mikowski, por ter acreditado neste trabalho, por toda ajuda na elaboração, execução e finalização do mestrado, o qual sempre me ajudou a escolher as disciplinas que auxiliariam na execução do projeto.

Aos meus pais, Dirceu e Beatriz, por me apoiarem e me mostrarem que o melhor caminho é sempre o de estudar e se dedicar ao máximo aos objetivos. Por me disponibilizarem toda base de família e estudos que foi possível e por apoiarem minhas escolhas.

Aos meus irmãos, Dirceu, Isabely e Theresa, a minha irmã de coração Karla, a minha família e meus amigos, por todo amor e carinho dedicados a mim, mas principalmente por entenderem minha ausência em vários momentos.

“Para vencer na vida, é preciso fazer acontecer”

Werner Ricardo Voigt, 2016.

RESUMO

Durante a solidificação de ferros fundidos cinzentos é de suma importância o controle do intervalo entre as temperaturas estável (1152°C) e metaestável (1146°C), pois, é neste momento que há a nucleação e crescimento das grafitas que é a composição requerida a este material. Para que haja tempo suficiente para esta formação é essencial que sejam adicionados elementos grafitizantes na liga, pois, através destes há a uniformização do banho metálico e a ocorrência das ligações óxido-sulfetos necessárias para que a nucleação do banho seja efetiva e eficiente. Com base nisto, o processo de inoculação é baseado na adição de pequenas partículas de material nucleante na panela de abastecimento ou durante o jorro de vazamento do metal para o molde. Este processo é realizado com o intuito de refinar a microestrutura e melhorar as propriedades físicas e mecânicas da peça final. O objetivo deste trabalho foi verificar a influência da granulometria e da quantidade de inoculante adicionado (0,4 – 1,5%) ao banho na propriedade de dureza, quantidade de células eutéticas e tendência ao coquilhamento. Para a realização deste trabalho foi utilizado um molde escalonado com o objetivo de obter cinco degraus com espessuras diferentes para analisar os resultados e as variações obtidas no experimento. Após a primeira etapa do trabalho foi constatado que o principal fator que provocava alteração das propriedades era a interação entre a quantidade de inoculante adicionada ao banho e a granulometria do inoculante. Com base nos resultados obtidos, foi realizado um segundo experimento variando a composição química do inoculante (Fe-Si e Fe-Si-Sr), quantidade de inoculante adicionada (0,09-0,24%), método de adição (na panela), temperatura de vazamento (1360-1400°C) e a adição de enxofre (0-0,08%) na carga do forno. Na segunda etapa do trabalho as propriedades avaliadas foram dureza Brinell, resistência à tração, microestrutura, células eutéticas, altura de coquilhamento (ferro duro) e distribuição e forma das grafitas. Os resultados demonstraram que a adição de inoculante ao banho metálico promove a formação de elevado número de células eutéticas variando de 3 a 84 células eutéticas/mm² dependendo das condições realizadas e que a adição do inoculante Fe-Si-Sr aumenta todas as propriedades físicas e mecânicas, como resistência a tração que passou de 200-220 MPa com inoculante de Fe-Si para 250-265 MPa com a adição de Fe-Si-Sr nas mesmas condições de processo. O percentual de ferro duro (coquilhado) atingiu valores menores do que 1mm com a adição de estrôncio na composição química do inoculante. Assim, esta composição foi mais eficiente e demandou uma menor quantidade para obtenção de um material superior ao de Fe-Si. Com base no trabalho realizado foi possível determinar uma condição ideal para

trabalhar e obter resultados superiores ao atingido com o processo de inoculação atual Fe-Si, confirmando todas as teorias apresentadas ao longo desta dissertação.

Palavras-chave: Ferro fundido cinzento. Inoculação. Coquilhamento. Dureza Brinell. Resistência à tração.

ABSTRACT

During the solidification of gray cast irons it is of paramount importance to control the interval between the temperatures Stable (1152 ° C) and metastable (1146 ° C), because it is at this moment that there is the nucleation and growth of the graphites which is the required composition to this material. In order to have enough time for this formation, it is essential that graphite elements are added to the alloy, because through these there is the uniformity of the metal bath and the occurrence of the oxide-sulfide bonds necessary for the nucleation of the bath to be effective and efficient. This process is carried out in order to refine the microstructure and improve the physical and mechanical properties of the final piece. The objective of this work was to verify the influence of the granulometry and the amount of inoculant added (0.4 - 1.5%) to the bath in the property of hardness, quantity of eutectic cells and tendency to coquillation. To perform this work, a staggered mold was used in order to obtain five steps with different thicknesses to analyze the results and variations obtained in the experiment. After the first stage of the work, it was found that the main factor that caused changes in properties was the interaction between the amount of inoculant added to the bath and the granulometry of the inoculant. Based on the results obtained, a second experiment was carried out varying the chemical composition of the inoculant (Fe-Si and Fe-Si-Sr), amount of inoculant added (0.09-0.24%), method of addition, pouring temperature (1360-1400°C) and the addition of sulfur (0-0.08%) to the oven load. In the second stage of the work, the properties evaluated were hardness, traction, microstructure, eutectic cells, chilling height (hard iron) and graphite distribution and shape. The results showed that the addition of inoculant to the metal bath promotes the formation of a high number of eutectic cells varying from 3 to 84 eutectic cells / mm² depending on the conditions performed and that the addition of the Fe-Si-Sr inoculant increases all physical properties and mechanical, such as tensile strength that went from 200-220 MPa with Fe-Si inoculant to 250-265 Mpa with the addition of Fe-Si-Sr under the same process conditions. The percentage of hard iron (chilled) reached values less than 1 mm with the addition of strontium in the chemical composition of the inoculant. Thus, this composition was more efficient and demanded a smaller amount to obtain a material superior to that of Fe-Si. Based on the work carried out, it was possible to determine an ideal condition to work and obtain results superior to that achieved with the current Fe-Si inoculation process, confirming all the theories presented throughout this dissertation.

Keywords: Gray cast iron. Inoculation. Chilling. Brinell Hardness. Tensile Strenght.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.	22
Figura 2 – Diagrama Fe-C - Composição Química.	23
Figura 3 – Relação entre o diagrama de fase Fe-C, curvas de resfriamento e microestrutura.	23
Figura 4 – Tipos de grafita.	24
Figura 5 – Crescimento da grafita lamelar.	25
Figura 6 – Distribuição das grafitas.	26
Figura 7 – Liga eutética dentro da zona acoplada assimétrica.	27
Figura 8 – Nucleação e crescimento da grafita.	28
Figura 9 – Curva de resfriamento para um ferro fundido hipoeutético.	28
Figura 10 – Curvas de resfriamento típicas para os tipos de grafita.	29
Figura 11 – Influência da inoculação no tempo de formação da camada sólida.	30
Figura 12 – Influência do silício nas temperaturas de equilíbrio estável e metaestável.	31
Figura 13 – Influência do cromo nas temperaturas de equilíbrio estável e metaestável.	31
Figura 14 – Influência da quantidade de: a) enxofre (S), b) manganês (Mn).	32
Figura 15 – Influência das diferentes proporções de enxofre e manganês na resistência à tração.	33
Figura 16 – Velocidade de extração de calor.	34
Figura 17 – Extração de calor x Super resfriamento.	34
Figura 18 – Efeito da temperatura de vazamento no número de células eutéticas.	36
Figura 19 – Grau de Nucleação.	37
Figura 20 – Efeito do Enxofre na nucleação.	37
Figura 21 – Efeito do enxofre na solidificação.	38
Figura 22 – Técnicas de adição de inoculante no banho metálico.	38
Figura 23 – Nucleação da grafita seguindo a teoria dos óxidos sulfetos.	39
Figura 24 – Classificação dos elementos segundo as teorias dos óxidos, sulfetos, nitretos e carbetos.	40
Figura 25 – Influência da quantidade de inoculante.	41
Figura 26 – Tempo Transcorrido entre Adição e Vazamento.	42
Figura 27 – Redução de nódulos após inoculação.	42
Figura 28 – Efeito do enxofre e manganês.	43
Figura 29 – Curva para obtenção da grafita do tipo “A”.	44

Figura 30 – Altura de coquilhamento e tamanho das células eutéticas em diferentes percentuais de inoculação.	45
Figura 31 – Diferentes composições de inoculante em relação ao número de células.	46
Figura 32 – Medidas modelo escalonado.	52
Figura 33 – Ferramental escalonado em placa.	52
Figura 34 – Material (inoculante) retido em cada peneira.	53
Figura 35 – Peça fundida molde escalonado.	57
Figura 36 – Método de medição do defeito de ferro duro.	58
Figura 37 – Planejamento experimental do primeiro experimento.	61
Figura 38 – Estratégia de corte do corpo de prova escalonado.	63
Figura 39 – Corpo de prova em placa.	63
Figura 40 – Corpos de prova fundidos.	64
Figura 41 – Plano de amostragem segundo experimento.	73
Figura 42 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.	76
Figura 43 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.	77
Figura 44 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.	78
Figura 45 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.	79
Figura 46 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.	80
Figura 47 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.	81
Figura 48 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.	82
Figura 49 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.	83
Figura 50 – Tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.	84
Figura 51 – Tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.	85

Figura 52 – Tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.	86
Figura 53 – Tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.	87
Figura 54 – Tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.	88
Figura 55 – Tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.	89
Figura 56 – Tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1380°C – Aumento: 50x.	90
Figura 57 – Tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440°C – Aumento: 50x.	91
Figura 58 – Quantidade de células eutéticas do tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.	93
Figura 59 – Quantidade de células eutéticas do tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.	94
Figura 60 – Quantidade de células eutéticas do tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.	94
Figura 61 – Quantidade de células eutéticas do tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.	95
Figura 62 – Quantidade de células eutéticas do tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.	96
Figura 63 – Quantidade de células eutéticas do tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.	97
Figura 64 – Quantidade de células eutéticas do tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.	98
Figura 65 – Quantidade de células eutéticas do tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.	98
Figura 66 – Corpo de prova com local de indentação.	99
Figura 67 – Plano de amostragem para o defeito de ferro duro.	109

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantidade de células eutéticas em dias diferentes nas mesmas condições.	65
Gráfico 2 – Número de células eutéticas em cada tratamento.	65
Gráfico 3 – Quantidade de ferro duro em dias diferentes nas mesmas condições.	68
Gráfico 4 – Interação entre os fatores “Granulometria” e “inoculação”.	69
Gráfico 5 – Medida de dureza em dias diferentes nas mesmas condições.	70
Gráfico 6 – Interação entre os fatores “granulometria” e “inoculação” com a medida de Dureza – 3° Degrau.	71
Gráfico 7 – Interação entre os fatores “granulometria” e “inoculação” com a medida de Dureza – 4° Degrau.	71
Gráfico 8 – Quantidade de células eutéticas por tratamento em cada degrau do CP.	92
Gráfico 9 – Dureza HB por tratamento em cada degrau do corpo de prova.	100
Gráfico 10 – Medida de dureza por degrau.	100
Gráfico 11 – Interação entre percentual de inoculação, adição de enxofre e composição química do inoculante na medida de dureza.	101
Gráfico 12 – Medida de dureza em cada degrau.	103
Gráfico 13 – Interação de adição de enxofre, percentual de inoculação e tipo de inoculante de acordo com os limites de especificação.	104
Gráfico 14 – Interação dos fatores de percentual de adição de enxofre e composição química do inoculante.	105
Gráfico 15 – Composição química da liga durante os experimentos.	108
Gráfico 16 – Enxofre amostras e limites de especificação.	109
Gráfico 17 – Quantidade de ferro duro em todas as rodadas dos experimentos.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos inoculantes.	51
Tabela 2 – Especificação versus percentual retido por peneira de cada fornecedor.	54
Tabela 3 – Principais fatores para ocorrência dos defeitos.	56
Tabela 4 – Principais fatores para ocorrência dos defeitos.	62
Tabela 5 – Tabela com as teorias e previsões sobre os experimentos realizados.	74
Tabela 6 – Resumo dos resultados experimentais.	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DIN – Deutsches Institut für Normung FoFo

C – Carbono

Si – Silício

Sr – Estrôncio

P – Fósforo

Fe-Si – Inoculante de Ferro silício

Fe-Si-Sr – Inoculante Ferro silício estrôncio

Fe-C-Si-Sr – Inoculante Ferro carbono silício estrôncio

Ceq – Carbono equivalente

HB – Dureza Brinell

MPa – Mega Pascal N/m^2 – Newtons por metro quadrado

Pa – Pascal

CP – Corpo de Prova

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	FERRO FUNDIDO	21
2.2	FERRO FUNDIDO CINZENTO	24
2.3	ZONA ACOPLADA	26
2.4	SOLIDIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO	27
2.5	INOCULAÇÃO	29
2.6	INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NA SOLIDIFICAÇÃO	30
2.7	INFLUÊNCIA DO ENXOFRE E MANGANÊS NA SOLIDIFICAÇÃO	32
2.8	VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO	33
2.9	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO	35
2.10	GRAU DE NUCLEAÇÃO	35
2.11	FORMAS DE ADIÇÃO DO INOCULANTE	38
2.12	TEORIA DOS ÓXIDOS	39
2.13	INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA	40
2.14	INFLUÊNCIA DO ESTRÔNCIO	45
2.15	ESTADO DA ARTE	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO	50
3.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO INOCULANTE	50
3.3	CORPO DE PROVA PADRÃO	51
3.4	INOCULANTES UTILIZADOS	53
3.5	PARÂMETROS DE VAZAMENTO E INOCULAÇÃO	54

3.6	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	55
3.7	PREPARAÇÃO E ANÁLISE DAS AMOSTRAS	56
3.7.1	Análise microestrutural	57
3.7.2	Análise macroestrutural	58
3.7.3	Análise por ensaio mecânico de dureza Brinell	58
3.7.4	Análise por ensaio mecânico de tração	58
3.7.5	Quantidade de células eutéticas	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	RESULTADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO	60
4.1.1	Células eutéticas	64
4.1.2	Ferro duro	67
4.1.3	Dureza Brinell	69
4.1.4	Conclusão 1º Experimento	72
4.2	RESULTADOS SEGUNDO EXPERIMENTO	73
4.2.1	Ensaio microestrutural	74
4.2.2	Células Eutéticas	91
4.2.3	Dureza Brinell	99
4.2.4	Resistência à tração	103
4.2.5	Composição química da liga	107
4.2.6	Ferro duro	109
5	CONCLUSÃO	112
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	115
7	REFERÊNCIAS	116
8	APÊNDICE A	121
9	APÊNDICE B	131
10	ANEXO	141

1 INTRODUÇÃO

O ferro fundido é um dos materiais mais utilizados no mundo, tendo diversas aplicações devido a sua alta aplicabilidade visto as diferentes propriedades físicas e mecânicas que podem ser obtidas através do processo de fundição deste material. Sendo um dos principais setores na siderurgia, a metalurgia é responsável por uma fatia importante deste mercado, isto pode estar muito relacionado a fácil obtenção e custos agregados relativamente baixos quando comparados a outros processos.

O presente trabalho tem foco no ferro fundido cinzento e visa investigar a influência da granulometria e da composição química dos inoculantes na produção de ferro fundido cinzento. Estes compostos são utilizados para melhorar as propriedades físicas e mecânicas e a usinabilidade deste material, fatores que são importantíssimos para o atendimento dos requisitos mecânicos e estéticos da peça.

Para verificar qual fator gera a maior variação nas propriedades físicas e mecânicas, como resistência à tração, dureza e estrutura do produto, foram realizados experimentos planejados, visando entender a ocorrência dos defeitos de ferro duro (coquilhamento), baixa resistência mecânica, dureza e alterações microestruturais, sendo o tratamento de dados realizado através de análise estatística.

Foram realizados ensaios microestruturais para avaliação da estrutura do material, tipo de grafita, quantidade de células eutéticas, dureza e quantidade de células eutéticas em corpos de prova padrão escalonados, com cinco espessuras (degraus), forçando a ocorrência dos defeitos já mencionados, principalmente na seção mais fina da peça, a qual tem uma perda de calor rápida que favorece a ocorrência dos mesmos.

A quantidade de células eutéticas, tipo de grafita, resistência à tração, dureza e a altura de coquilhamento foram a forma de medir a variável resposta, determinando a diferença entre os tratamentos realizados e da influência de cada variável. A quantidade de células eutéticas determina principalmente o grau de nucleação do material, ou seja, quanto maior o número de núcleos maior é o grau de nucleação da peça, a sua expansão, e menor a tendência de formação do defeito de ferro duro (coquilhamento).

A forma de adição dos inoculantes no presente trabalho ocorreu de duas formas (inoculação no jorro e na panela), sendo realizada no banho líquido de metal através da inoculação na panela de vazamento ou por transferência, geralmente usada para vazamentos manuais ou pré-inoculação no caso de vazamento automático e adição no jorro de metal. Assim, alguns fatores, como a forma de adição, a composição química, a quantidade e a granulometria

do inoculante adicionado são fundamentais para definir a inoculação exata para o material, além de variáveis como tempo, temperatura e geometria da peça, que são externas e relacionadas ao processo. Desta forma, é de suma importância o conhecimento destes fatores, pois, com o domínio dos mesmos, é possível otimizar a sua utilização, obtendo as melhores características para o produto.

Para a determinação do grau de nucleação do banho de metal líquido há a necessidade de contar a quantidade de células eutéticas da estrutura de cada degrau e fazer a análise metalográfica em cada tratamento para identificação do tipo de grafita e microestrutura, devendo assim realizar toda parte de preparação para análise.

Como já citado, um dos fatores mais significativos para gerar variação no grau de nucleação é a temperatura do processo, pois, quanto maior a temperatura, mais elevada à tendência de dissolução e eliminação dos núcleos ativos do metal, os quais darão origem as grafitas e determinarão as propriedades da peça final.

Os ensaios foram realizados em duas etapas. Na primeira foi verificada a influência da granulometria nas propriedades do ferro fundido cinzento analisando a granulometria do inoculante, a temperatura e o percentual de inoculação, com inoculação diretamente no jorro de metal, o qual é mais influenciável. Na segunda etapa o estudo foi realizado variando a composição química e a quantidade inoculante, a temperatura de vazamento e o percentual de adição de enxofre, todos em dois níveis diferentes (nível maior e menor). Com base nesta contextualização, os objetivos deste trabalho foram estabelecidos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar a influência da granulometria e da composição química do inoculante utilizado para a produção de ferro fundido na formação de defeitos de ferro duro e rechupe de componentes de ferro fundido cinzento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos servem de base para alcançar o objetivo geral.

- a) Avaliar a influência da quantidade de células eutéticas para formação do defeito de ferro duro e a diferenciação da mesma em diferentes espessuras do corpo de prova;

- b) Verificar a influência da temperatura de vazamento na formação de células eutéticas e o quanto esta variável afeta o resultado;
- c) Verificar a influência da composição química do inoculante na formação do defeito de ferro duro;
- d) Verificar a influência da composição química do inoculante nas propriedades de resistência à tração e dureza Brinell;
- e) Determinar um sistema de medição e aprová-lo para conseguir medir a intensidade dos defeitos, assim como criar uma escala para o mesmo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os conceitos teóricos de fabricação do ferro fundido, ferro fundido cinzento, solidificação do ferro fundido cinzento, influência dos elementos de liga na solidificação, velocidade de resfriamento, influência da temperatura de tratamento, grau de nucleação, formas de adição do inoculante (na panela ou no jorro), influência da granulometria e composição química, sendo elementos necessários para a compreensão das demais seções desta dissertação de mestrado.

2.1 FERRO FUNDIDO

Ferro fundido é basicamente uma liga ternária composta por Fe-C-Si com teor de carbono acima de 2%, podendo ser subdividida em classes como: branco, mesclado, cinzento, vermicular, nodular e, ainda, os especiais (GRASSMUECK, 2009). O que varia entre eles são, basicamente, o teor e a forma de combinação do carbono, a forma estrutural, as propriedades mecânicas, a obtenção e a temperatura de fusão.

Uma característica dos ferros fundidos é em relação ao modo de obtenção, pois, este só pode ser obtido através do processo de fundição, possuindo uma temperatura de fusão relativamente baixa. O carbono pode estar arranjado na forma de grafita ou cementita, podendo apresentar diferentes níveis de dureza, resistência mecânica, usinabilidade e desgastes. O efeito do silício é importante na composição do ferro fundido para teores de até 3%, podendo ser considerado, ao invés de apenas o carbono, uma grandeza chamada de carbono equivalente, onde há a substituição parcial do carbono pelo silício. Segundo Stuewe (2008), com este composto há uma maior tendência de se formar a estrutura de grafita e uma maior expansão eutética.

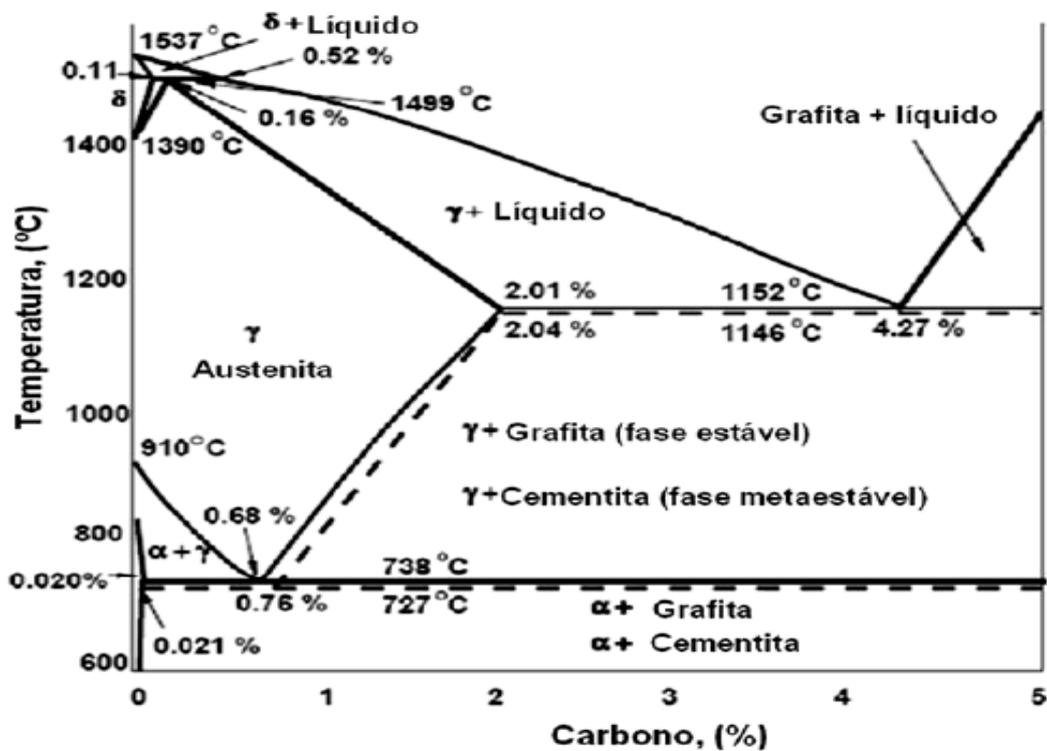
Tendo baixo custo de fusão e uma gama de aplicações, os ferros fundidos são um dos materiais mais utilizados no mundo, sendo controlado basicamente pela composição química e pelo processo de fabricação a qual é submetido.

Segundo Stuewe (2008), com um diagrama Fe-C (Figura 1) pode-se analisar como ocorre a solidificação dos ferros fundidos cinzentos, sendo este sistema representado por dois eutéticos que foram originados dos equilíbrios estável e metaestável. O equilíbrio estável, também conhecido por TEE (Temperatura de Eutético Estável) é composto por austenita + grafita e ocorre a temperatura de 1152 °C. Já o metaestável, também conhecido por TEM

(Temperatura de Eutético Metaestável), é composto por austenita + grafita (fase estável), que ocorre a temperatura de 1146 °C, e por austenita + cementita (fase metaestável). Na Figura 2 pode-se observar, através das linhas tracejadas, as temperaturas onde ocorrem os dois eutéticos, pois, a ocorrência da estrutura grafítica só ocorre dentro deste intervalo de temperatura. Desta forma, caso o material solidifique abaixo deste intervalo há o favorecimento da formação de austenita + cementita (Fe_3C).

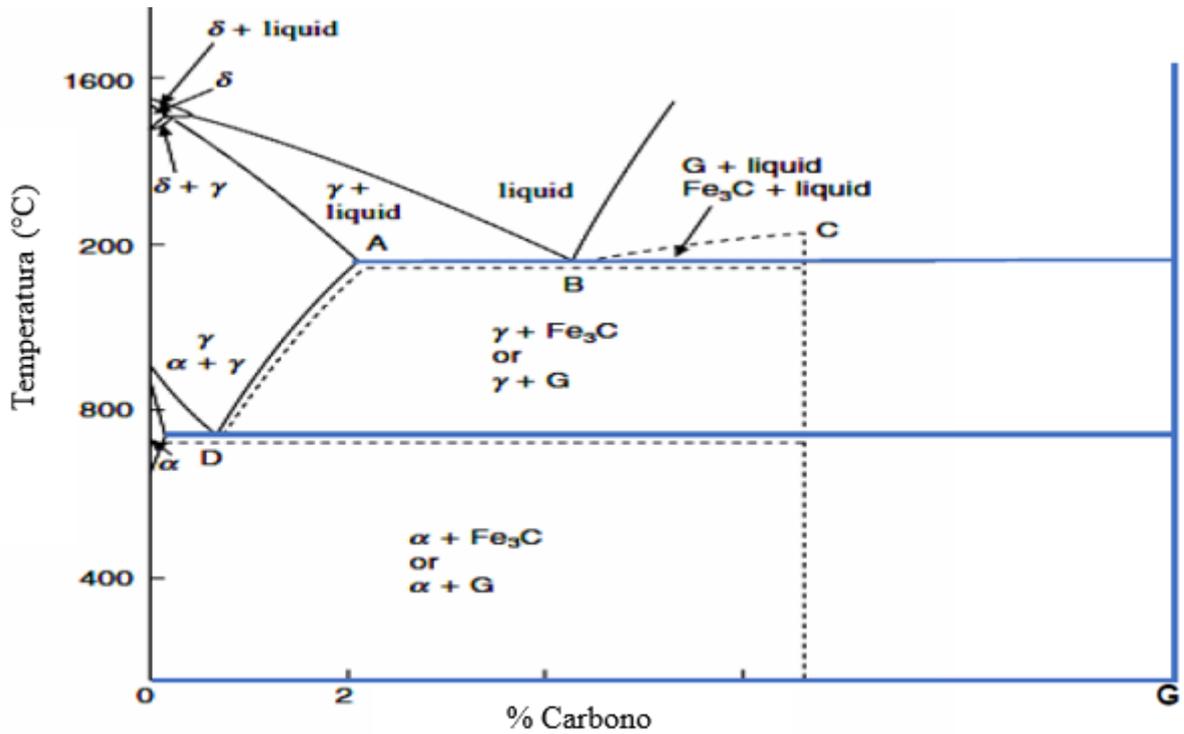
A Figura 3 apresenta a relação entre o diagrama de fase Fe-C e as curvas de resfriamento de acordo com as temperaturas estável e metaestável, demonstrando a influência do super resfriamento no tipo de grafita resultante. Assim, no ponto (A), como o super resfriamento é baixo, há a formação da grafita do Tipo “A”, no ponto (B) há a formação da grafita do tipo “D”, onde há o favorecimento da matriz ferrítica, e no ponto (C) há a formação da estrutura Ledeburita, que é uma estrutura típica de ferro fundido branco que é muito endurecida devido ao fundo de cementita com glóbulos de perlita (NASCIMENTO; SANTANA, 2016).

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.



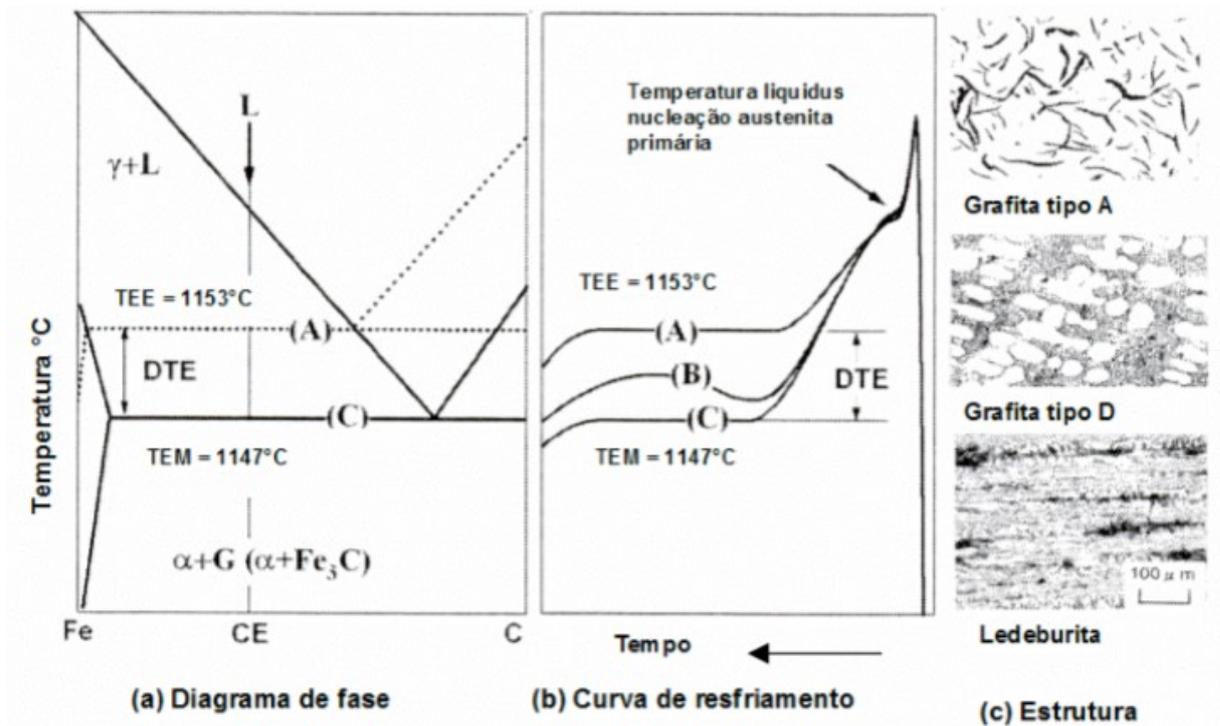
Fonte: CALLISTER (2001).

Figura 2 – Diagrama Fe-C - Composição Química.



Fonte: Adaptado de NASCIMENTO; SANTANA (2016).

Figura 3 – Relação entre o diagrama de fase Fe-C, curvas de resfriamento e microestrutura.



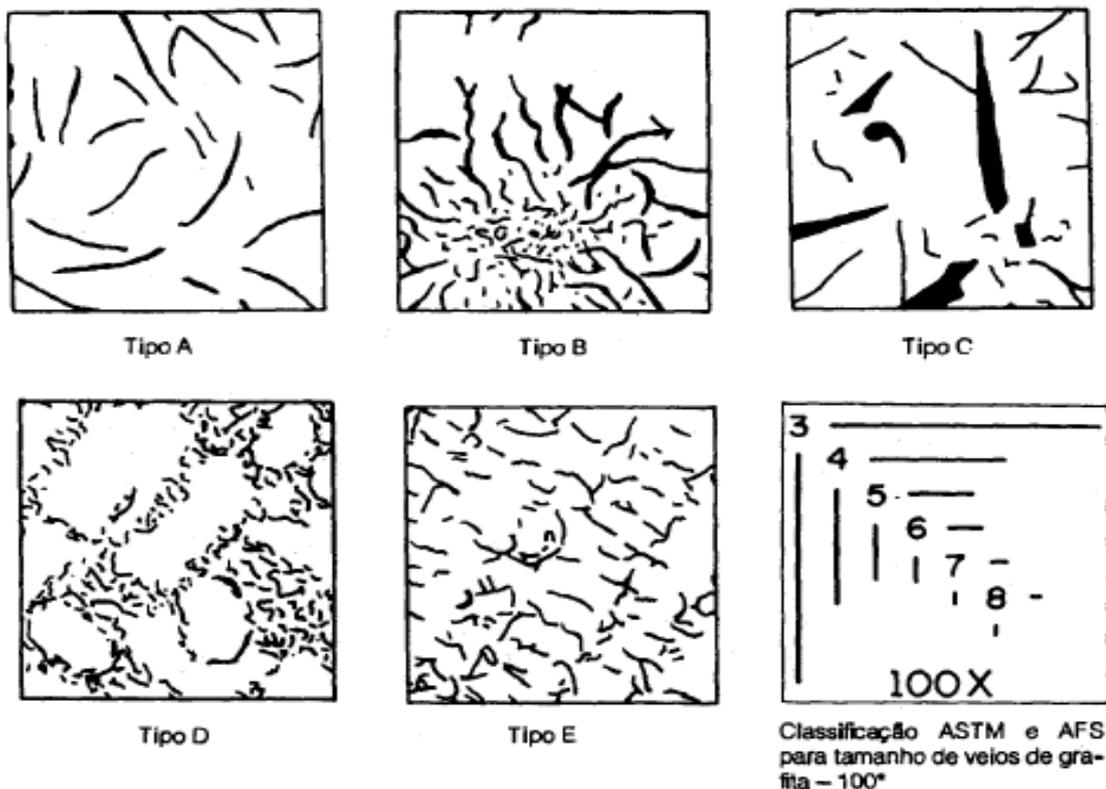
Fonte: KANNO (2005).

2.2 FERRO FUNDIDO CINZENTO

Dentre os principais tipos de ferro fundido, o mais comumente utilizado é o cinzento, onde há a presença de veios também chamados de grafitas (carbono livre), os quais possuem boa resistência mecânica, facilidade de usinagem, resistência ao amortecimento de vibrações, ao desgaste, baixo custo, baixa temperatura de fusão e dureza (STUEWE, 2008).

Devido ao alto teor de silício (1-3%) há melhoria da resistência à corrosão e a fluidez do material, podendo ser fabricadas peças de alta complexidade através do processo de fundição (NASCIMENTO; SANTANA, 2016). Uma consequência da estrutura em forma de grafitas é a ocorrência de fratura frágil no material, ou seja, não há deformação plástica evidente. Fato que inviabiliza a utilização deste material para algumas funções onde esta é um pré-requisito. Alguns fatores são fundamentais para a solidificação dos ferros fundidos cinzentos, como: velocidade de resfriamento do molde, composição química, e grau de nucleação. Estes três fatores determinam as propriedades mecânicas da peça final, conforme se pode observar na formação das diferentes características das grafitas na Figura 4.

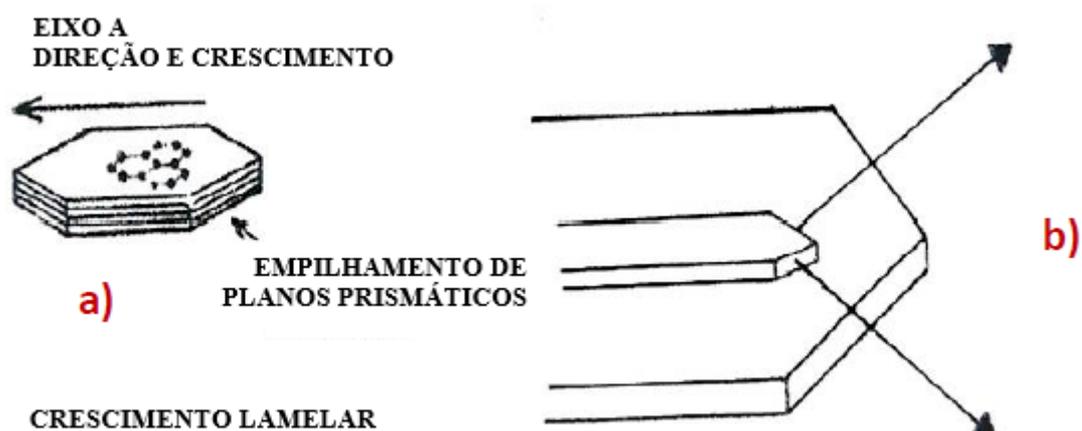
Figura 4 – Tipos de grafita.



Fonte: ASTM (1988).

Segundo Fuoco (2004), os fatores citados são determinantes para a formação, crescimento (Figura 5) e arranjo das grafitas, obtendo propriedades, composições e tipos de aplicação completamente distintos (Figura 6). A Figura 5 demonstra a forma de crescimento da grafita, que apresenta um reticulado cristalino com estrutura hexagonal compacta, e no eixo A ocorre o crescimento lamelar, o qual expõe os vértices dos planos basais na extremidade das lamelas (FUOCO, 2018).

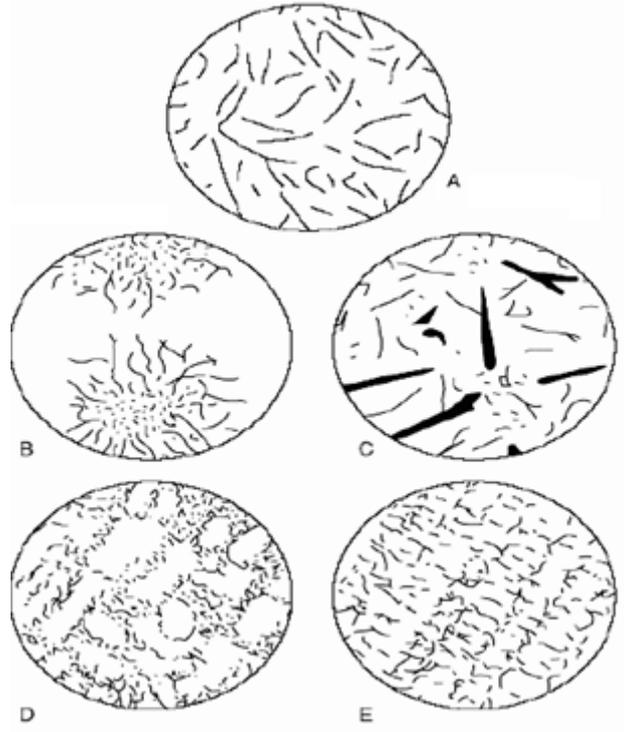
Figura 5 – Crescimento da grafita lamelar.



Fonte: Adaptado de FUOCO (2004).

Na Figura 6 são representados os diferentes tipos de grafitas que podem ocorrer durante a solidificação do metal. Na distribuição “A”, a grafita é uniforme e bem distribuída em toda a estrutura, favorecendo as propriedades físicas e mecânicas. Este tipo é obtido com baixo super resfriamento e maior grau de nucleação (NASCIMENTO; SANTANA, 2016). As grafitas com distribuição “B” e “D” são extremamente ramificadas e conhecidas como grafitas de alto super resfriamento e baixo grau de nucleação. Possuem propriedades mais baixas devido a matriz associada, que é a ferrítica. A grafita tipo “C” é uma grafita primária hipereutética caracterizada pela formação de placas grossas. Já a grafita tipo “E” é caracterizada pela formação lamelar interdendrítica e muito alinhada (FUOCO, 2018).

Figura 6 – Distribuição das grafitas.

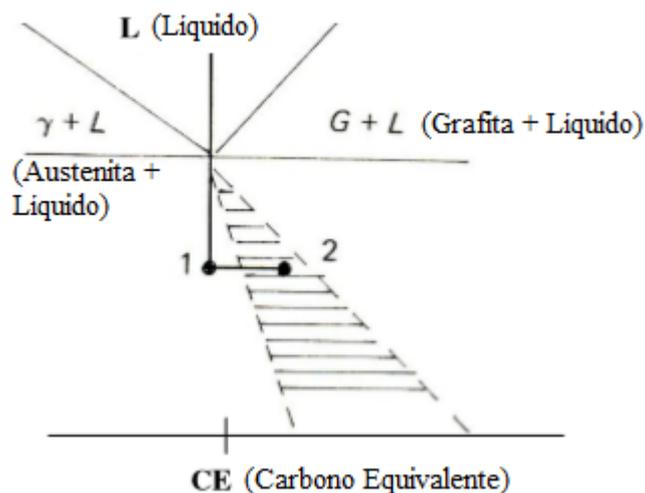


Fonte: FUOCO (2018).

2.3 ZONA ACOPLADA

Durante a solidificação do metal muitas vezes há alterações que influenciam na estrutura final da peça e isto se deve a zona acoplada ou zona de crescimento cooperativo, conforme apresentado na Figura 7 (ELLIOT, 1988). A zona acoplada é definida como um intervalo de temperatura abaixo da temperatura eutética e com composição onde as fases do eutético podem crescer a partir do banho em velocidades semelhantes (NASCIMENTO; SANTANA, 2016). Desta forma, diferentes composições podem gerar estruturas distintas devido à existência da zona acoplada.

Figura 7 – Liga eutética dentro da zona acoplada assimétrica.



Fonte: Adaptado ELLIOT (1988).

2.4 SOLIDIFICAÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

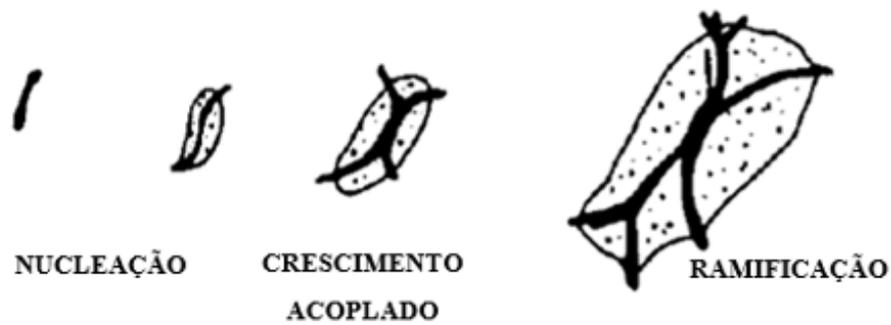
A solidificação do ferro fundido pode ocorrer de duas formas seguindo o diagrama Fe-C, onde a formação da grafita ocorre em partes preferenciais do banho metálico, chamada de nucleação heterogênea (POZZI, 2009).

A temperatura do sistema estável é decorrente da formação da austenita + grafita. Desta forma, a formação do ferro fundido cinzento acontece com pequeno super resfriamento e a uma temperatura mais alta do que a do eutético metaestável que decorre da formação de austenita + cementita (Fe_3C) (NASCIMENTO; SANTANA, 2016).

A solidificação depende basicamente da composição química (elementos de liga), da velocidade de resfriamento e do grau de nucleação do banho metálico. Pode ser dividida em: solidificação primária e eutética, sobrevivendo da nucleação e crescimento (MORROGH, 1960). A Figura 8 apresenta as etapas de formação da grafita, onde ocorre primeiramente a formação de núcleos estáveis (nucleação do metal), o crescimento acoplado conforme descrito na seção anterior e, por fim, a ramificação das grafitas.

O método de solidificação determina as propriedades finais do ferro fundido e o tipo de aplicação a que este pode ser submetido. Isto porque cada uma das grafitas apresentadas nas Figuras 4 e 6 possuem um tipo de funcionalidade e é destinada a uma utilização.

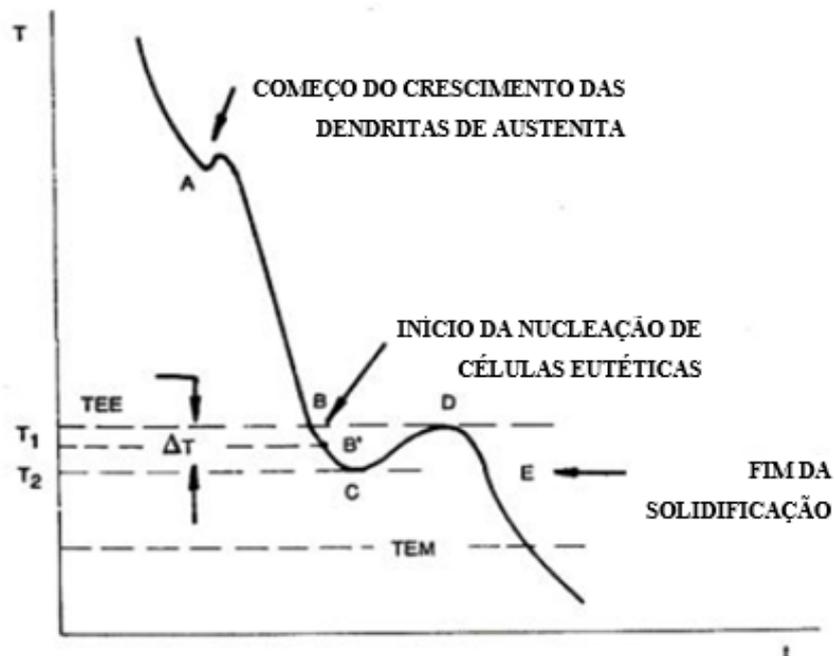
Figura 8 – Nucleação e crescimento da grafita.



Fonte: Adaptado de FUOCO (2003).

A curva de resfriamento para o ferro fundido hipoeutético é demonstrado na Figura 9, onde no ponto A ocorre a formação das dendritas de austenita, que é o primeiro composto a ser formado durante a solidificação. O ponto B corresponde ao início da nucleação das células eutéticas e o ponto C ao super resfriamento do material, que é a diferença entre o intervalo de solidificação real (ponto B) e teórico (ponto B'), recalescência (ponto D) e fim de solidificação (ponto E).

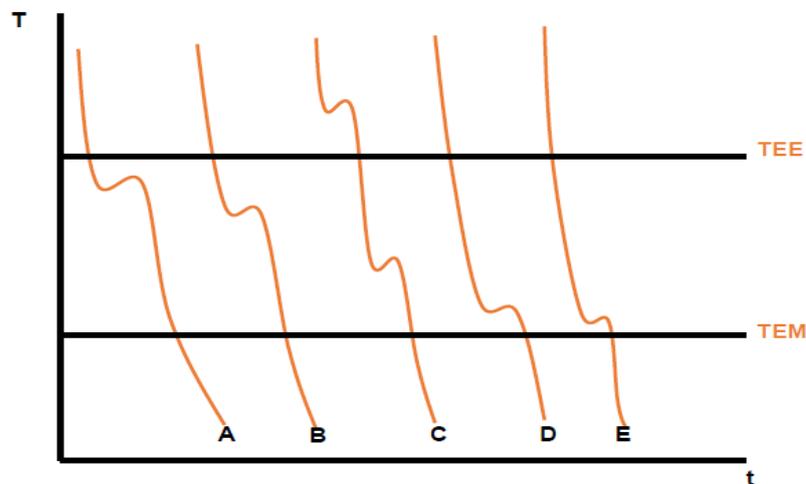
Figura 9 – Curva de resfriamento para um ferro fundido hipoeutético.



Fonte: Adaptado de SANTOS (1989).

Conforme pode ser verificado na Figura 10, uma mesma temperatura com diferentes tempos de resfriamento afeta no tipo de grafita formado. Por exemplo, para a obtenção da grafita do tipo “A”, que é a requerida para o ferro fundido cinzento, há um menor super resfriamento comparado a uma grafita do tipo “D”, que possui um maior super resfriamento. O intervalo de solidificação ocorre entre a temperatura estável (TEE), que favorece a formação de grafitas, e a temperatura metaestável (TEM), que favorece a formação de cementita (Fe_3C).

Figura 10 – Curvas de resfriamento típicas para os tipos de grafita.



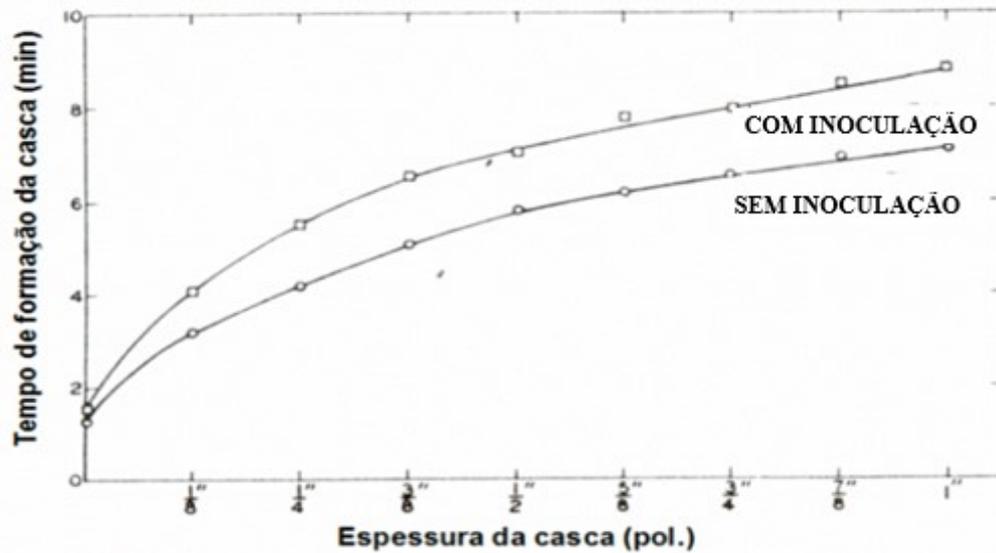
Fonte: Adaptado de FUOCO; CAVALCANTE; SANTOS (2003).

2.5 INOCULAÇÃO

A inoculação consiste na adição de partículas de elementos grafitizantes no banho líquido metálico para a formação do ferro fundido cinzento, com o intuito de diminuir o super resfriamento e formar a estrutura de grafita do tipo “A”, através da inserção de núcleos estáveis (NASCIMENTO; SANTANA, 2016)

Quanto maior o percentual de inoculação, maior a interferência no comportamento dimensional da peça na solidificação, com a diminuição do super resfriamento e a alteração da velocidade do crescimento das células eutéticas. Com este aumento no número de núcleos, há a constituição de uma solidificação mais pastosa e a criação de casca sólida nas paredes do molde, conforme apresentado na Figura 11 (FUOCO, 2003).

Figura 11 – Influência da inoculação no tempo de formação da camada sólida



Fonte: Adaptado de FUOCO (2003).

Com o processo de inoculação há o favorecimento da formação dos núcleos de grafita no banho, assegurando que a solidificação ocorra dentro do sistema estável, pois há a diminuição do super resfriamento, evitando assim a formação de carbonetos e coquilhamento das peças.

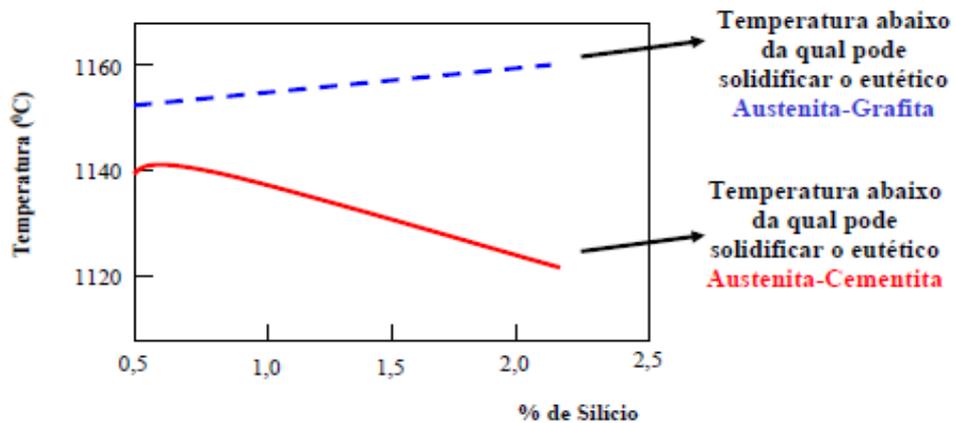
A nucleação do banho pode ser favorecida, além da inoculação, pela composição do banho, pois elementos como enxofre, manganês, cério e estrôncio aumentam o poder de nucleação dos inoculantes através do favorecimento da formação de centros de nucleação (WENDONG; YAN, 2016).

2.6 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NA SOLIDIFICAÇÃO

Considerando que o diagrama Fe-C possui dois eutéticos, diferenciando-se por um ser estável e o outro metaestável, alguns elementos de liga adicionados ao banho metálico podem influenciar na diferença de temperatura entre eles, sendo esta de apenas 7 °C.

Certos elementos tem um poder maior de grafitização, aumentando a faixa de temperatura entre os eutéticos, fato que favorece a formação da grafita, tendo como principais: o silício e o alumínio (STUEWE, 2008). Porém, o alumínio, quando utilizado em excesso, pode gerar diversos defeitos no material. Desta forma, opta-se por utilizar o silício na grande maioria das aplicações, o qual tem um alto efeito na decomposição dos carbonetos, abrindo o intervalo de solidificação de acordo com o aumento do percentual de silício, conforme Figura 12.

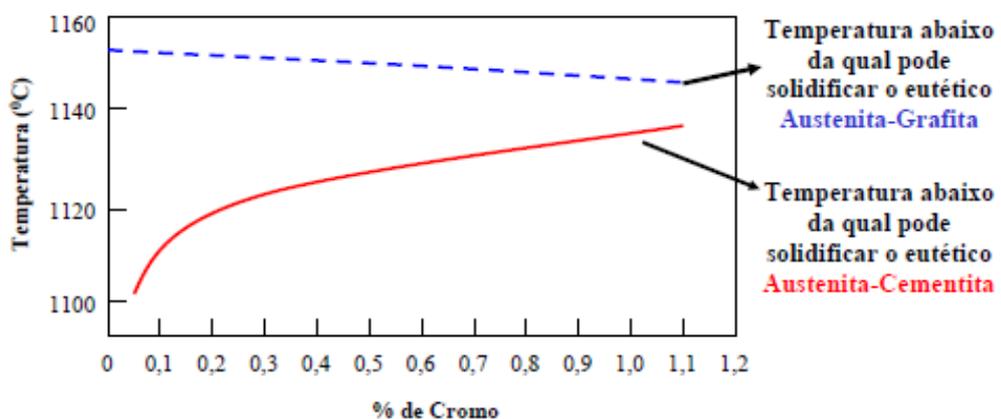
Figura 12 – Influência do silício nas temperaturas de equilíbrio estável e metaestável.



Fonte: Adaptado de NASCIMENTO; SANTANA (2016).

Por outro lado, alguns elementos como o cromo e o molibdênio tem efeito contrário, ou seja, favorecem a solidificação na fase metaestável, diminuindo assim a diferença de temperatura entre os dois eutéticos, conforme apresentado na Figura 13 (STUEWE, 2008). Assim, ao utilizar o cromo, que é o mais comum estabilizador desta fase no diagrama Fe-C, há o favorecimento do aparecimento de carbonetos e formação do ferro fundido branco (NASCIMENTO; SANTANA, 2016).

Figura 13 – Influência do cromo nas temperaturas de equilíbrio estável e metaestável.



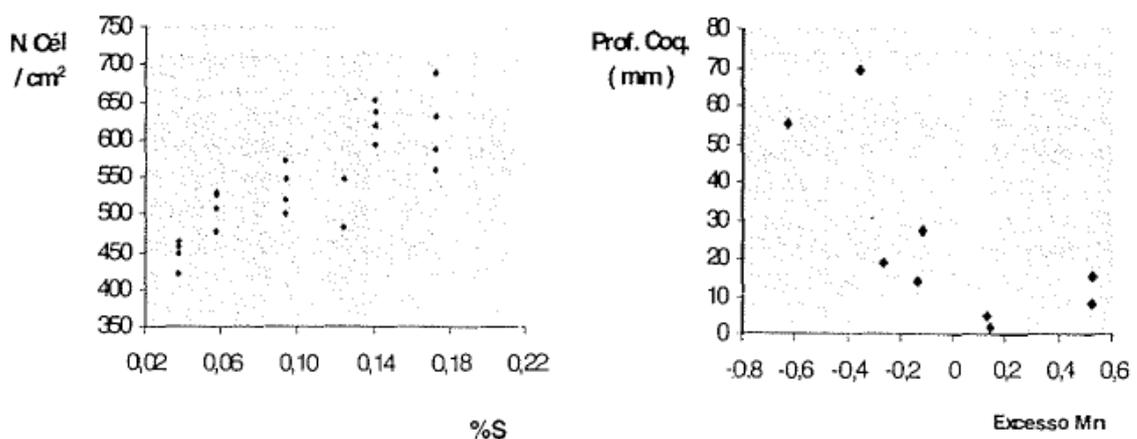
Fonte: Adaptado de NASCIMENTO; SANTANA (2016).

2.7 INFLUÊNCIA DO ENXOFRE E MANGANÊS NA SOLIDIFICAÇÃO

Na solidificação a principal função do manganês é a neutralização do enxofre, mas em excesso o mesmo pode atuar como elemento perlitizante (PIESKE, 1975). O excesso de enxofre sem a adição de manganês tende a formação de sulfetos de ferro segregados no contorno de grão das células, mas quando utilizado com balanceamento correto favorece a formação de grafitas do tipo “A”. Segundo Pieske (1975), é recomendada a utilização de teores de enxofre de 0,04-0,12% em ferro fundidos cinzentos, pois, nesta faixa o mesmo atua como elemento nucleante, aumentando o número e influenciando no crescimento das células eutéticas (NASCIMENTO; SANTANA, 2016).

Conforme pode ser verificado na Figura 14, o aumento do teor de enxofre tende a aumentar o número de células eutéticas (Figura 14a), assim como teores maiores de manganês diminuem a profundidade de coquilhamento (Figura 14b), de acordo com o que foi comentado no parágrafo anterior.

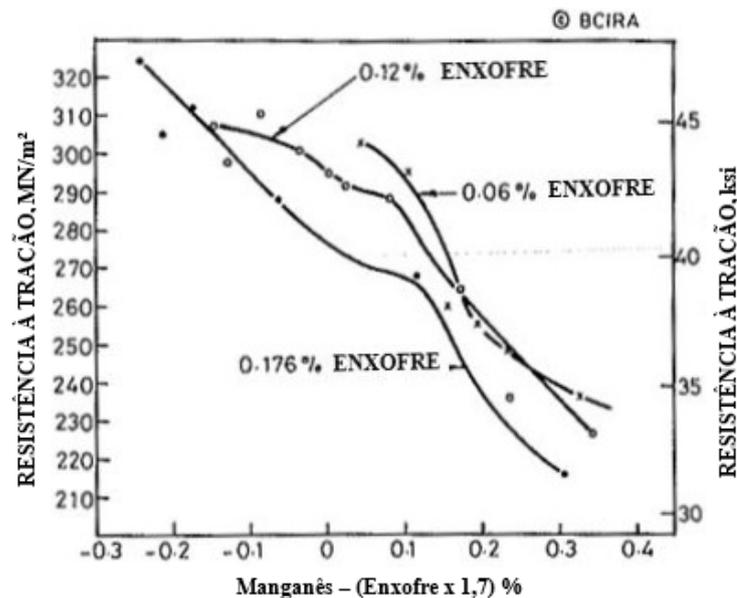
Figura 14 – Influência da quantidade de: a) enxofre (S), b) manganês (Mn).



Fonte: SANTOS; MERY; SILVA (2001).

Segundo Adalberto (1983), quando os teores de enxofre e manganês não seguem a estequiometria (Figura 15), tendo valores crescentes e não balanceados, podem diminuir bruscamente a propriedade mecânica de resistência à tração do ferro fundido cinzento devido a formação da ferrita livre na matriz. Sendo esta uma matriz mais maleável e com baixas propriedades mecânicas atreladas, há a diminuição da resistência à tração.

Figura 15 – Influência das diferentes proporções de enxofre e manganês na resistência à tração.



Fonte: Adaptado de FULLER (1979).

2.8 VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO

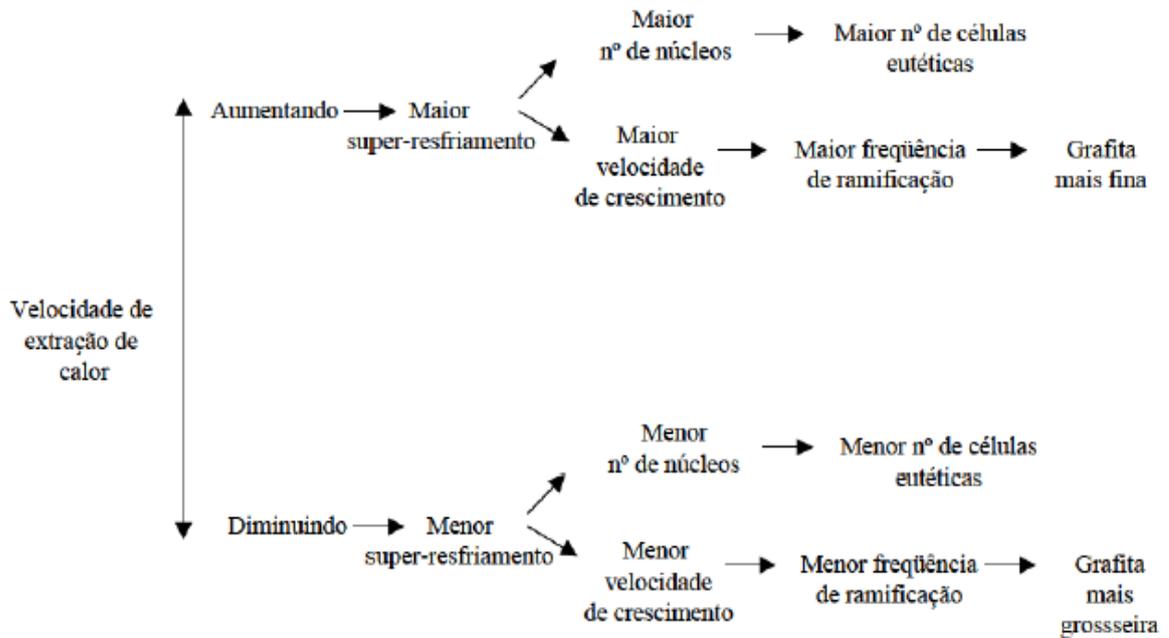
Quanto maior é a velocidade de resfriamento maior será a taxa de extração de calor expelida pelo molde, sendo este fator influenciado principalmente pela espessura do molde, ou seja, quanto mais fina a peça mais rápida é a extração e perda de temperatura da peça para o molde e maior a tendência ao coquilhamento, pois, maior o super resfriamento durante a solidificação da peça.

Segundo Pozzi (2009), a quantidade de extração de calor e o resfriamento são diretamente proporcionais. Assim, quanto maior a extração de calor, maior o número de núcleos, do grau de nucleação e da velocidade de crescimento das células, conforme diagrama da Figura 16.

Segundo Stuewe (2008), altas temperaturas provocam baixas velocidades de resfriamento, reduzindo a condução de calor através deste. Em ferros fundidos são utilizadas temperaturas mais altas, com o objetivo de evitar a formação de ferro fundido branco em espessuras finas da peça, isto porque há a necessidade da redução da velocidade de resfriamento evitando a formação de carbonetos, como ilustra as curvas da temperatura em função do tempo, conforme demonstrado na Figura 17. As temperaturas citadas na Figura 17 são respectivamente

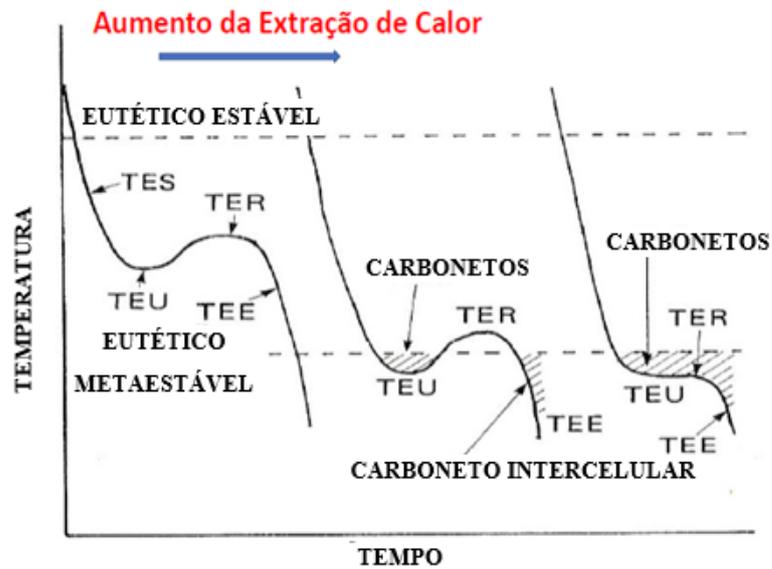
TES (Temperatura Início de Nucleação), TEU (Temperatura Super resfriamento), TER (Temperatura de Recalescência), e TEE (Temperatura Fim de Solidificação).

Figura 16 – Velocidade de extração de calor.



Fonte: PIESKE (1975).

Figura 17 – Extração de calor x Super Resfriamento.



Fonte: POZZI (2009).

2.9 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO

Quanto maior a temperatura de vazamento menor será a velocidade de resfriamento e, conseqüentemente, há a tendência a uma grafita mais grosseira, motivo pelo qual para vazamento de ferros fundidos utiliza-se uma temperatura mais alta quando comparado a outras ligas, como a de alumínio. Isto ocorre porque quanto mais alta é a temperatura, mais rápido o molde fica encharcado de calor e em decorrência há a redução da velocidade de resfriamento, obtendo a curva para formação da grafita tipo “A” (STUEWE, 2008).

A temperatura em que ocorre a inoculação é um dos fatores mais importantes para que a mesma seja efetiva, pois, temperaturas muito elevadas destroem os centros ativos de nucleação da grafita, diminuindo assim a eficiência do inoculante (MORROGH, 1960). O número ou quantidade de células eutéicas presentes no metal líquido é fundamental na estrutura final da peça, pois, estes são os núcleos que estarão presentes dentro do banho e vão crescer e ramificar a estrutura grafitica.

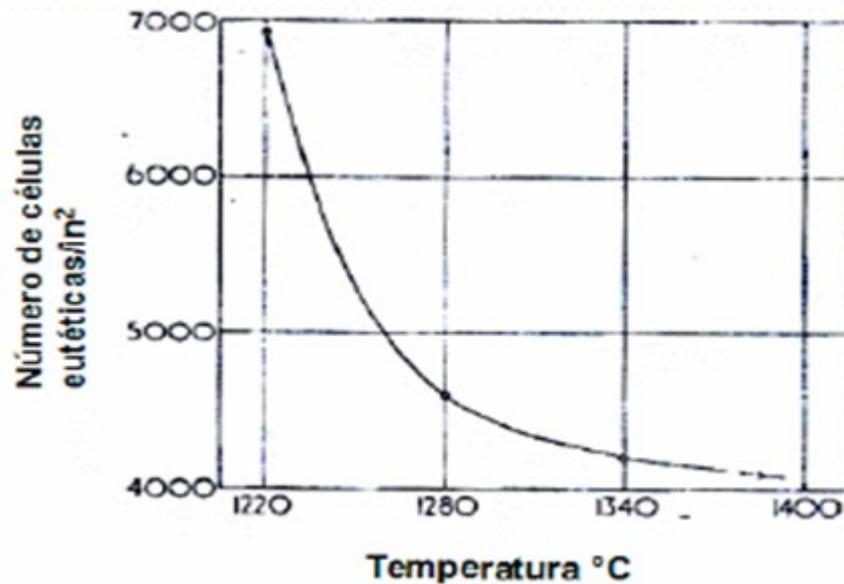
Quanto mais baixa a temperatura, maior a facilidade da formação de núcleos ativos, a ramificação das grafitas, mais refinada a estrutura e maior será a velocidade de resfriamento do molde.

Quanto menor a temperatura de vazamento, maior é o número de células em crescimento, porém para que este fator seja efetivo no tratamento, a mesma não pode ser muito baixa, pois, há a diminuição da velocidade de crescimento das células eutéicas e maior tendência ao coquilhamento. Porém, a baixas temperaturas de tratamento a dissolução do inoculante pode não ser completa, não sendo assim tão eficiente, podendo causar defeitos nas peças (STUEWE, 2008).

2.10 GRAU DE NUCLEAÇÃO

O grau de nucleação indica a quantidade de núcleos que estão disponíveis no banho metálico, ou seja, o número de células eutéicas presentes e em crescimento, o qual pode variar por diversos fatores como: temperatura de vazamento, quantidade de inoculação, composição química do metal, velocidade de resfriamento, espessura da peça e tratamentos de banhos metálicos (FUOCO, 2018). A Figura 18 mostra a representação do comportamento decrescente do número de células eutéicas em função da temperatura de vazamento.

Figura 18 – Efeito da temperatura de vazamento no número de células eutélicas.



Fonte: Adaptado de SOUZA (1977).

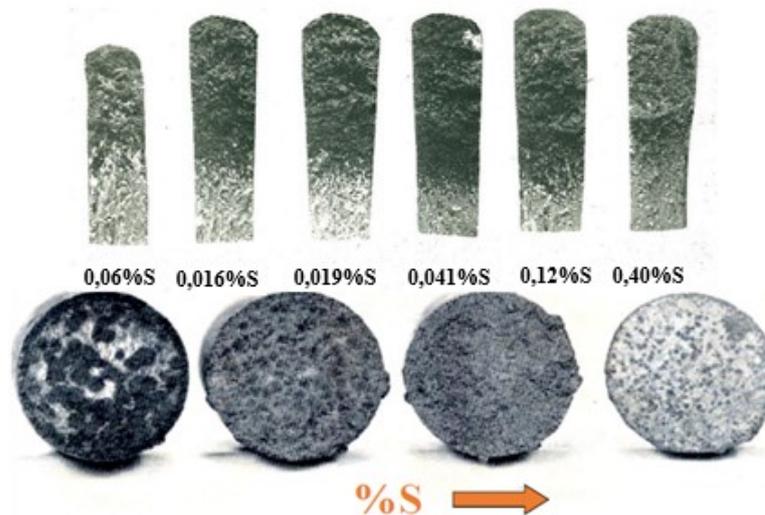
O tratamento de inoculação consiste em adicionar ligas, na maioria das vezes composta por ferro silício, com o objetivo de aumentar o número de células eutélicas (STUEWE, 2008). Com isto há a redução do super resfriamento do ferro fundido, para obtenção de grafita do tipo “A” de menor tamanho, mesmo com uma maior velocidade de crescimento, isto porque com o tratamento de inoculação há a formação de muitos núcleos ativos, limitando o crescimento destas células devido a quantidade presente no banho.

Com base no diagrama apresentado na Figura 19, é possível verificar que quanto maior o grau de nucleação menor a tendência ao defeito de coquilhamento (ferro duro) e maior a tendência à formação da estrutura grafítica, devido principalmente ao tipo de super resfriamento e a quantidade de células eutélicas presentes no banho líquido (VERRAN, 2013).

O efeito do enxofre no grau de nucleação pode ser visto na Figura 20, onde há o aumento do número de células eutélicas com o aumento do percentual deste elemento, fato que é explicado pelo enxofre favorecer a formação da grafita do tipo “A”, atuando assim como “grafitizante”, em percentuais de 0,06-0,12% segundo Adalberto (1983).

consideravelmente a velocidade de crescimento das células eutéticas, aumentando o super resfriamento e favorecendo assim a formação de ferro fundido branco (SANTOS, 2001).

Figura 21 – Efeito do enxofre na solidificação.



Fonte: Adaptado de CHAVES FILHO (1981).

2.11 FORMAS DE ADIÇÃO DO INOCULANTE

Segundo Verran (2013), o inoculante pode ser adicionado de quatro formas diferentes, sendo estas a inoculação na panela, no molde, por arame recheado, ou pelo jato/jorro de vazamento, conforme Figura 22.

Figura 22 – Técnicas de adição de inoculante no banho metálico.



Fonte: LERNER (1999).

Os dois métodos mais comuns são na panela de vazamento e no jorro de metal. Para vazamentos manuais a inoculação é realizada na panela, utilizando-se uma granulometria de 1-3 mm e em percentuais de 0,10-0,35 % em peso para ferros fundidos cinzentos (LERNER, 1999).

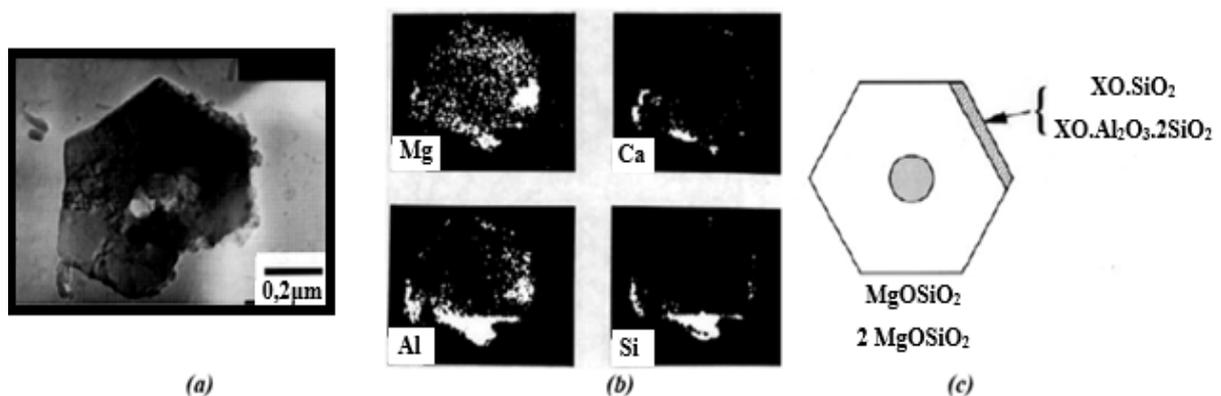
Em vazamentos automatizados a inoculação é feita diretamente no jorro metálico, no momento do vazamento do molde, com granulometria 0,2-0,5 mm e em teores de 0,05-0,10% em peso para ferros fundidos cinzentos. Quando se utiliza a inoculação no jorro faz-se na panela de transferência uma pré-inoculação do metal líquido, que será transferido para o forno vazador (LERNER, 1999).

A inoculação, quando é aplicada diretamente no jorro ou na transferência de metal líquido, interfere diretamente no grau de nucleação do banho. Porém, um fator a ser considerado é o *fading* do inoculante, ou seja, a perda da nucleação com o tempo, sendo este fator muito crítico em vazamentos manuais (STUEWE, 2008).

2.12 TEORIA DOS ÓXIDOS

Segundo Nascimento (2016), a interface entre a grafita e o líquido possui alta energia, em torno de dez vezes maior do que ocorre em interfaces óxidos/líquido, desta forma é mais difícil da grafita nuclear diretamente (Figura 23).

Figura 23 – Nucleação da grafita seguindo a teoria dos óxidos sulfetos.

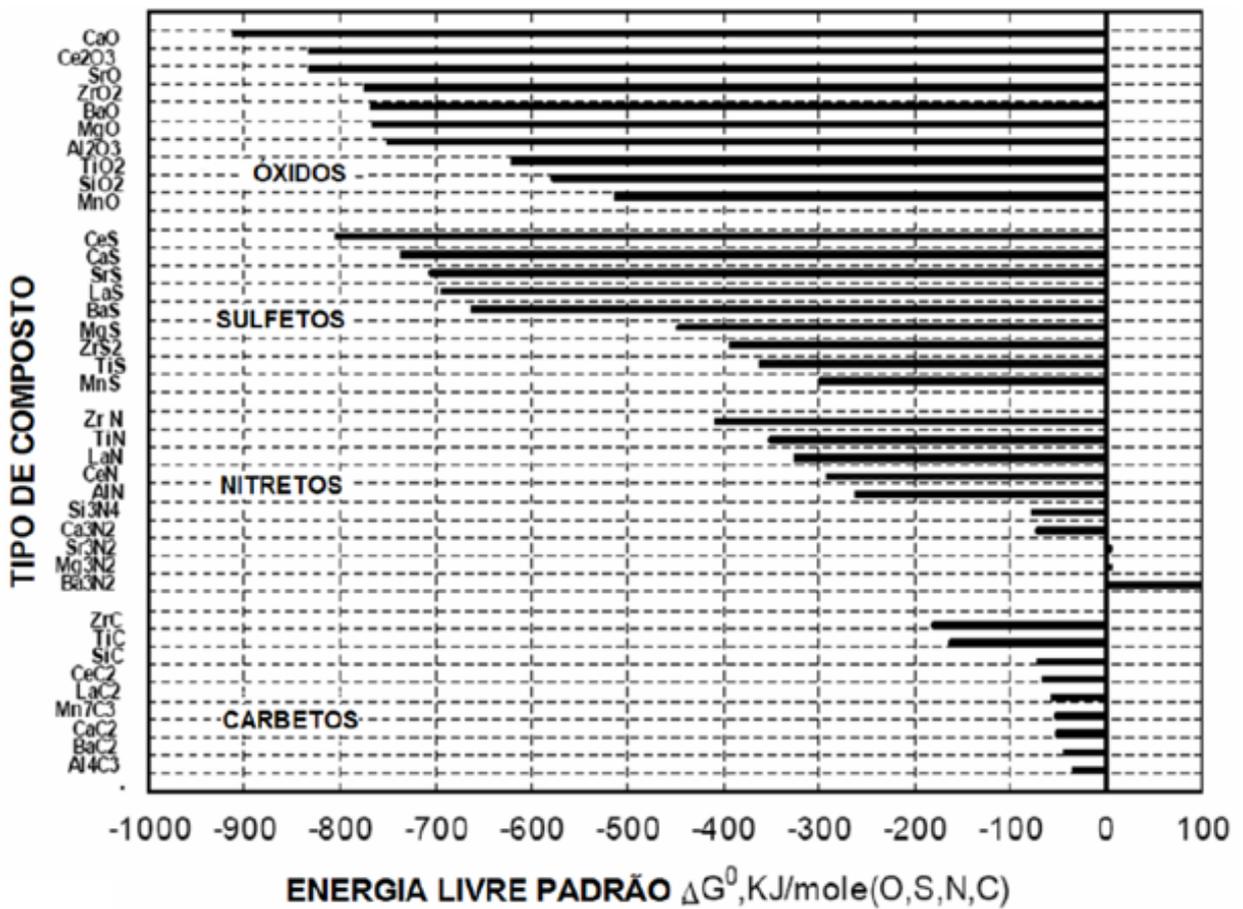


Fonte: Adaptado de FUOCO (2003).

Assim, quanto menor a energia livre, maior a estabilidade do substrato, sendo os óxidos os substratos mais favoráveis a nucleação da grafita, seguido dos sulfetos, nitretos e carbonetos, conforme Figura 24 (RIPOSAN, 2005).

É de suma importância que estes substratos estejam sólidos no momento da solidificação, deve ser maior que o raio crítico, ser estável o suficiente para não ser dissolvido completamente, ter densidade similar à do banho, estabilidade termodinâmica, baixo desajuste de reticulado com a Grafita.

Figura 24 – Classificação dos elementos segundo as teorias dos óxidos, sulfetos, nitretos e carbetos.



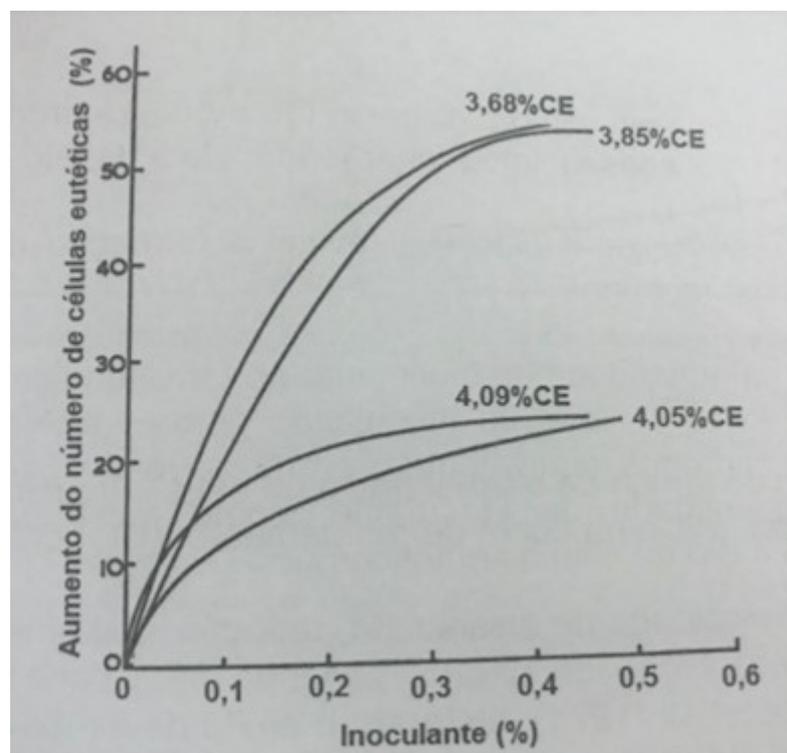
Fonte: RIPOSAN (2005).

2.13 INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A quantidade de inoculante adicionada no banho metálico é de suma importância para a determinação do grau de nucleação do metal líquido, isto porque a mesma determina a quantidade de núcleos disponíveis e em crescimento. Porém, além das variáveis de processo já mencionadas, há outro fator determinante para variação desta quantidade, que é a granulometria do inoculante (POZZI, 2009).

Outro fator muito importante é o comportamento do carbono equivalente em relação a quantidade de inoculante adicionada ao banho, Figura 25, isto porque quanto menor o carbono equivalente maior o número de células eutéticas.

Figura 25 – Influência da quantidade de inoculante.



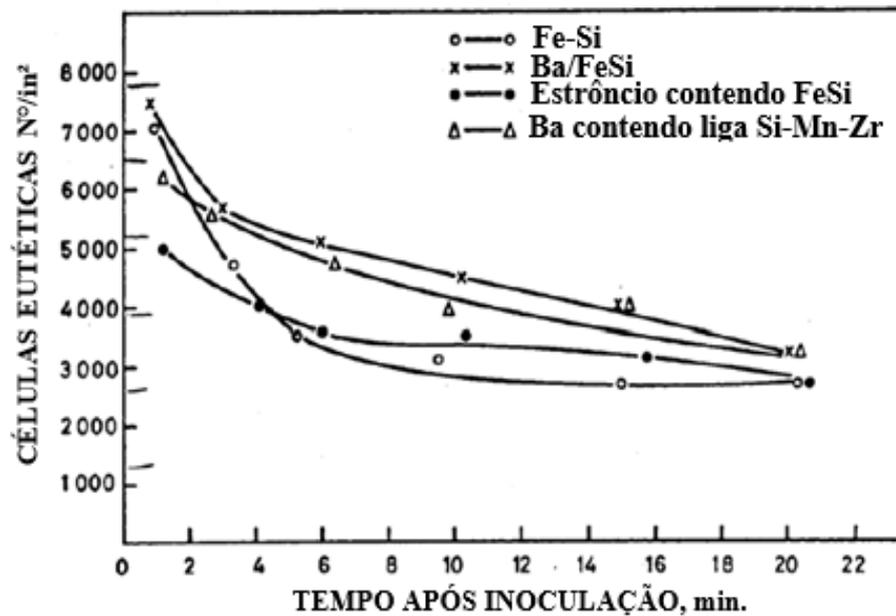
Fonte: GUESSER (2004).

Conforme já citado na seção 2.5, para cada processo de vazamento há um tipo de inoculação, com uma faixa granulométrica específica do inoculante. Porém, dentro destas especificações de coeficiente granulométrico, pode haver variações durante o fornecimento, armazenamento ou inserção, como, por exemplo, segregação do inoculante durante a armazenagem.

Assim, caso ocorram estas variações automaticamente ocorrerá uma alteração no grau de nucleação, pois, o excesso de inoculação pode ocasionar porosidades e aumentar a solubilidade de gases metálicos no banho líquido, favorecendo a formação de rechupes (STUEWE, 2008).

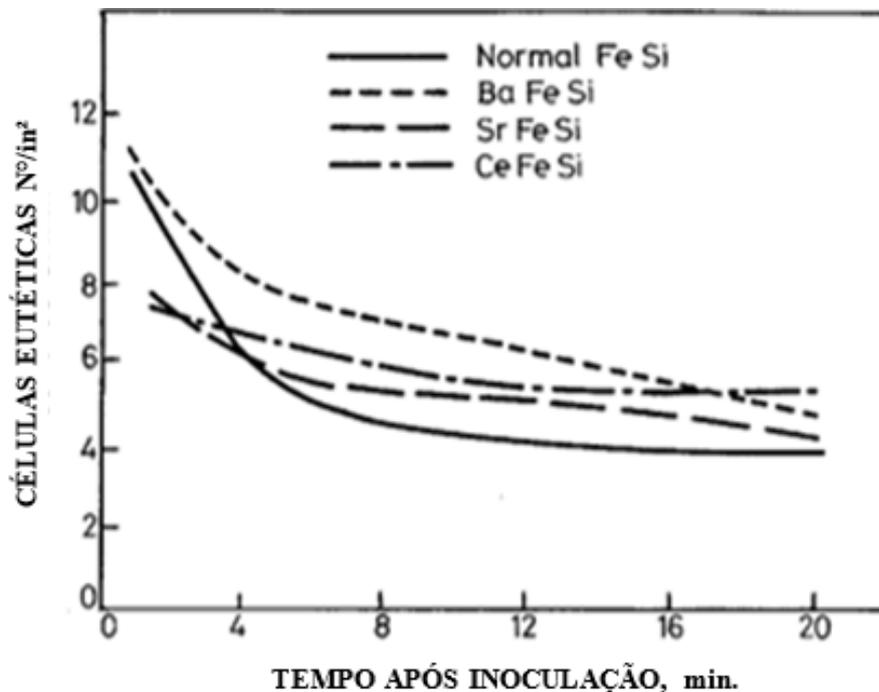
Caso ocorra o contrário, ou seja, a falta de inoculante ou exceda o tempo de *fading* do mesmo (Figuras 26 e 27) também há a ocorrência de problemas, pois, ocorre a diminuição da quantidade de células eutéticas e, conseqüentemente, o favorecimento a defeitos, como ferro duro (coquilhamento) e rechupes secundários.

Figura 26 – Tempo Transcorrido entre Adição e Vazamento.



Fonte: Adaptado de BCIRA (1983).

Figura 27 – Redução de nódulos após inoculação.

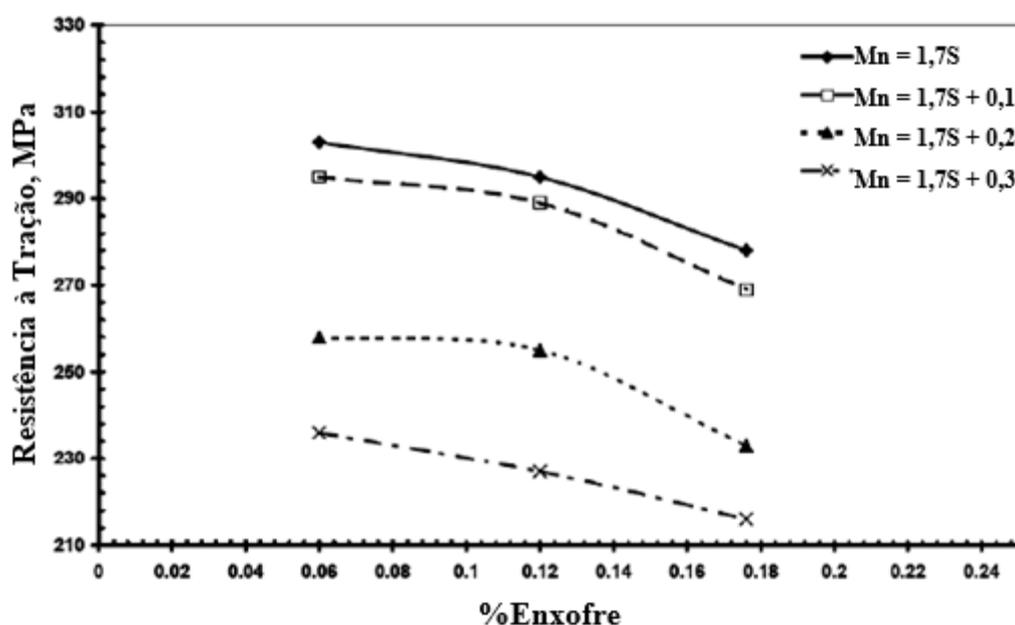


Fonte: Adaptado de POWELL (1977).

Outro fator que pode influenciar no grau de nucleação e no número de núcleos ativos é a composição química do inoculante, isto porque dependendo da composição são utilizados percentuais maiores ou menores de inoculação (Figura 28).

Os inoculantes mais comuns são o de ferro silício, sendo adicionados de 0,1-0,5% em peso, e de cério e estrôncio em teores menores, de 0,1-0,25%. Esta diferença, segundo Fuoco (2018), é porque há inoculantes que tem elementos em sua composição que são mais grafitizantes, ou seja, favorecem a formação da grafita, sendo adicionados teores muito menores.

Figura 28 – Efeito do enxofre e manganês.



Fonte: Adaptado de ALDERSON (1983).

O percentual de enxofre afeta a frequência de solidificação, a nucleação e o crescimento das células eutéticas, sendo rejeitado pelo líquido no estado sólido. Porém, é de suma importância a adição de manganês, pois o mesmo é utilizado para neutralizar o enxofre. Como o equilíbrio da reação tem que estar deslocado para a direita, é necessário utilizar um teor maior de manganês do que a reação estequiométrica (Figura 28).

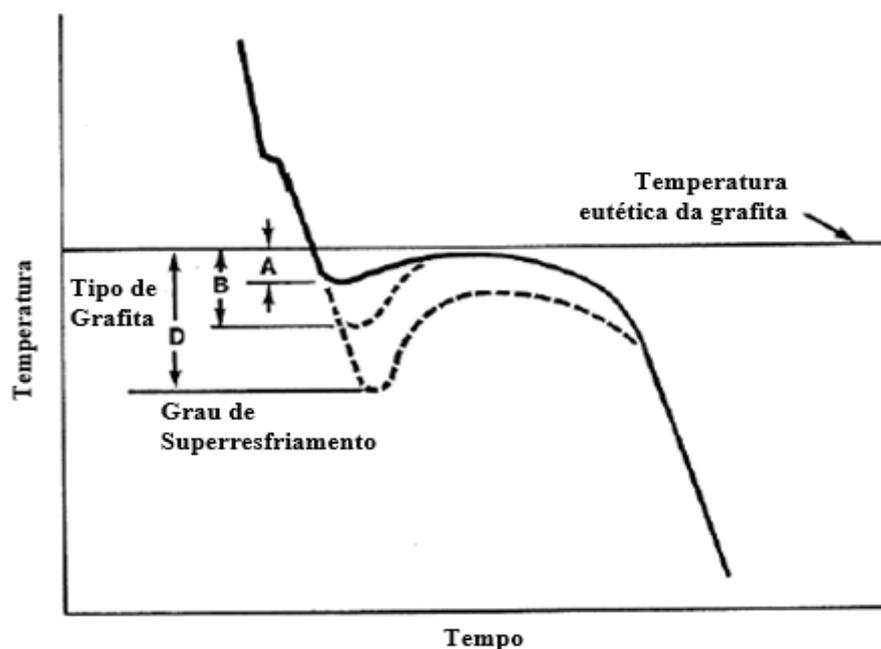
Mas, segundo Nascimento (2016), o manganês em teores crescentes promove a formação de carbonetos e desloca a porcentagem de carbono ao eutético para teores mais elevados, isto porque o manganês tende a diminuir as temperaturas de eutético estável e metaestável (SOUZA; SANTOS, 2000).

O aumento da concentração de enxofre causa a diminuição da velocidade de crescimento das células eutética, aumentando o super resfriamento, favorecendo a formação de ferro fundido branco e a solidificação no eutético metaestável.

Desta forma, na Figura 28 pode-se observar que quanto maior o percentual de enxofre menor o valor de resistência à tração, devido a matriz ferrítica existente e que quanto maior o valor além da estequiometria em relação ao manganês, há a diminuição do valor de resistência à tração.

A Figura 29 apresenta as curvas de resfriamento e os seus respectivos super resfriamento, demonstrando que quanto menor o super resfriamento, maior a probabilidade de formar grafita tipo “A” bem distribuída, devido a estar mais próximo do eutético estável. Quanto maior este super resfriamento, maior a probabilidade de formação de grafita do tipo “D” e solidificação no eutético metaestável, composto por uma grafita mais refinada e com matriz ferrítica, pois, devido a forma irregular da grafita há a tendência ao ancoramento do carbono na borda da mesma (ALDERSON, 1983)

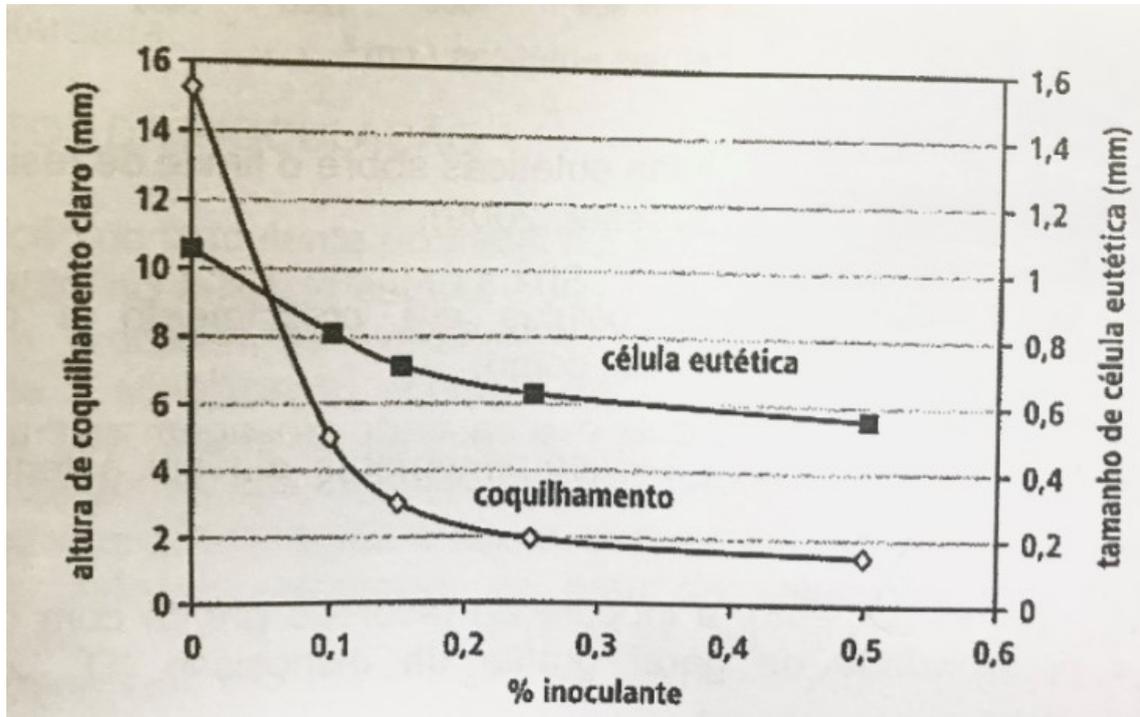
Figura 29 – Curva para obtenção da grafita do tipo “A”.



Fonte: Adaptado de ALDERSON (1983).

A Figura 30 mostra que quando maior o percentual de inoculação menor a tendência ao coquilhamento, isto devido ao aumento do grau de nucleação do banho. Assim como o tamanho das células eutéticas, quanto maior o grau de nucleação, maior a quantidade de núcleos e menor o tamanho das células eutéticas (GUESSER, 2009).

Figura 30 – Altura de coquilhamento e tamanho das células eutéticas em diferentes percentuais de inoculação.



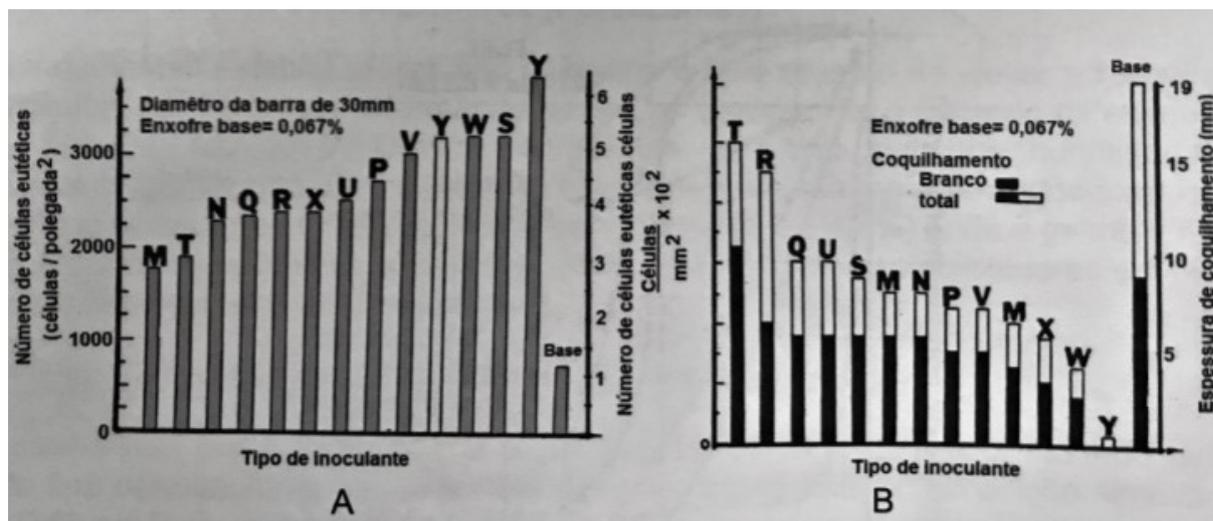
Fonte: GUESSER (2009).

2.14 INFLUÊNCIA DO ESTRÔNCIO

Como já citado na teoria dos óxidos, seção 2.12 do presente trabalho, o estrôncio influencia diretamente na estabilidade do banho líquido, pois o mesmo se liga ao enxofre do banho líquido (NASCIMENTO, 2016). Desta forma, quanto maior o percentual de enxofre maior a tendência da formação de grafita do tipo “A” e aumento das propriedades físicas e mecânicas.

A Figura 31 demonstra que dependendo da composição química do inoculante há alteração do número de células eutéticas e alteração da altura coquilhada. O inoculante Y é a base de estrôncio, obtendo assim um maior número de células eutéticas, maior grau de nucleação e uma menor espessura de camada coquilhada.

Figura 31 – Diferentes composições de inoculante em relação ao número de células.



Fonte: GUESSER (2004).

2.15 ESTADO DA ARTE

Para a realização da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foram escolhidas as bases de dados para artigos científicos Scopus (www.scopus.com) e Google Acadêmico (<https://scholar.google.com.br>), com a atualização até dia 20/10/2020. A base de periódicos Scopus foi acessada através do portal de periódicos CAPES, permitindo o acesso a artigos através da identificação universitária, e o Google Acadêmico através da plataforma Google com livre acesso.

Esta RSL foi direcionada a buscar artigos, livros ou teses sobre o tema desta dissertação com a utilização de palavras chave, para que desta forma houvesse uma metodologia para a realização da pesquisa.

Para esta busca utilizaram-se as palavras no idioma inglês na base de dados, sendo os termos da primeira pesquisa “Gray Cast Iron”, “Inoculation”, “inoculants”, “chemical composition”, “granulometry” e “Fe-Si”, além do uso do operador lógico AND. Para a segunda pesquisa foram utilizadas os termos “Gray Cast Iron”, “Inoculation”, “inoculants”, “chemical composition”, “granulometry” e “Strontium” e para terceira pesquisa foram utilizadas as palavras “Gray Cast Iron”, “Inoculation”, “inoculants”, “chemical composition”, “granulometry” e “Fe-Si-Sr”. A busca foi restringida a títulos, resumos e palavras chaves. A quantidade de artigos a partir desta pesquisa já estava mais refinada, pois, a data foi limitada de 2000 ao presente e restringida a apenas artigos, teses ou livros nas áreas de engenharia e ciências dos materiais.

Com os critérios citados acima aplicados para pesquisa na base do Google Acadêmico foram listados para primeira pesquisa vinte e seis (26) resultados, porém em nenhum destes foi abordada a composição química, os objetivos e ensaios realizados no presente estudo. Na segunda pesquisa foram listados três e três resultados (33) e na terceira e última pesquisa não foi encontrado nenhum artigo ou documento com as palavras chaves inseridas.

Utilizando os mesmos critérios e palavras chaves para pesquisa na base de periódicos Scopus não foram listados nenhum artigo ou trabalho relacionado para o tema em nenhuma das combinações citadas. Porém, ao se retirar a palavra chave “Granulometry”, foram obtidos para a primeira pesquisa três (3) resultados, sendo que os mesmos não tiveram nenhuma relação com este estudo. Para segunda pesquisa foram retiradas as palavras “Granulometry” e “Chemical Compositions” e inserido o termo “Strontium” e assim listados sete (7) resultados, sendo encontrado um artigo em comum nas duas bases de dados e com a adequação parcial ao tema.

Assim, apenas um artigo teve uma proposta próxima ao exposto no presente trabalho, tendo como título “Efeitos da inoculação no ferro fundido cinzento perlítico com alta condutividade térmica e resistência à tração” (Effects of Inoculation on the Pearlitic Gray Cast Iron with High Thermal Conductivity and Tensile Strength), tratando-se de um artigo recente com publicação em 2018 (GUIQUAN, 2018). O objetivo principal do trabalho foi melhorar a condutividade térmica e a resistência à tração de ferros fundidos perlíticos através da inoculação com diferentes tipos e composições de inoculantes, sendo estes: Fe-Si-Zr, Fe-Si-Sr e SiC (Carbeto de silício).

Foram produzidas amostragens com vários tipos de microestrutura para avaliação da influência de diferentes inoculantes, com o objetivo de analisar as características da estrutura com foco no comprimento da grafita e do percentual de dendritas primárias, para com base nestas identificar o material com melhor condutividade térmica e resistência.

Foram fundidos nove lingotes em um forno de indução utilizando sucata e ferro gusa (70% e 30% respectivamente), e inseridas ligas de ferro comumente usadas para produção do ferro fundido cinzento. A liga utilizada foi de ferro fundido cinzento, mas com um teor significativo de fósforo (0,33%) e um menor percentual de silício (~1,6%). Os testes de tração foram realizados utilizando o padrão “dog bone” com 20 mm de diâmetro e comprimento de 60 mm, sendo realizados três testes em cada composição e realizados testes de difusividade térmica. Além disso, foram avaliadas as microestruturas através de microscopia ótica e eletrônica de varredura. Corrosão colorida também foi realizada para avaliar a fração de área da austenita primária.

Nos resultados e discussão foram apresentadas todas as microestruturas e avaliada a presença da grafita do tipo “A” em todas as amostras, também visto que com o aumento do carbono equivalente houve o aumento do teor de grafita e a diminuição de dendritas primárias. As diferenças importantes entre várias inoculações aparecem principalmente no comprimento máximo do floco, porcentagem de dendritas primárias e tamanho das colônias eutéticas.

Com a avaliação dos diferentes inoculantes pode-se concluir que para um CE (carbono equivalente) semelhante, o inoculante Fe-Si-Zr resultou em flocos da grafita mais curtos, dendritas primárias moderadas e tamanho moderado das colônias eutéticas. Já as amostras inoculadas com Fe-Si-Sr possuíam um maior comprimento da grafita, a maior porcentagem de dendritas primárias e as menores colônias eutéticas, sendo o comprimento máximo da grafita obtido com o tratamento com inoculante a base de SiC, apresentando semelhanças com as amostras inoculadas com Fe-Si-Sr. Além disso, o SiC inoculou uma quantidade de dendrita inferior aos demais e apresentou as maiores colônias eutéticas.

Partículas de MnS foram encontradas em todas as amostras produzidas, havendo diferenças na distribuição e quantidade das mesmas, dependendo do inoculante utilizado. As amostras inoculadas com Fe-Si-Zr tiveram o maior número de partículas de MnS, enquanto o menor número foi encontrado em amostras inoculadas com SiC. A maior resistência à tração e a maior condutividade térmica foram obtidas pelas amostras inoculadas com Fe-Si-Sr, já os inoculados com Fe-Si-Zr têm maior resistência, mas menor condutividade térmica do que os inoculados por SiC.

Desta forma, o artigo concluiu que, na prática, a estrutura ideal pode ser obtida por uma boa inoculação. Enquanto adições de SiC geram flocos de grafita longos e do tipo “A” quando inoculados, não parecem fornecer locais de nucleação para a austenita. As amostras com inoculantes de Fe-Si-Zr e Fe-Si-Sr inocularam austenita primária e a grafita, promovendo a nucleação de MnS em alta temperatura. No entanto, a estrutura e as propriedades ideais foram encontradas em ferros inoculados com Fe-Si-Sr. Este artigo mostrou a influência do inoculante nas principais propriedades do ferro fundido, além disto demonstrou através de estruturas o grande poder nucleante do inoculante com composição de Fe-Si-Sr semelhante a uma parcela dos resultados obtidos no trabalho realizado nesta dissertação. Mas, com a avaliação de diferentes ligas de ferro, composições de inoculante, experimentos, condições de processo, objetivos e sem a avaliação da influência da variação granulométrica.

Desta forma, com base na pesquisa realizada através da RSL foi possível constatar que nenhum trabalho foi realizado com a proposta desta dissertação de mestrado, sendo exclusivo

o estudo para as composições químicas abordadas, os ensaios comparativos, as variáveis de processo e os fatores manipulados durante os experimentos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando que o objetivo geral deste trabalho consiste em investigar a influência da granulometria e da composição química do inoculante utilizado para a produção de ferro fundido na formação de defeitos de ferro duro (Coquilhamento) e rechupe de componentes de ferro fundido cinzento, esta seção visa descrever os procedimentos que foram utilizados, as análises micro/macroestruturais, a medição de dureza, a quantidade de ferro duro (coquilhamento), a resistência à tração e a contagem de células eutéticas, com base na definição de um corpo de prova padrão que gera a variação de espessura de peças e induz a alteração das propriedades citadas acima.

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

A liga utilizada neste estudo é a de ferro fundido cinzento, composta por veios de grafita, da classe FC-200 e para a realização desta análise utilizou-se o determinador de carbono e enxofre Leco, modelo CS230. A carga do forno é composta por sucata de aço (maior parte), retorno de ferro fundido e ligas (Carbeto, Ferro silício, enxofre, manganês, pedra calcária).

Na realização desta análise foi utilizado um cadinho de porcelana na balança tarada com uma medida padrão de fundente (0,5 g para ferro fundido cinzento) e selecionada a faixa de calibração de acordo com o teor de carbono da amostra, que no caso de ferros fundidos a faixa analítica é de 2 a 4%, e uma massa de 0,5 g selecionando o padrão analítico. Foi pesado 0,1 g de amostra, adicionada uma medida de fundente, e colocado o cadinho no pedestal do forno, fechando o mesmo em seguida.

Foram realizados oito ensaios de composição química nos corpos de prova, ou seja, uma composição para cada tratamento do plano de amostragem executado. Através desta análise pode-se verificar se a composição química do material sofreu alterações após a fusão do mesmo.

3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO INOCULANTE

A composição química do inoculante influencia diretamente nas propriedades mecânicas da peça final, isto porque o mesmo altera o grau de nucleação e conseqüentemente, na formação de defeitos e na efetividade do tratamento de inoculação.

Desta forma, foi utilizado inicialmente um inoculante de Fe-Si para verificação da influência da granulometria, e após este teste, com base nos resultados foi realizado um segundo

estudo verificando a influência do estrôncio na composição do inoculante e na alteração nas propriedades mecânicas do material. A Tabela 1 apresenta os dados da composição química dos dois inoculantes mencionados.

Tabela 1 – Composição química dos inoculantes.

Elemento (%)		Produto	
		Fe-Si	Fe-Si-Sr
Silício	Si	60-69	73-78
Calcio	Ca	0,5-2,0	0,1 Máx.
Bário	Ba	0,3-1,0	-
Estrôncio	Sr	-	0,6-1,2
Zircônio	Zr	3,0-5,0	1,0-1,5
Cério	Ce	-	-
Manganês	Mn	2,5-4,0	-
Alumínio	Al	0,5-1,5	3,5-4,5
Lantânio	La	-	-

Fonte: O autor (2019).

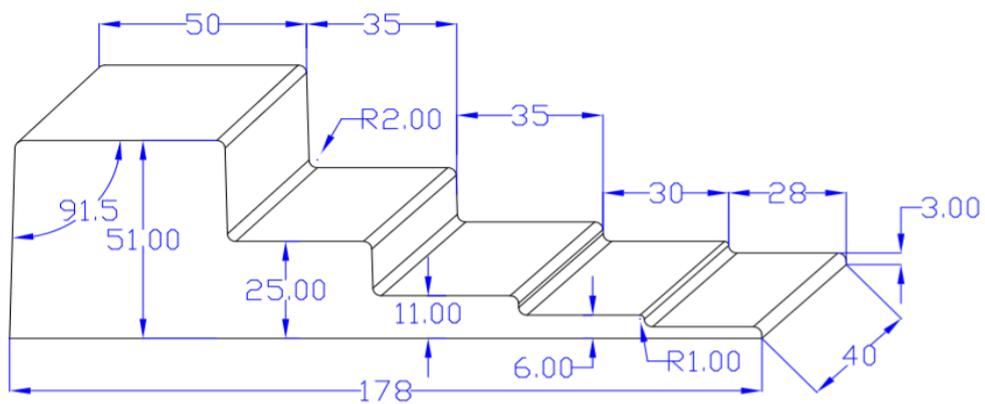
3.3 CORPO DE PROVA PADRÃO

Para a realização deste trabalho foi decidido fabricar e realizar os testes em um corpo de prova padrão composto por cinco degraus de espessuras diferentes especificadas na Figura 32. Isto porque estes corpos de prova contemplavam uma gama de espessura de peças, sendo estrategicamente aplicados para os testes, pois, podiam-se ter respostas para cada espessura ou tipo de peça existente. Além disto o mesmo induz a formação de defeitos metalúrgicos, isto porque o mesmo é escalonado podendo verificar os efeitos em diferentes espessuras e nas variações destas. O quinto degrau que possuía menor espessura foi utilizado para a medição da altura de coquilhamento (ferro duro) (STUEWE, 2008).

Conforme Pozzi (2009), o corpo de prova foi fabricado com espessuras variando de 4 a 32 mm e largura de 50 mm. Os ferramentais foram fabricados com as dimensões especificadas na Figura 32 e o canal de alimentação calculado para suprir todo enchimento da peça, conforme Figura 33. No primeiro experimento os moldes foram fabricados pelo processo de areia verde e vazamento automatizado, pois, o objetivo era identificar o efeito da granulometria com a inoculação sendo realizada diretamente no jorro de metal. Já o segundo experimento foi utilizado o processo de areia ligada quimicamente e vazamento manual, devido a necessidade

de avaliar a influência do *fading* nos dois inoculantes utilizados. Com base nisto foram fabricadas 72 amostras deste corpo de prova, sendo de cada tratamento retiradas três amostras para verificação se há variação entre o mesmo tratamento. Os cálculos de canal de alimentação e massalote foram realizados seguindo as dimensões necessárias para a realização do experimento e colocados em placas para moldagem (Figura 33).

Figura 32 – Medidas modelo escalonado.



MODELO PARA PROCESSO MANUAL
 MATERIAL: ALUMÍNIO
 GRAU DE INCLINAÇÃO 1,5°
 RAIOS NÃO COTADOS 2mm

Fonte: O autor (2019).

Figura 33 – Ferramental escalonado em placa.



Fonte: O autor (2019).

3.4 INOCULANTES UTILIZADOS

Os inoculantes foram caracterizados nos experimentos como “A” e “B”, sendo que o inoculante “A” possui uma granulometria mais fina que o inoculante “B”, isto porque ao adicionarmos os dois em um tempo de 10s, foi verificado que o inoculante “B” transferiu um grama a mais do que o inoculante “A”, sendo observada esta diferença através da pesagem dos dois inoculantes. Os dois inoculantes possuem maior proporção Fe-Si (68% em peso) e são adicionados de 0,4-2,5% em peso de metal líquido, dependendo do tipo de peça a ser produzida. Para este trabalho, no primeiro teste foi variada a granulometria do inoculante e os percentuais adicionados do mesmo para verificar a influência da granulometria. Os tipos de granulometria e amostras retidas em cada peneira podem ser vistos na Figura 34, para desta forma verificar a variação em cada distribuição.

Já no segundo teste foi variada a composição química com a mesma granulometria, 1-3mm, mas avaliando com diferentes variáveis de processamento e composição da liga do metal base.

Figura 34 – Material (inoculante) retido em cada peneira.



Fonte: O autor (2019).

Para a realização do primeiro teste foram utilizados dois tipos de inoculantes, com a mesma composição química, porém variando o tamanho e distribuição granulométrica de 0,2 a 0,7 mm (Figura 34 e Tabela 2).

Tabela 2 – Especificação versus percentual retido por peneira de cada fornecedor.

Especificação 0,2 - 0,6mm			
Material	% Retido - Especificação	% Retido - Inoculante "A"	% Retido - Inoculante "B"
Prato	Máx. 3	0,0-0,05	0,0-0,04
140 (0,105mm)	Máx. 15	2,0-18,0	11,0-18,0
70 (0,210mm)	Mín. 40	78,0-92,0	66,0-77,0
35 (0,500mm)	Máx. 40	2,0-6,0	11,0-21,0
25 (0,710mm)	Máx. 0	0,0-1,2	0,6-1,2

Fonte: O autor (2019).

3.5 PARÂMETROS DE VAZAMENTO E INOCULAÇÃO

Para a realização do primeiro teste foram variados os parâmetros de granulometria do inoculante (diferentes fornecedores), temperatura de vazamento, calibração do equipamento de inserção do inoculante no molde e quantidade de inoculação em peso.

Além das variáveis consideradas principais e com maior relevância para gerar variação no experimento, foram monitoradas as variáveis de composição química da liga, abertura de molde e compactação.

O equipamento utilizado para vazar o metal no molde foi um forno vazador, com abertura na parte inferior, controlado mecanicamente, sendo a inoculação realizada diretamente no jato de metal ao ser inserido no molde. Este equipamento é composto por um silo de armazenamento de inoculante contendo roscas e sensores que garantem a entrada do mesmo no molde, tendo uma precisão de $\pm 10\%$ em peso.

A calibração do equipamento é realizada todos os dias através de uma balança de precisão com erro de aproximadamente $\pm 0,4$ gramas, e a quantidade adicionada depende da quantidade necessária para inserção na peça. O jato de inoculante inicia em torno de 3 segundos antes do metal começar a vazar e precisa estar direcionado para o centro do canal de alimentação do molde para a inoculação ser efetiva.

Conforme citado anteriormente, a moldagem foi monitorada para que em todos os tratamentos estivesse dentro da especificação e não fosse uma fonte de variação relevante.

Basicamente os fatores estudados estão mais relacionados ao vazamento, porém as etapas básicas de medição de temperatura no início de cada tratamento, vazamento em forno

vazador e método de inserção de inoculante seguiram os parâmetros usuais do processo, conforme Tabela 2.

Já no segundo experimento, com base nos resultados obtidos no primeiro estudo, foram alteradas as variáveis de temperatura de vazamento, composição química do inoculante, percentual de adição e inserção de enxofre e manganês na liga. O segundo estudo foi todo realizado com inoculação na panela, dosando o inoculante nas proporções requeridas para cada tratamento.

3.6 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Em estudos acadêmicos e em muitas indústrias é comum a realizações de experimentos de um fator por vez (OFAT) e tentativas e erros. Mas, em experimentos é muito complexo variar apenas um fator e manter as demais variáveis fixas. Desta forma, experimentos planejados são mais indicados para entender estatisticamente a variação de vários fatores simultaneamente (MASON, 1989). Um experimento planejado como DOE (*Design of experiments*) é o experimento mais indicado para problemas complexos onde há mais de uma variável interagindo sobre o processo, possibilitando assim verificar qual o impacto de cada fator sobre a variável resposta requerida.

Segundo Czinnou (1997), experimentos planejados onde mais de um fator é analisado por vez requer menos rodadas de experimento (combinação de variáveis - tratamentos), recursos, tempo e material, sendo assim mais atrativos para realização. As informações obtidas são mais precisas, a variabilidade é reduzida e menor é a chance de erro com a realização destes experimentos. A metodologia Six Sigma é um conjunto de experimentos que tem o objetivo de melhorar processos, encontrar a causa raiz de problemas complexos e eliminar não conformidades. Mas a implicação desta metodologia requer a quebra de paradigmas, mudanças culturais de realização de testes e disciplina para o uso correto das ferramentas disponibilizadas.

Para o planejamento dos ensaios deste trabalho, os quais possuem uma elevada complexidade entre os tratamentos, foi utilizada a metodologia Six Sigma, evitando-se trabalhos de tentativa e erro e experimentos onde se considera apenas uma variável.

Neste trabalho foi verificada a influência de cada variável escolhida e o quanto a mesma interfere no resultado, buscando identificar o principal fator para a ocorrência dos defeitos estudados. A Tabela 3 demonstra as teorias e previsões que foram estudadas durante o experimento planejado com o objetivo de manipular as mesmas para geração de variação entre os tratamentos realizados. Foram realizados 24 diferentes tratamentos e de cada um

foram retirados três corpos de prova para a verificação da variação entre as amostras, combinando todos os fatores. A Tabela 3 apresenta os principais fatores para a ocorrência dos defeitos investigados, sendo de suma importância para o experimento devido aos resultados serem comparados a teoria para a validação dos mesmos.

Tabela 3 – Principais fatores para ocorrência dos defeitos.

Fator	Teoria
A – Granulometria do inoculante	Conforme as teorias estudadas, a fonte de variação granulometria do inoculante tem uma grande influência neste estudo. Esta variável influencia diretamente no percentual de inoculação (POZZI, 2009; NASCIMENTO, 2016).
B - Temperatura de Vazamento (°C)	A temperatura é um dos fatores mais críticos para formação dos defeitos, pois a mesma está relacionada diretamente com o desempenho do inoculante (STUEWE, 2008).
C - Calibração	Dependendo de qual calibração for utilizada pode ser inserida uma quantidade maior de inoculante no molde, causando um excesso de inoculação e podendo alterar a estrutura, causando o defeito de rechupe (Apenas forno vazador possui, vazamento manual usa caneca para dosagem) (STUEWE, 2008).
D - Inoculação	Influencia principalmente na contração/expansão da peça durante a solidificação. Sendo mais influenciada pela forma de adição e a quantidade (LERNER, 1999).
E - Composição química do inoculante	A composição química do inoculante é um fator fundamental para o bom desempenho do mesmo, já que a mesma influencia no tipo de grafita formada e no desempenho do inoculante durante a solidificação (NASCIMENTO, 2016).

Fonte: O autor (2019).

3.7 PREPARAÇÃO E ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Todas as amostras em corpo de prova escalonado foram identificadas com o número do tratamento e com a letra do dia de realização do experimento, seguindo a ordem da árvore de amostragem. A Figura 35 apresenta a peça fundida molde escalonado. Após a desmoldagem,

os mesmos foram jateados com granalha de aço e retirados os canais de alimentação para as análises.

Para evitar influência de efeito de borda nas análises, os corpos de prova escalonados foram seccionados no meio (25mm de espessura) em toda extremidade lateral. Os ensaios utilizados para caracterização dos mesmos foram: análise microestrutural para identificação do tipo de grafita, dureza Brinell, contagem do número de células eutéticas, composição química, resistência à tração, verificação da altura de coquilhamento (ferro duro) e análise estatística para avaliar a influência de cada tratamento na resposta final.

Figura 35 – Peça fundida molde escalonado.



Fonte: O autor (2019).

3.7.1 Análise microestrutural

Para a realização das análises microestruturais as amostras foram cortadas, retificadas, lixadas com as lixas 80, 240, 600 e 1.200 Mesh e passaram pelo processo de polimento em máquina com pasta adiamantada de 3 microns. Após o polimento as amostras foram limpas e atacadas com reativo para revelação de células eutéticas durante aproximadamente 30 segundos e sob agitação constante, pois, apenas com este é possível identificar as células eutéticas na estrutura.

Para análise da morfologia da estrutura e tipos de grafita de cada amostra foi utilizado um microscópio ótico Leica, modelo Reichert Polyvar 2 met, em uma faixa de aumento de 40 a 2000 vezes, acoplado a um computador com programa de análise de imagens.

As amostras foram caracterizadas de acordo com o número de células eutéticas, utilizando uma região conhecida (retículo) para ter um padrão de medição, sendo assim, utilizada a mesma área em degraus (escalonado) e tratamentos diferentes.

3.7.2 Análise macroestrutural

A análise macroestrutural foi realizada através de estereoscópio da marca Kontron, com ampliação de 3,5 a 90 vezes, para verificação da camada coquilhada e determinação do percentual de ferro duro em cada amostra através da medição com paquímetro, conforme apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Método de medição do defeito de ferro duro.



Fonte: O autor (2019).

3.7.3 Análise por ensaio mecânico de dureza Brinell

Foi realizado o ensaio de dureza Brinell, sendo o mais indicado para análise de dureza de ferros fundidos cinzentos devido à estrutura de veios de grafita. O durômetro Brinell utilizado é da marca Otto Wolpert, modelo BK 300^a, com cargas que podem variar de 187,5 a 3000 kgf. As amostras foram analisadas nos degraus de 1 a 4, conforme Figura 36, no meio de cada região, sendo realizadas quatro medidas em cada corpo de prova para a carga de 750 kgf de acordo com a NBR NM 187-1/99.

3.7.4 Análise por ensaio mecânico de tração

Para a verificação da influência da composição química do inoculante na resistência à tração do material foram realizados ensaios mecânicos de tração em uma Máquina Universal MTS, modelo E45 com capacidade 30 kN.

Para ferros fundidos cinzentos o corpo de prova para ensaio de tração foi fabricado conforme norma ISO-185, tipo “B”, sendo usinado de um pino bruto fundido com 30 mm de diâmetro em um torno CNC. O ensaio é realizado a velocidades constantes que podem variar

de 1 a 5 mm/min, com comprimento inicial de 50 mm e diâmetro de 20 mm e ensaiados na máquina universal de tração MTS.

3.7.5 Quantidade de células eutéticas

A célula eutética é um produto de solidificação onde ocorre a reação eutética, ou seja, a região onde ocorre a nucleação e crescimento da grafita, iniciando a formação da matriz do ferro fundido cinzento. Para a realização dos ensaios é necessário observar a região de ensaio, que foi preparada metalograficamente, e com aumento de 50 vezes contar o número total de células eutéticas a partir de imagens obtidas num microscópio ótico.

Para revelação das células eutéticas foi utilizado o reagente “Stead” durante aproximadamente 30 segundos sob agitação constante. Este reagente é composto por 10 g de cloreto de magnésio, 2,5 g de cloreto cúprico, 5 ml de ácido clorídrico e 250 ml de álcool etílico (ABNT 6849, 1982). O número de células eutéticas (NCE) é dado pela expressão:

$$\text{NCE} = \frac{X}{0,9213} \text{ (Células Eutéticas/mm}^2\text{)}$$

em que X é a média aritmética dos 10 pontos e o fator 0,9213 é a área demarcada na lente para o aumento de 50 vezes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seção de resultados e discussão foi dividida em duas partes, onde a primeira cita os resultados do primeiro experimento focando na influência da granulometria do inoculante. Já a segunda parte traz os resultados do segundo experimento, o qual focou os estudos da influência da composição química do inoculante.

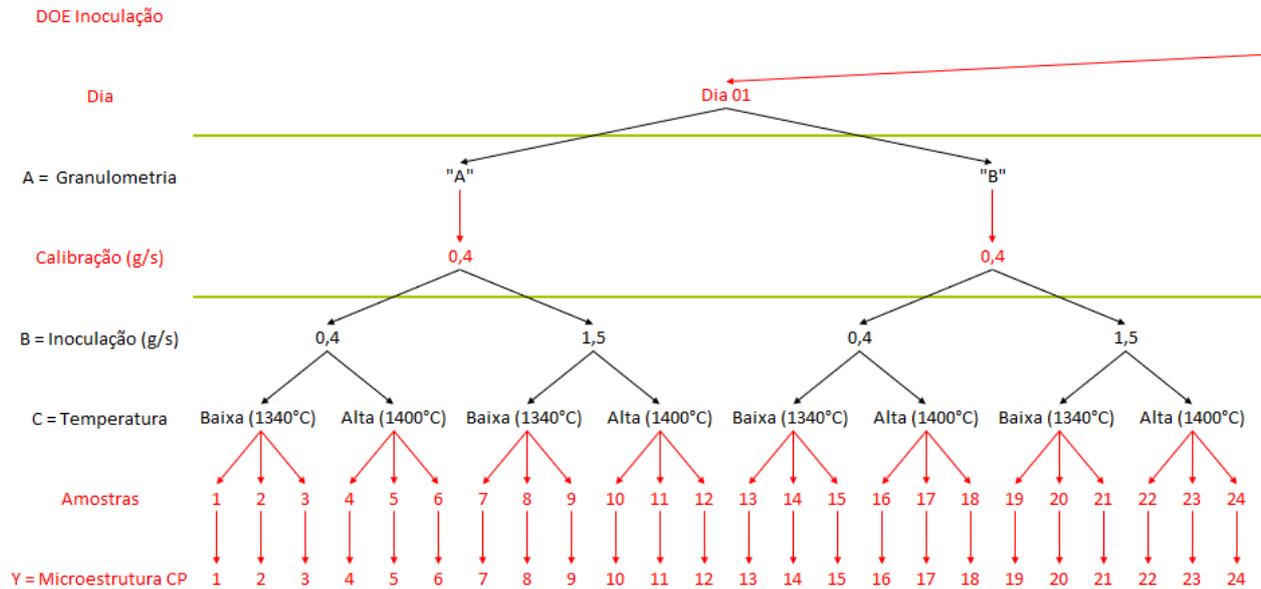
4.1 RESULTADOS DO PRIMEIRO EXPERIMENTO

O primeiro experimento foi realizado para entender a influência da granulometria do inoculante (Fe-Si) na formação do defeito de ferro duro em ferros fundidos cinzentos. Para a realização deste trabalho foram estudadas as teorias, conforme Tabela 4, para alteração das propriedades do material e o aumento da tendência a defeitos.

Primeiramente foi realizada a avaliação dos sistemas de medição do aparelho granulométrico e do inoculador que compõem o forno vazador, para garantir que todas as medidas seriam confiáveis e poder dar prosseguimento ao trabalho. Após esta fase foram realizados experimentos planejados (Figura 37) com base na metodologia Six Sigma, com o objetivo de encontrar a causa raiz para a ocorrência dos defeitos e se há a influência da granulometria na formação dos mesmos.

Os fatores considerados mais significativos pelas teorias estudadas foram a granulometria do inoculante, temperatura de vazamento e percentual de inoculação. Para eliminar influências secundárias, o inoculador foi calibrado a cada tratamento realizado. Foram realizados três dias de experimento, conforme amostragem descrita na Figura 37, assim foi repetida a mesma amostragem citada em três dias diferentes.

Figura 37 – Planejamento experimental do primeiro experimento.



Fonte: O autor (2019).

A Tabela 4 define os principais fatores bem como as teorias e previsões para falha. As variações de cada fator foram controladas em maior e menor nível de previsão para ocorrência e nos seguintes limites de controle:

- Granulometria do inoculante: “A” Fina (Nível (-)) e “B” Grossa (Nível (+))
- Temperatura de vazamento (°C): 1340 (Nível (-)) e 1400 (Nível (+))
- Calibração: 0,4 g/s a cada tratamento realizado
- Inoculação (g/s): 0,4 (Nível (-)) e 1,5 (Nível (+)).

Algumas variáveis foram monitoradas, pois trata-se de ruídos críticos com necessidade de analisar a influência na variável resposta, sendo o principal deles a composição química do metal de base. Os ruídos monitorados foram:

- Temperatura ambiente;
- Composição do metal de base;
- Compacta da areia;
- Tempo de vazamento.

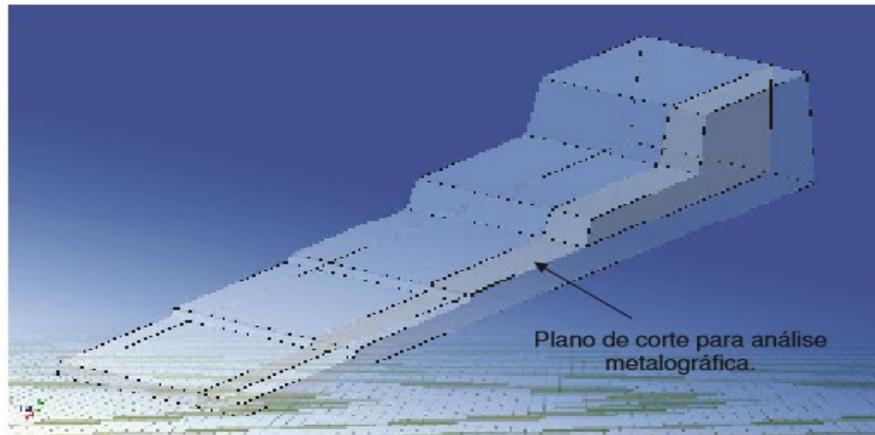
Tabela 4 – Principais fatores para ocorrência dos defeitos.

Fator	Teoria
A – Granulometria do inoculante - Fina Nível (-) e Grossa (Nível (+))	Conforme as teorias estudadas, a fonte de variação granulometria do inoculante tem uma grande influência neste estudo. Esta variável influencia diretamente no percentual de inoculação (POZZI, 2009, NASCIMENTO 2016).
B - Temperatura de vazamento (°C) - 1340 Nível (-) e 1400 Nível (+)	A temperatura é um dos fatores mais críticos para formação destes defeitos, pois a mesma está relacionada diretamente com o desempenho do inoculante (STUEWE, 2008).
C – Calibração 0,4 g/s a cada tratamento realizado	Dependendo de qual calibração for utilizada pode ser inserido mais inoculante no molde, causando um excesso de inoculação e podendo alterar a estrutura, causando o defeito de rechupe (apenas forno vazador possui) (STUEWE, 2008).
D – Inoculação (g/s) 0,4 Nível (-) e 1,5 Nível (+)	Influência principalmente na contração/expansão da peça durante a solidificação, sendo mais influenciado pela forma de adição e a quantidade (LERNER, 1999).

Fonte: O autor (2019).

Conforme citado, todos os experimentos foram realizados em corpos de prova escalonados (Figura 38), sendo analisado cada degrau de acordo com as propriedades requeridas. A numeração foi definida de acordo com a espessura do corpo de prova, sendo o número 1 (mais espesso) e o número 5 (mais fino). Nos degraus de 1 a 4 foram analisadas a quantidade de células eutéticas e a dureza, enquanto no degrau 5 foi analisada a quantidade de ferro duro (coquilhamento) do ferro fundido cinzento em cada tratamento do experimento, sendo um ensaio destrutivo.

Figura 38 – Estratégia de corte do corpo de prova escalonado.



Fonte: Stuewe (2008).

Já a Figura 39 demonstra o corpo de prova em placa, onde foi definido o canal de alimentação em placa e a disposição do escalonado na mesma. Todos os fatores do ferramental são muito importantes para os experimentos, pois, além das variáveis controladas

Figura 39 – Corpo de prova em placa.



Fonte: A autora (2019).

Para a análise correta de cada tratamento, as amostras foram identificadas por tratamento realizado. Conforme a Figura 40, os CP's (corpos de prova) foram jateados e cortados ao meio para evitar que o efeito de borda influenciasse as propriedades analisadas.

Figura 40 – Corpos de prova fundidos.



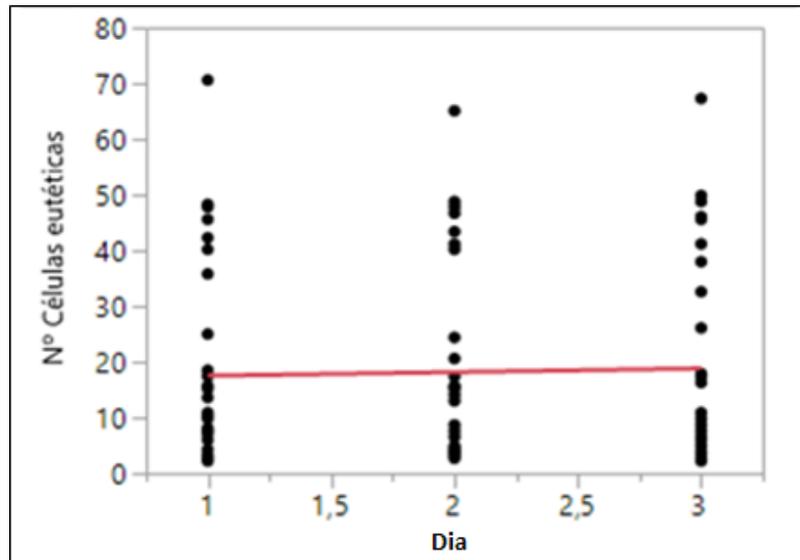
Fonte: O autor (2019).

4.1.1 Células eutéticas

A primeira análise realizada foi a contagem da quantidade de células eutéticas em todos os degraus, exceto no degrau 5, onde foi analisada a quantidade de ferro duro (coquilhamento) do corpo de prova, sendo destruído este CP na realização da análise. A análise nos degraus 1 a 4 teve como objetivo descobrir se a granulometria do inoculante influenciou nas propriedades do ferro fundido cinzento.

O Gráfico 1, N° de células eutéticas vs Dia, apresenta o número de células eutéticas dos experimentos em dias diferentes. Com base nos resultados pode-se observar que o fator dia, que é a realização do mesmo tratamento em três dias diferentes, não teve influência na variável resposta da quantidade de células eutéticas/mm².

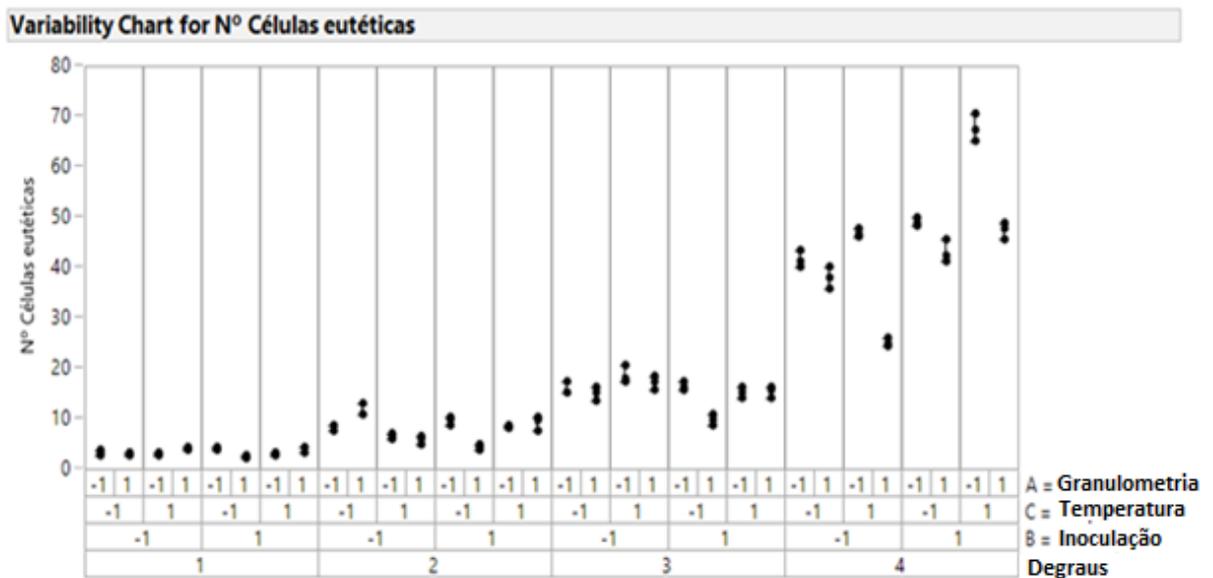
Gráfico 1 – Quantidade de células eutéticas em dias diferentes nas mesmas condições.



Fonte: O autor (2019).

O Gráfico 2 apresenta a quantidade de células eutéticas dependendo de cada degrau e em cada tratamento, podendo ser verificado que o degrau do CP com o menor número de células eutéticas é o quatro (4), e com o aumento do percentual de inoculação há o acréscimo desta variável resposta.

Gráfico 2 – Número de células eutéticas em cada tratamento.



Fonte: O autor (2019).

Os experimentos geraram variação e na melhor condição de tratamento foram obtidas de 20 a 50 células eutéticas, conforme pode ser visto no Gráfico 2. Este resultado pode ser comparado ao de Nascimento (2016), que representou o comportamento decrescente da quantidade de células eutéticas com o aumento da temperatura de vazamento, sendo que quanto maior a granulometria menor a dissolução e a quantidade de células eutéticas disponíveis no banho.

Segundo Souza (1977), com temperaturas de 1300-1500 °C a quantidade de células eutéticas varia de 6-40 células eutéticas/mm² dependendo da espessura da peça e da distância da análise, sendo quanto mais próxima à superfície menor a quantidade de células eutéticas disponíveis. Este é o principal motivo de peças finas serem vazadas em temperaturas mais altas, evitando a ocorrência de ferro duro e de grafitas muito refinadas, como as encontradas nas gráficas dos tipos “B” e “D”. Com base no Gráfico 2 foi possível verificar que nos degraus 1, 2 e 3 o número de células eutéticas/mm² foi baixo, assim foi escolhido analisar estatisticamente os degraus 3 e 4, onde havia a maior diferença de quantidade de células eutéticas, para desta forma entender qual fator foi mais significativo. No DOE para resposta de células eutéticas foram considerados apenas os degraus 3 e 4, os quais apresentaram variação mais significativa. Isto ocorreu devido a espessura dos degraus, já que os degraus 1 e 2 são mais grossos e menos sujeitos a esta variação. Na análise gráfica são identificados os fatores ou interações mais significativas, por isto foram utilizados três gráficos em conjunto. O gráfico “Pareto plot”, Gráfico A2 do apêndice, apresenta em ordem quais são os graus de liberdade com maior efeito na variável resposta, sendo que todos possuem um número na coluna "estimates" (Estimates = efeito do GL/2). Nessa análise sabem-se quais os graus de liberdade com maior efeito sobre Y, mas não quer dizer que eles são realmente significativos. O “normal plot” indica quais são os graus de liberdade que realmente influenciam na variável resposta, conforme Gráfico A3 do apêndice.

Com a análise estatística de cada degrau, pode-se concluir que todos os fatores são extremamente significativos na quantidade de células eutéticas/mm², sendo assim necessário o estudo de mais variáveis que possam ser significativas ou críticas para a alteração da variável resposta de número de células eutéticas.

Como conclusão no 3° e 4° degrau, foram considerados críticos quase todos os fatores, sendo os principais: Inoculação, Temperatura e granulometria. Além destes, também as interações granulometria *versus* Inoculação e granulometria *versus* Temperatura.

Inoculação: Conforme análise, quando é modificada a inoculação de 0,4 para 1,5%, há o aumento no número de células eutéticas, pois aumenta o número de núcleos no banho e o grau

de nucleação do mesmo, confirmando assim a teoria que quanto maior a inoculação maior o número de núcleos, conforme Stuwe (2008).

Temperatura: Quando se modifica de uma temperatura baixa para uma temperatura alta, foi confirmada através dos testes a diminuição do número de células eutéticas, a qual foi verificada na teoria da inoculação, conforme Santos (1977).

Granulometria: Confirmando a teoria de Nascimento (2016), quando passamos da granulometria -1 (mais fino) para o +1 (mais grosso), há uma diminuição no número de células eutéticas, sendo melhor absorvido no banho líquido, pois, são de difícil dissolução, podendo causar inclusões na peça.

Granulometria versus Inoculação: Conforme análise de interação, no nível -1, tem-se uma interação de robustez. Porém, quando se passa para o nível +1 há uma interação forte com o segundo fator que é a inoculação, dependendo muito deste para os resultados.

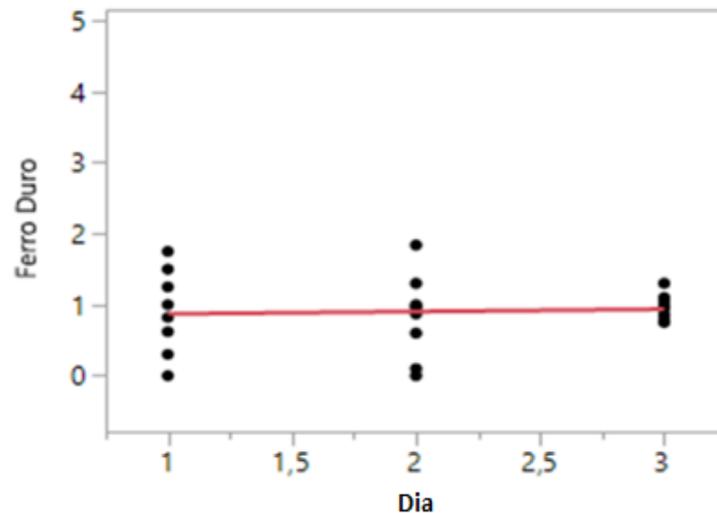
Granulometria versus Temperatura: Conforme análise de interação, no nível -1 temos uma interação de robustez, porém quando passamos para o nível +1 há uma interação forte com o segundo fator, que é a temperatura. Isto porque a interação destes dois fatores impacta diretamente no crescimento da célula eutética, pois, em temperaturas mais baixas temos uma tendência maior de crescimento das células, assim diminuindo a quantidade de núcleos disponíveis, de acordo com as teorias de Nascimento (2016).

4.1.2 Ferro duro

A altura de coquilhamento, chamada neste experimento de ferro duro, confirma que todas as teorias citadas na seção 2.10 foram confirmadas pela resposta no degrau 5, podendo ser verificado no Gráfico 3 que o fator dia não teve influência na variável resposta da quantidade ferro duro (coquilhamento).

Conforme Guessser (2009), com o aumento do percentual de inoculação houve uma queda de 16 para 2 mm de altura de coquilhamento (ferro duro) com aumentos gradativos da quantidade de inoculante, sendo o percentual variado de 0 a 0,5% de inoculante adicionado. Com base nisto foi possível verificar que o tamanho das células eutéticas diminuíram com o aumento da inoculação, pois, quanto mais células eutéticas menor o tamanho das mesmas, confirmando também o que foi citado na seção 4.1.1 do presente trabalho.

Gráfico 3 – Quantidade de ferro duro em dias diferentes nas mesmas condições.



Fonte: O autor (2019).

No caso do DOE para resposta de ferro duro foi considerado apenas o degrau 5, pois é o com maior tendência ao defeito devido a espessura do mesmo (mais fina), sendo possível verificar a variação entre as amostras dependendo do tratamento realizado.

Com base na análise do degrau 5, o fator que mais influenciou foi a granulometria, seguido do fator Inoculação, como já era esperado pelo resultado em células eutéticas e pela teoria de Nascimento (2016), o qual demonstra a influência da Granulometria e o Percentual de inoculação com o aumento da altura de coquilhamento.

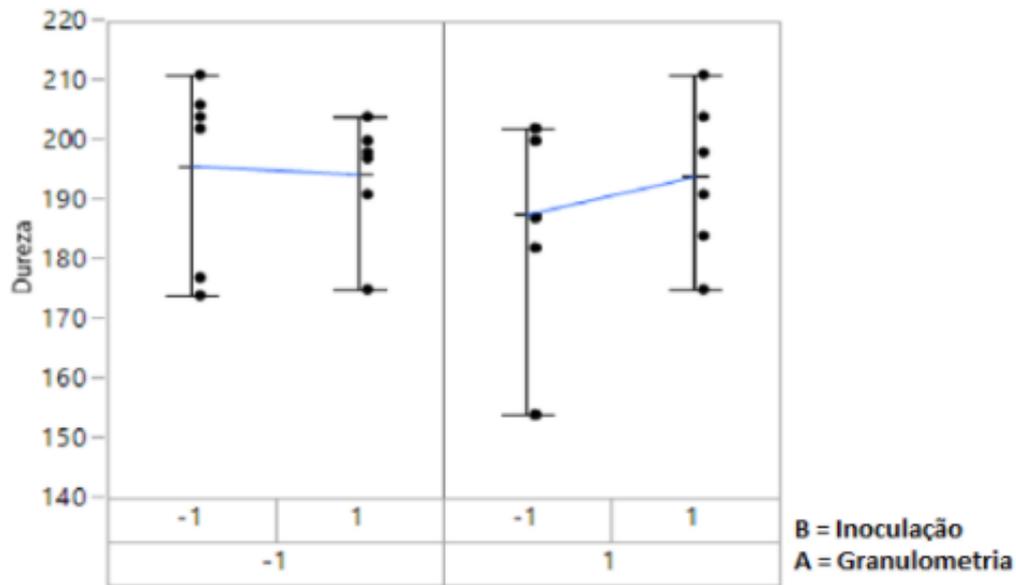
Granulometria: Confirmando a teoria de Nascimento (2016), quanto maior a granulometria menor é a solubilidade do inoculante, desta forma quando passamos de uma granulometria -1 (mais fino) para o +1 (mais grosso), temos o aumento na variável resposta, pois, há uma inoculação menor quando dosamos com inoculante da +1.

Inoculação: Como esperado, quando maior a inoculação menor a tendência ao ferro duro, confirmando a teoria e a quantidade de células eutéticas (GUESSER, 2004).

Inoculação versus Granulometria, pode-se observar que o fator que mais influência é a granulometria do inoculante, tendo uma interação fraca com inoculação, conforme pode ser visto no Gráfico 4.

No apêndice, o Gráfico 4 demonstra que para resposta do ferro duro (coquilhamento), o fator granulometria é o mais significativo para ocorrência do defeito, sendo desta forma a principal causa raiz para ocorrência do defeito.

Gráfico 4 – Interação entre os fatores “Granulometria” e “inoculação”.



Fonte: O autor (2019).

A conclusão para a resposta ferro duro (altura de coquilhamento) é que os fatores que mais influenciam na variável resposta são a granulometria e o percentual de inoculação, fato que já era esperado segundo Nascimento (2016). Isto porque quanto maior a inoculação e menor a granulometria, maior a dissolução do inoculante e maior o grau de nucleação, diminuindo assim a tendência ao ferro duro (NASCIMENTO, 2016; STUEWE, 2008).

4.1.3 Dureza Brinell

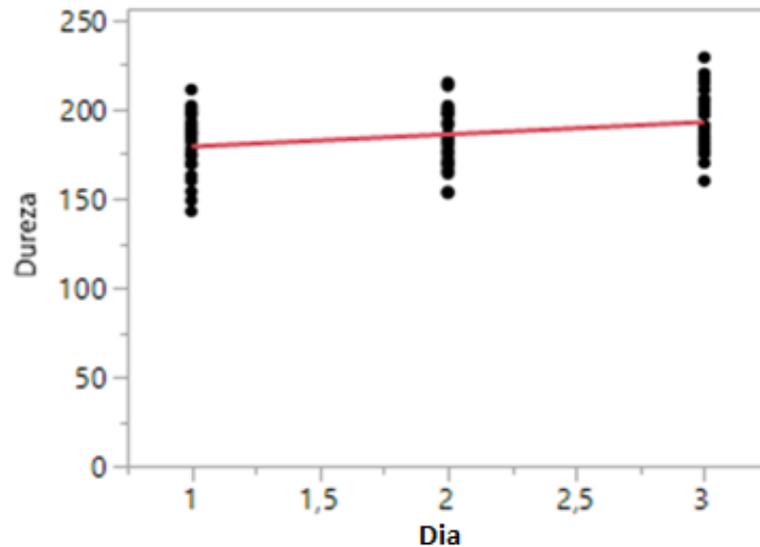
No caso do DOE para resposta de Dureza foram considerados apenas os degraus 3 e 4, os quais apresentaram variações mais significativas, conforme já exposto na seção 3.1.1. Isto se deve a espessura dos degraus, já que os degraus 1 e 2 são mais grossos e não apresentam grande variação quando comparados ao degrau 3, gerando praticamente os mesmos resultados.

Na análise gráfica são identificados os fatores ou interações mais significativas, por isto foram utilizados três gráficos em conjunto: Pareto Plot, sorted Estimates e Normal Plot.

O gráfico Pareto plot, Gráfico A13 do apêndice, apresenta em ordem quais são os graus de liberdade com maior efeito na variável resposta, sendo o principal fator a interação entre granulometria e inoculação. Nessa análise sabem-se quais os graus de liberdade com maior efeito sobre Y, mas não quer dizer que eles são realmente significativos. Para isto existe o normal plot, Gráfico A15 do apêndice, que indica o mesmo resultado e confirma a teoria de

Nascimento (2016). O Gráfico 5 representa o bloco dia, ou seja, o experimento realizado em três dias diferentes que não gerou variação significativa, podendo ser avaliadas as medidas em conjunto. Assim a conclusão está apresentada no Gráfico 6, onde a maior parte das peças atende a especificação de dureza, conforme Guessser (2004).

Gráfico 5 – Medida de dureza em dias diferentes nas mesmas condições.

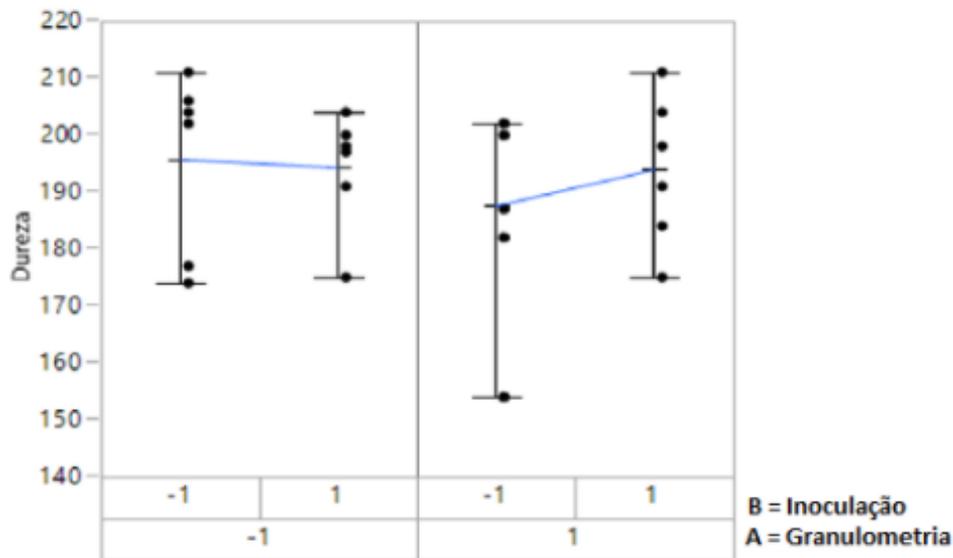


Fonte: O autor (2019).

Para os degraus 3 e 4, temos mais significativo a interação de granulometria *versus* Inoculação, Gráficos A13 e A14 do apêndice, o qual apresenta através da análise estatística que estes são os principais fatores para variação da propriedade de dureza. Seguindo a teoria de Stuwe (2008) e Nascimento (2016) e a análise da quantidade de células eutéticas, já se esperava estes dois fatores como mais significativos para a resposta de dureza.

No Gráfico 6 está apresentada a interação de granulometria e inoculação, onde pode-se ver que o fator que mais influencia é a granulometria, sendo mais significativo que a inoculação, mesma conclusão no degrau 4, Gráfico 7.

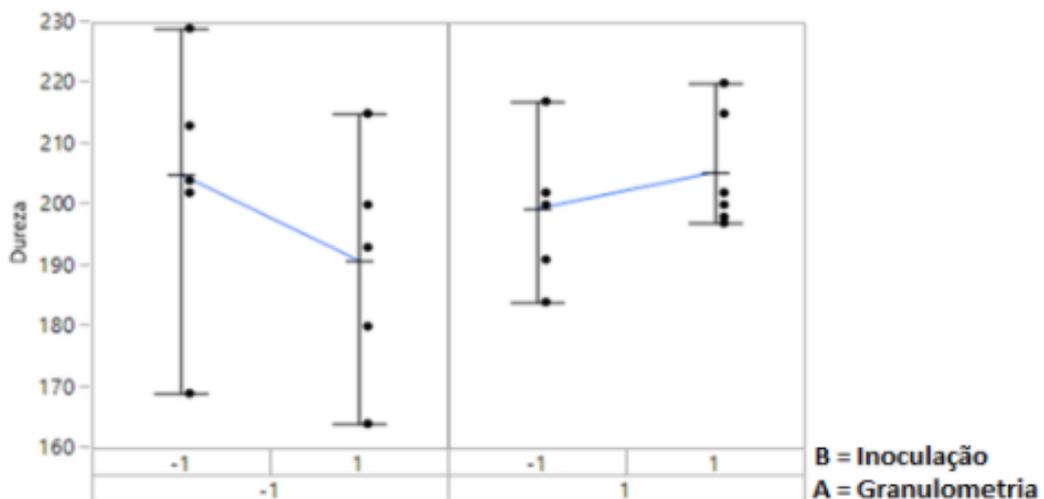
Gráfico 6 – Interação entre os fatores “granulometria” e “inoculação” com a medida de Dureza – 3° Degrau.



Fonte: O autor (2019).

Como conclusão para resposta dureza, foi verificado que o fator mais significativo para a Dureza é o Granulometria do inoculante, isto porque quanto menor a inoculação e mais fina a granulometria do inoculante maior a tendência ao aumento da dureza. Este resultado pode ser comparado ao de Grassmueck (2009), o qual representa que quanto maior o percentual de inoculante menor a medida de dureza e sobreposição de valores, indicando a homogeneização da matriz de ferro fundido cinzento.

Gráfico 7– Interação entre os fatores “granulometria” e “inoculação” com a medida de Dureza – 4° Degrau.



Fonte: O autor (2019).

4.1.4 Conclusão 1º Experimento

Com base nos resultados do DOE realizado, pode-se concluir que o principal fator que afeta as três respostas (quantidade de células eutéticas, ferro duro e dureza) é a granulometria do inoculante utilizado (Granulometria), pois, como se trata de forno vazador, quanto maior a granulometria pior a dissolução da mesma, prejudicando a atuação do mesmo no banho (NASCIMENTO, 2016). Além deste fator, outro ponto que foi extremamente significativo foram as interações entre fatores, podendo inclusive ser um maior causador de defeitos, como a interação entre granulometria e quantidade de inoculante adicionada.

Para resposta da quantidade de células eutéticas, os fatores mais significativos foram: granulometria, percentual de inoculação, temperatura de vazamento e a interação entre granulometria e o percentual de inoculação.

Para resposta de ferro duro o principal fator foi a granulometria do inoculante, pois a camada coquilhada depende essencialmente da incorporação do inoculante e da quantidade deste composto no banho metálico (NASCIMENTO, 2016).

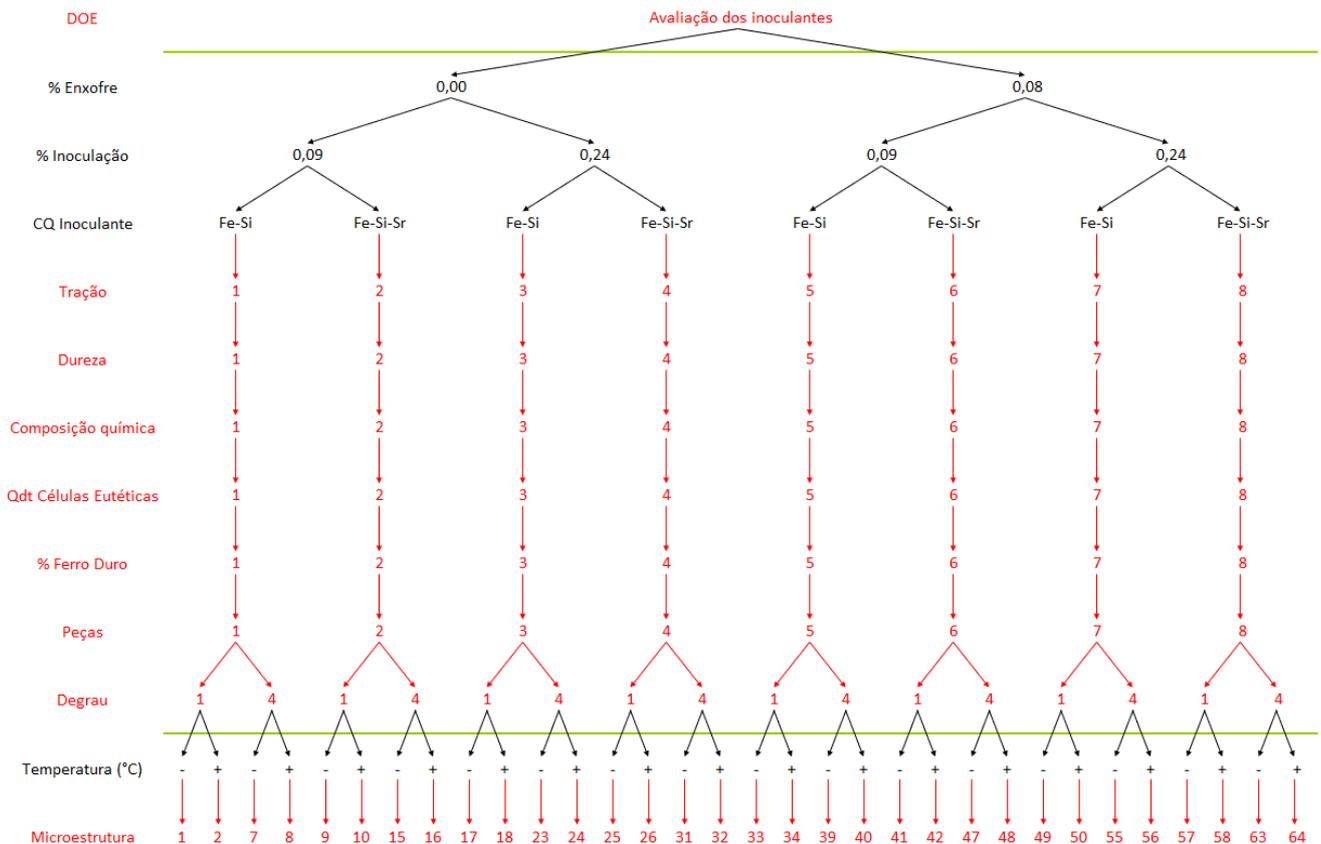
Para resposta de dureza a interação entre granulometria e percentual de inoculação foi o fator mais significativo, tendo o mesmo comportamento que a resposta para o ferro duro, confirmando a teoria de que quanto maior a inoculação menor dureza das amostras (GRASSMUECK, 2009).

4.2 RESULTADOS SEGUNDO EXPERIMENTO

O segundo experimento consistiu em entender a influência da composição química do inoculante dependendo dos elementos de química adicionados ao mesmo, conforme teorias estudadas de Guesser (2004) e Nascimento (2016). Com base no primeiro experimento apresentado na seção 4.1, foram utilizados no segundo experimento o percentual de inóculo adicionado ao banho, a adição do enxofre e a temperatura de vazamento.

A Figura 41 apresenta o plano de amostragem do segundo experimento, onde foram fabricados oito corpos de prova escalonados, variando da adição de enxofre (0,00% e 0,08%), percentual de inoculação (0,09 e 0,24%) e tipo de inoculante (Fe-Si e Fe-Si-Sr) e temperatura (1380 e 1440 °C) para avaliação da microestrutura.

Figura 41 – Plano de amostragem segundo experimento.



Fonte: O autor (2019).

Na Tabela 5 pode-se verificar as teorias e previsões para cada fator estudado neste experimento, onde foram inseridos fatores com maior ou menor tendência ao aumento das propriedades mecânicas.

Tabela 5 – Tabela com as teorias e previsões sobre os experimentos realizados.

Fator	Nível (-)	Nível (+)	Teoria
A - Composição química do inoculante	Fe-Si	Fe-Si-Sr	O inoculante que possui estrôncio na composição é em teoria muito mais eficaz do que o utilizado atualmente, que é de Fe-Si (NASCIMENTO, 2016).
B - Temperatura de Vazamento (°C)	Baixa (1380 – 1400 °C)	Alta (1420-1440 °C)	A temperatura é um dos fatores mais críticos para formação destes defeitos, pois a mesma está relacionada diretamente com o desempenho do inoculante (STUEWE, 2008).
C - Adição de enxofre	Sem	Com	A adição de enxofre se faz necessária quando há a utilização de inoculante a base de estrôncio, pois apenas quando combinados há o efeito de grafitação (NASCIMENTO, 2016).
D – Inoculação (g)	270 (0,09%)	720 (0,24%)	Influência principalmente na contração/expansão da peça durante a solidificação, sendo mais influenciado pela forma de adição e a quantidade (LERNER, 1999).

Fonte: O autor (2019).

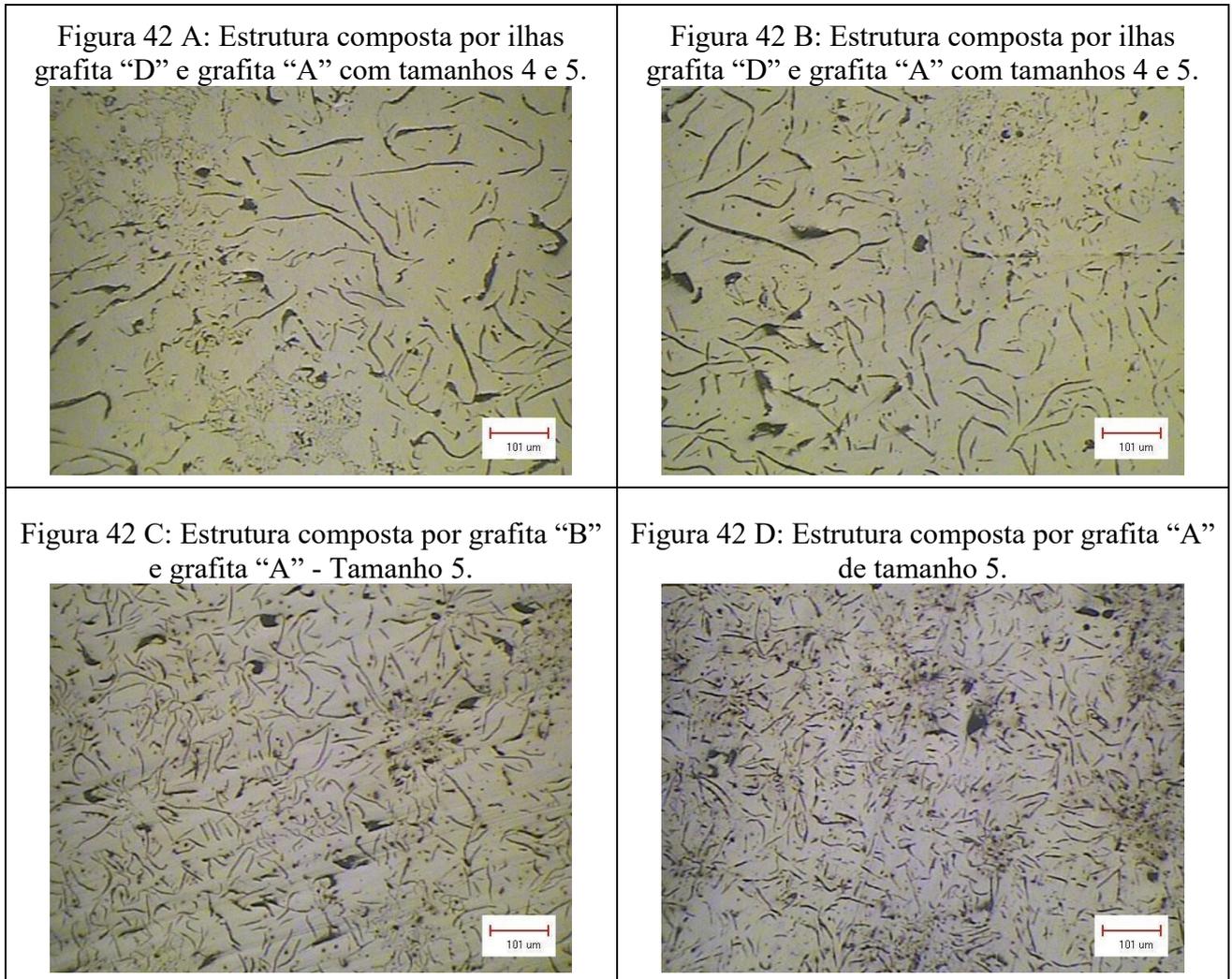
4.2.1 Ensaio microestrutural

A primeira análise realizada foi a microestrutural, onde, dependendo da intensidade de cada fator, há a alteração da microestrutura, elevando ou diminuindo as propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido cinzento, variando também a microestrutura em cada degrau do corpo de prova escalonado. O principal objetivo foi verificar qual dos tratamentos trouxe predominantemente a grafita do tipo “A”, que é a requerida para a aplicação da presente dissertação. A faixa de enxofre utilizada se deu de acordo com a teoria dos óxidos e sulfetos (RIPOSAN, 2005), já que o inoculante com adição de estrôncio precisa de um banho rico em sulfetos com o objetivo de se unirem e, desta forma, ter um melhor desempenho e melhoria das propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido cinzento. Isto ocorre porque os sulfetos que estão e são adicionados no metal fundido atuam como centros efetivos para nucleação.

Desta forma, é verificado que quanto maior a eficiência do inoculante mais estável é o sulfeto formado pelo elemento presente neste inoculante. Assim, inoculantes utilizando estrôncio e cério são mais eficientes, pois formam os sulfetos mais estáveis (RIPOSAN, 2005). Porém, para teores acima de 0,15% há uma maior tendência a formação de carbonetos, pois altas concentrações de enxofre promovem a diminuição da velocidade de crescimento das células eutéticas e propiciam o crescimento do super resfriamento, aumentando a tendência ao coquilhamento (NASCIMENTO, 2016).

As figuras foram organizadas de acordo com os degraus, então todas as identificadas como “A” são do 1º degrau, “B” do 2º degrau, “C” do 3º degrau e “D” do 4º degrau. Todas as amostras foram analisadas utilizando 50 vezes de aumento e, após a análise das mesmas, pode-se verificar a alteração de estruturas, bem como o tamanho e tipo das grafitas dependendo da espessura do degrau analisado. Na Figura 42 foi realizado o tratamento sem a adição de enxofre, com a utilização de inoculantes de Fe-Si, 0,09% de inoculação e a uma temperatura de 1380 °C. Neste tratamento os tipos de grafitas predominantes foram “A” e “D”, devido a baixa inoculação aliada a um inoculante menos reativo que é o de Fe-Si.

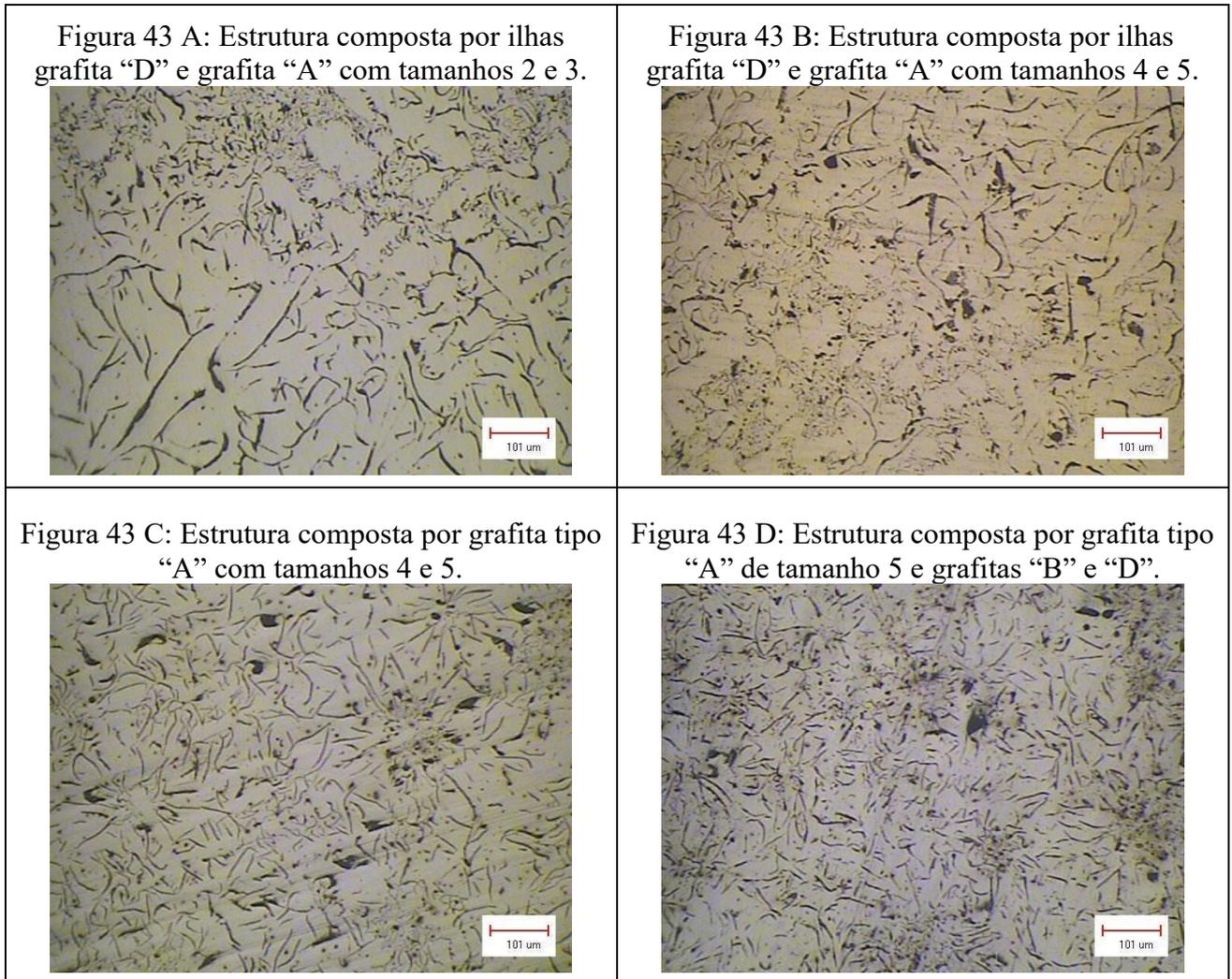
Figura 42 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 43 foi realizado um tratamento sem a adição de enxofre, com a utilização de inoculante de Fe-Si, 0,09% de inoculação sendo o nível mais baixo de inoculação utilizada e a uma temperatura mais alta de 1440 °C. Após a análise das amostras pode-se verificar a alteração de estruturas, bem como o tamanho e tipo das grafitas dependendo do degrau analisado e que o único degrau analisado com as propriedades requeridas para o FC200 é o degrau 3, onde a estrutura possui grafita tipo “A” dispersa em toda a estrutura.

Figura 43 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 44 foi realizado um tratamento sem a adição de enxofre, com a utilização de inoculantes de Fe-Si-Sr, 0,09% de inoculação sendo o nível mais baixo de inoculação utilizada e a uma temperatura mais baixa 1380 °C. Com a análise realizada em cada degrau, pode-se verificar que sem a adição de enxofre não há um ganho significativo de propriedades, porém a maior parte das estruturas foi a Grafita do tipo “A”, apenas com a utilização do inoculante de Fe-Si-Sr. Além disso, o degrau 3 também possui propriedades que podem ser consideradas importantes, pois possuem grafitas do tipo “A” e “B”, onde as mesmas estão dispersas por toda espessura.

Figura 44 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.

Figura 44 A: Estrutura composta por Grafita tipo "A" com tamanhos 4 e 5.

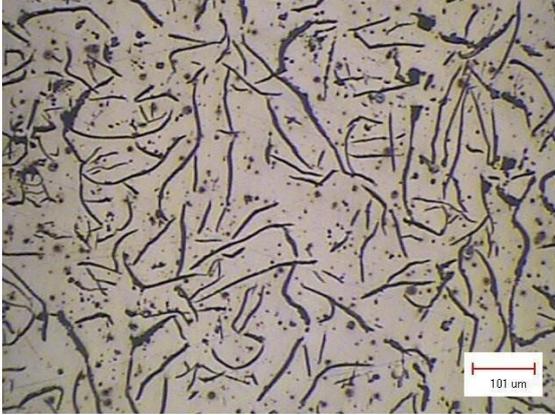


Figura 44 B: Estrutura composta por ilhas grafita "D" e grafita "A" com tamanhos 4 e 5.

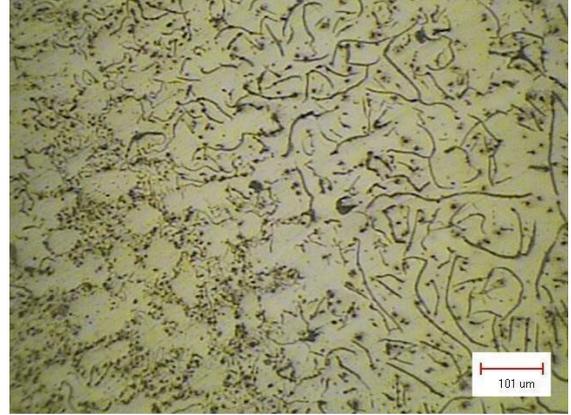


Figura 44 C: Estrutura composta por grafita "A" e "B" com tamanhos 4 e 5.

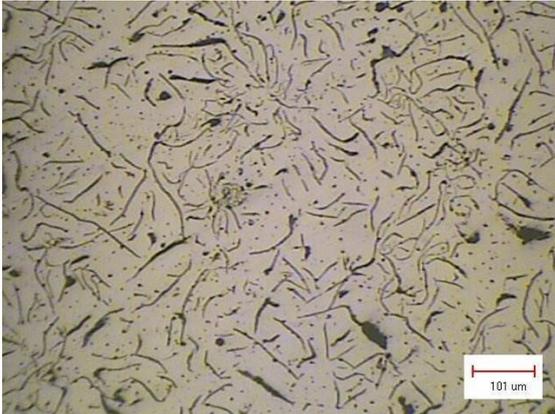
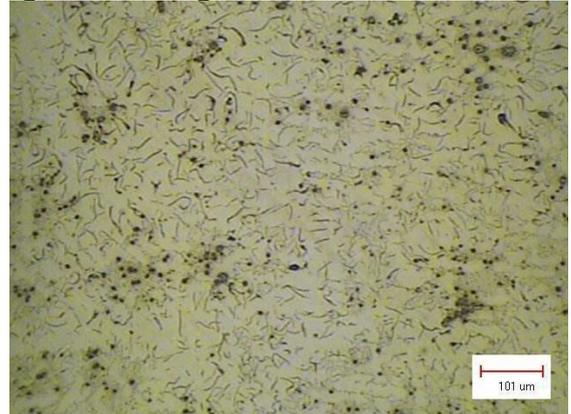


Figura 44 D: Estrutura composta por ilhas grafita "D" e grafita "A" com tamanho 5.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 45 foi realizado o tratamento sem a adição de enxofre, com a utilização de inoculantes de Fe-Si-Sr, 0,09% de inoculação sendo o nível mais baixo de inoculação utilizada e a uma temperatura mais alta de 1440 °C. Assim como na Figura 43, a análise realizada em cada degrau apresentadas na Figura 44, demonstra que sem a adição de enxofre não há um ganho significativo de propriedades com a adição de enxofre. Desta forma, apenas um degrau teve as propriedades requeridas (Grafita tipo "A"), sendo este o degrau 01 do corpo de prova escalonado.

Figura 45 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.

Figura 45 A: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanhos 4 e 5.

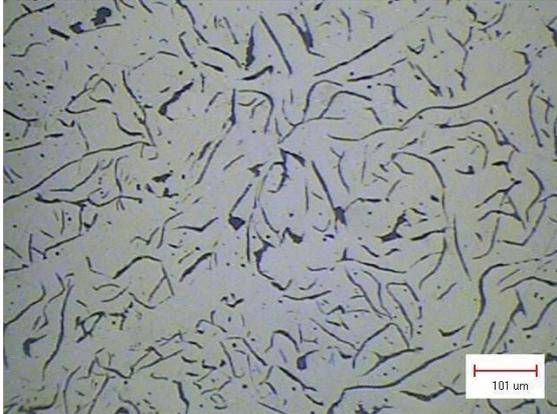


Figura 45 B: Estrutura composta por ilhas grafita “D” e grafita “A” com tamanhos 4 e 5.



Figura 45 C: Estrutura composta por ilhas grafita “D” e grafita “A” com tamanho 5.

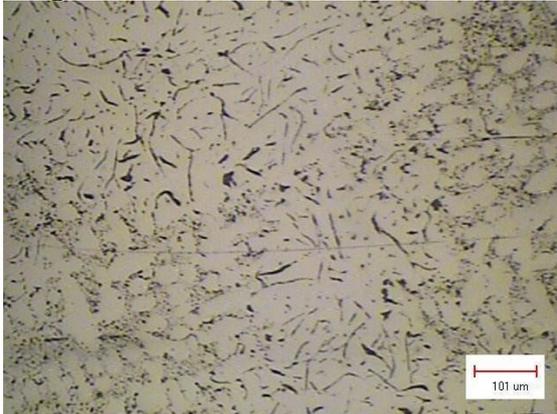
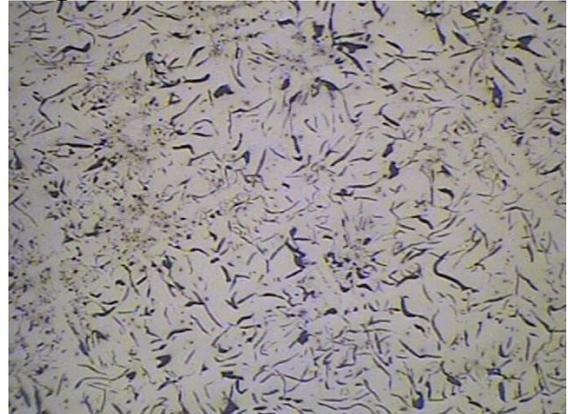


Figura 45 D: Estrutura composta por ilhas grafita “D” e grafita “B” com tamanho 5.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 46 foi realizado um tratamento sem a adição de enxofre, com a utilização de inoculantes de Fe-Si, 0,24% de inoculação sendo o nível mais alto de inoculação utilizada e a uma temperatura mais baixa de 1380 °C. Com base nisto, pode-se verificar que, exceto o degrau 2, os demais degraus apresentaram a dispersão da grafita do tipo “A”.

Figura 46 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.

Figura 46 A: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanhos 3, 4 e 5.

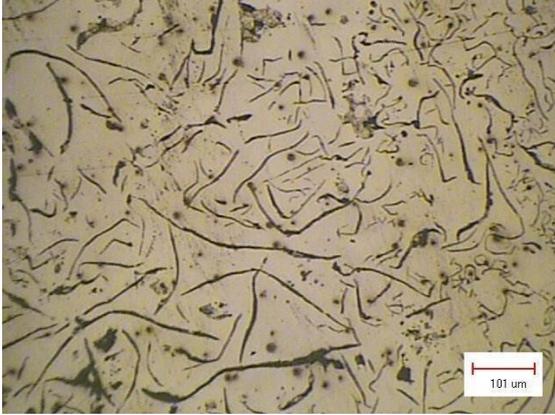


Figura 46 B: Estrutura composta por ilhas grafita “D” e grafita “A” com tamanhos 3 e 4.

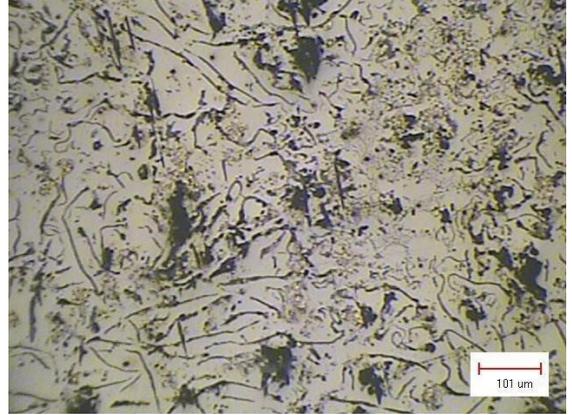
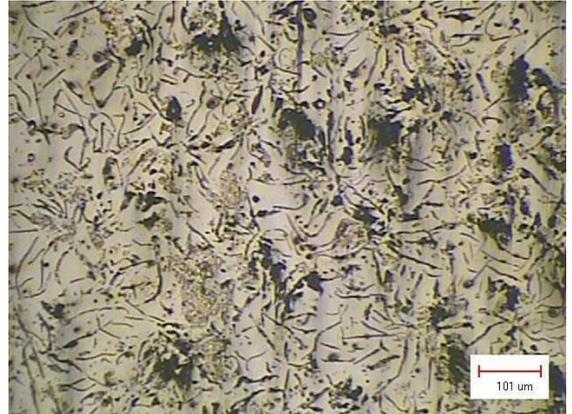


Figura 46 C: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 3 e 4.



Figura 46 D: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 4 e 5.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 47 foi realizado um tratamento sem a adição de enxofre, com a utilização de inoculantes de Fe-Si, 0,24% de inoculação sendo o nível mais alto de inoculação utilizada e a uma temperatura mais alta de 1440 °C. Neste pode-se verificar que nos quatro degraus há a dispersão da grafita do tipo “A”, porém para isto ocorrer foi necessário ter que praticamente triplicar a quantidade de inoculante adicionada ao banho.

Figura 47 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.

Figura 47 A: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanhos 4 e 5.

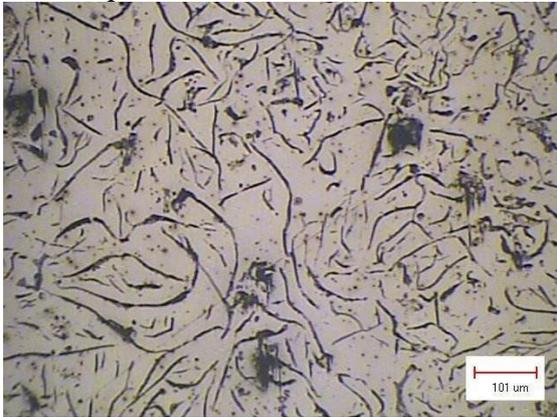


Figura 47 B: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanhos 4 e 5.

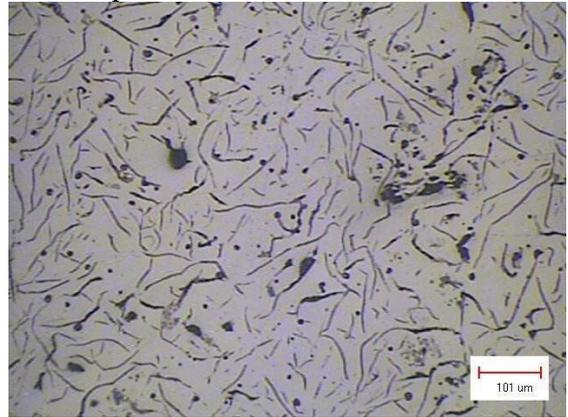


Figura 47 C: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanhos 4 e 5.

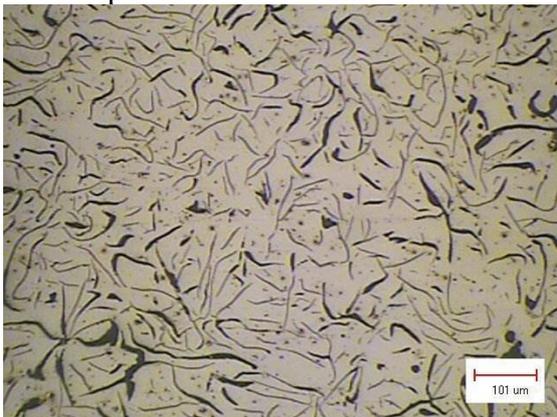
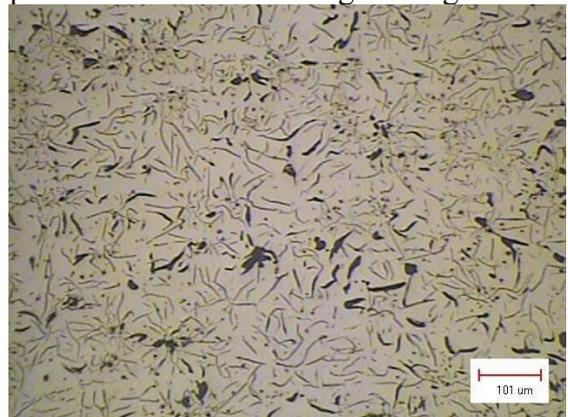


Figura 47 D: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 5 e grafitas grosseiras.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 48 foi realizado um tratamento sem a adição de enxofre, com a utilização de inoculantes de Fe-Si-Sr, 0,24% de inoculação sendo o nível mais alto de inoculação utilizada e com a temperatura mais baixa de 1380 °C. Neste pode-se verificar que em três dos quatro degraus há a presença de grafita do tipo D e apenas no degrau quatro há a presença de grafita do tipo “A”, mas composta em parte por grafita do tipo “A”.

Figura 48 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.

Figura 48 A: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 3 e 4.

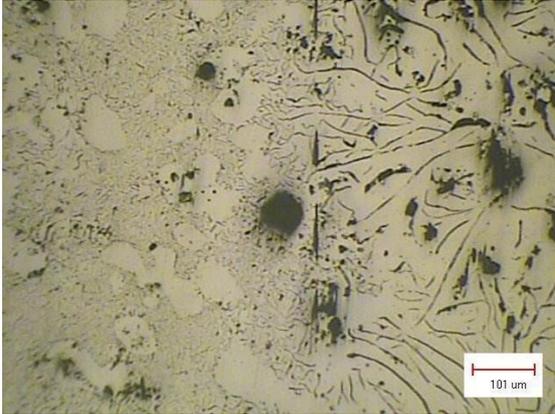


Figura 48 B: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 4 e 5.

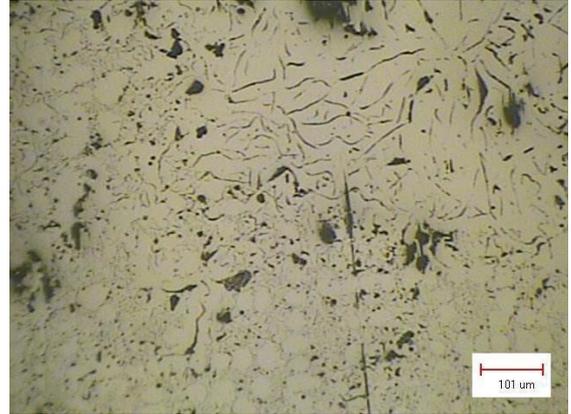


Figura 48 C: Estrutura composta por grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 4 e 5.

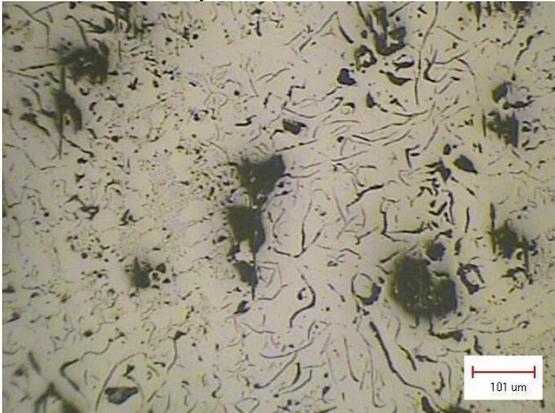
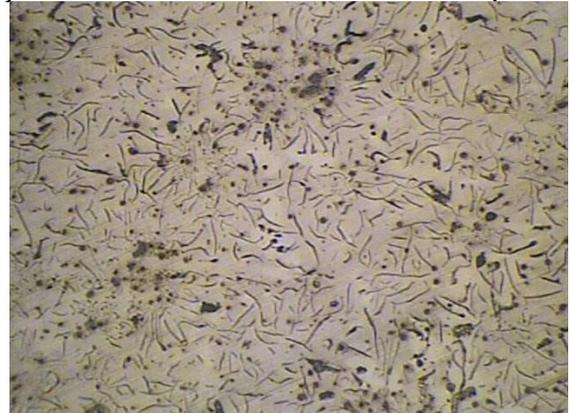


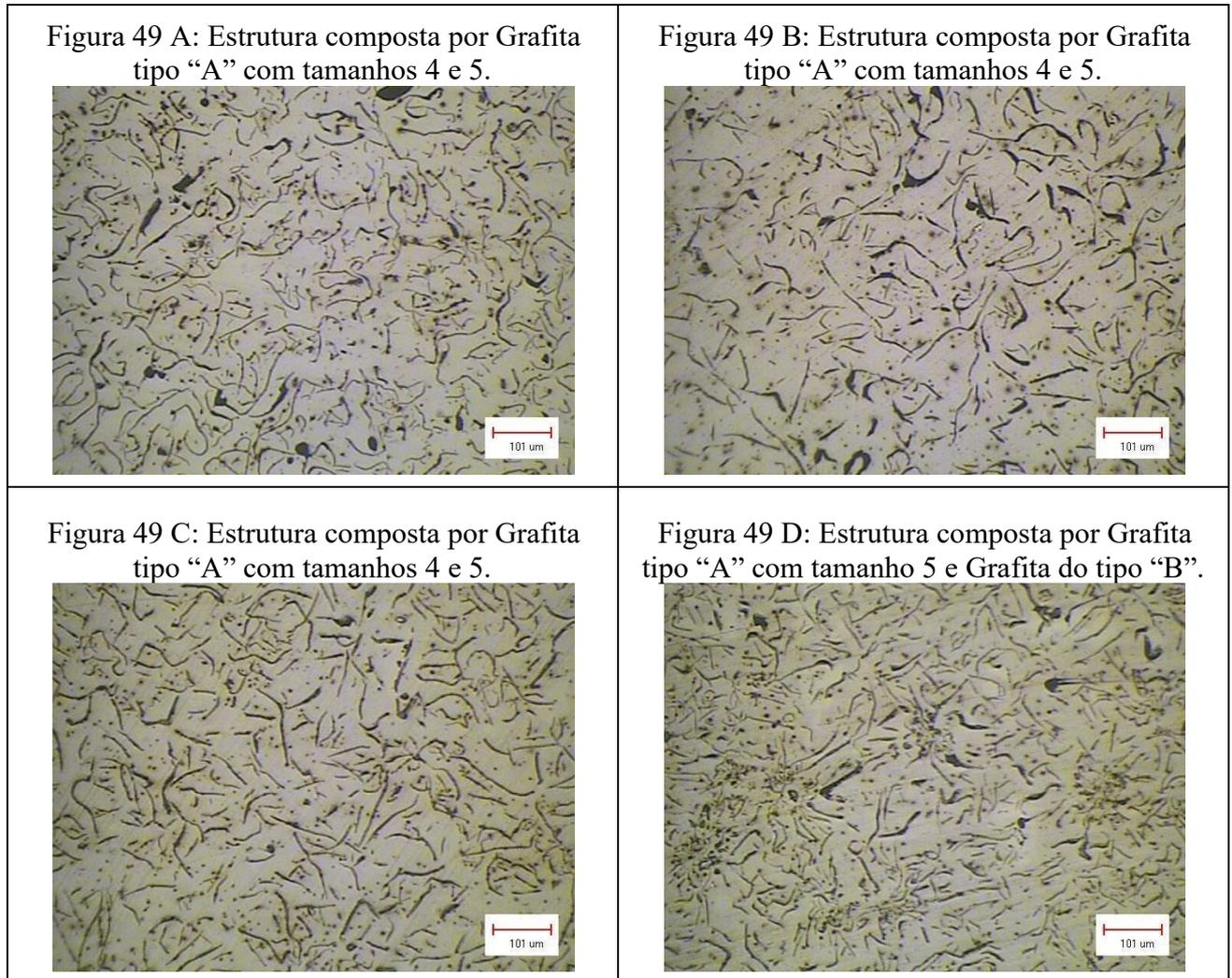
Figura 48 D: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 5 e Grafita do tipo “B”.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 49 foi realizado um tratamento sem a adição de enxofre, com a utilização de inoculantes de Fe-Si-Sr, 0,24% de inoculação sendo o nível mais alto de inoculação utilizada e a uma temperatura mais alta de 1440 °C. Pode-se verificar que em três dos quatro degraus há a presença de grafita do tipo “A” e apenas no degrau quatro há a presença de grafita do tipo “A”, mas composta em parte por grafita do tipo “B”.

Figura 49 – Tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 50 foi realizado um tratamento com a adição de enxofre, a utilização de inoculantes de Fe-Si, 0,09% de inoculação, sendo o nível mais baixo de inoculação utilizada, e a uma temperatura mais baixa 1380 °C. Neste pode-se verificar que em três dos quatro degraus há a presença de grafita do tipo “D” e apenas no degrau quatro há a presença de grafita do tipo “A”, porém muito fina, fato que não permite propriedades mecânicas tão elevadas.

Figura 50 – Tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.

Figura 50 A: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 3 e 4.

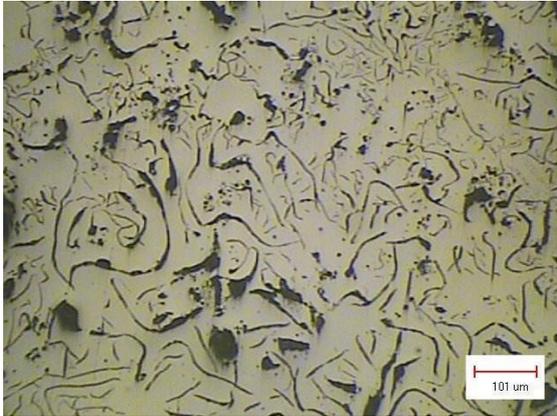


Figura 50 B: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 4 e 5.

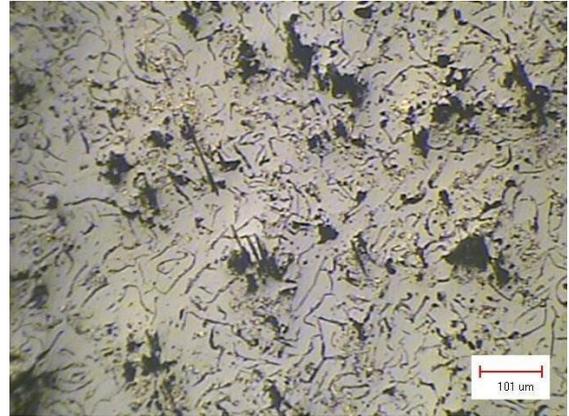


Figura 50 C: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 4 e 5.

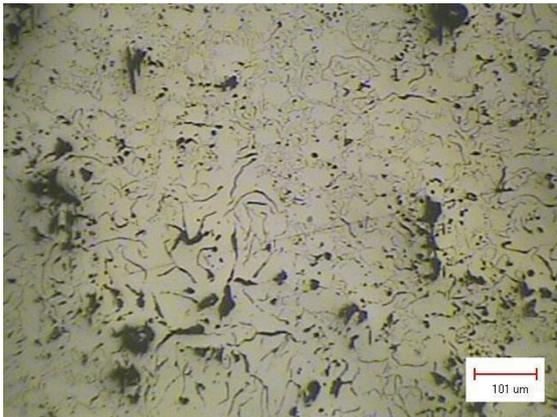
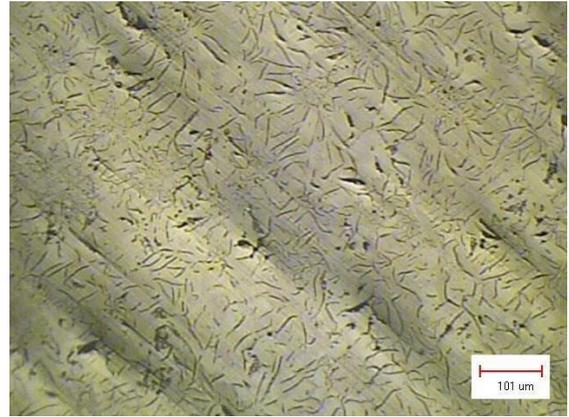


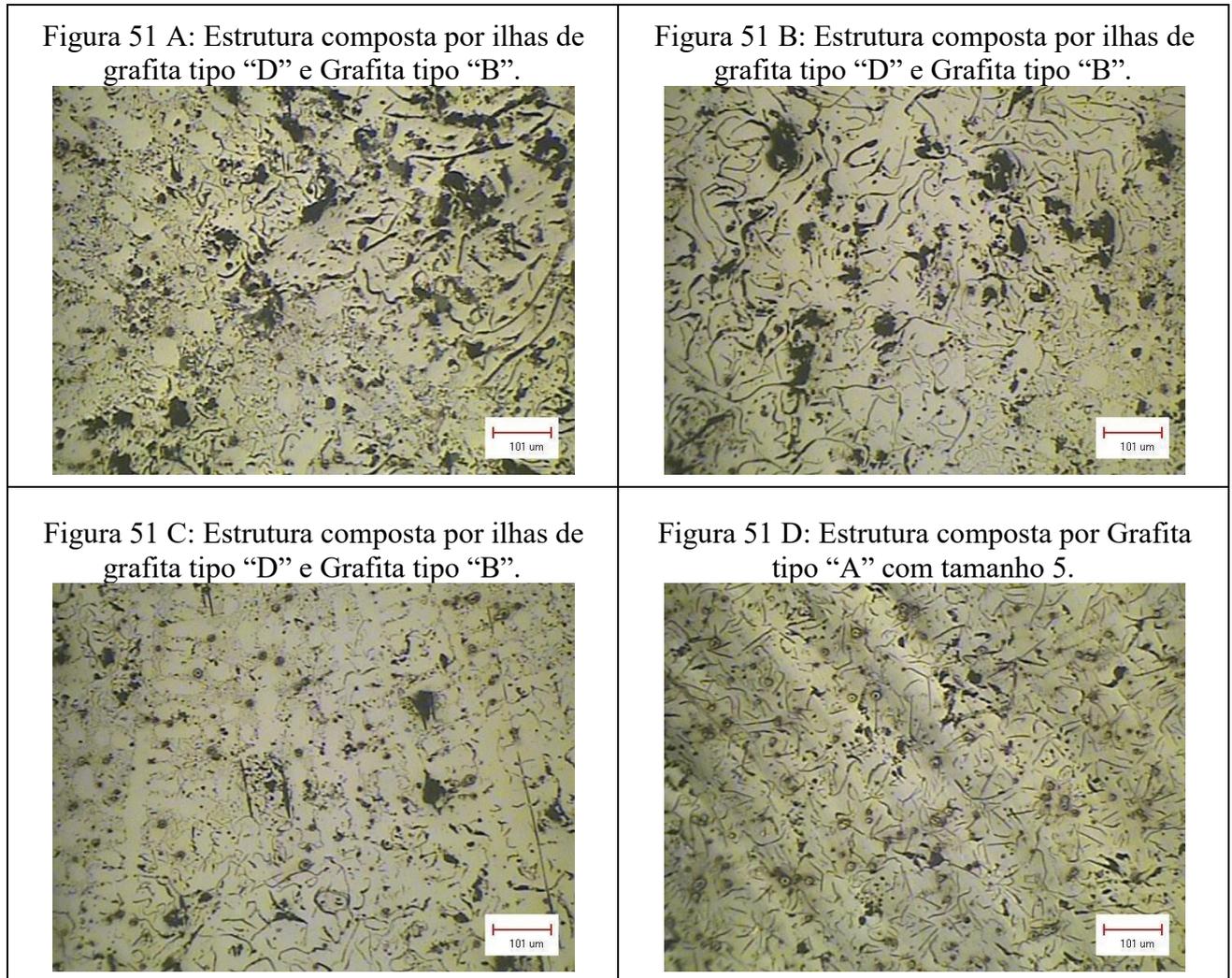
Figura 50 D: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 5 e 6.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 51 foi realizado um tratamento com a adição de enxofre, a utilização de inoculantes de Fe-Si, 0,09% de inoculação sendo o nível mais baixo de inoculação utilizada e a uma temperatura mais alta de 1440 °C. Neste, pode-se verificar que em três dos quatro degraus há a presença de grafita do tipo “D” e apenas no degrau quatro há a presença de grafita do tipo “A” de maior tamanho.

Figura 51 – Tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 52 foi realizado um tratamento com a adição de enxofre, a utilização de inoculantes de Fe-Si-Sr, 0,09% de inoculação sendo o nível mais baixo de inoculação utilizada e a uma temperatura mais baixa de 1380 °C. Neste tratamento foram obtidas amostras dos tipos “A”, “B” e “D”.

Figura 52 – Tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.

Figura 52 A: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 2 e 3.

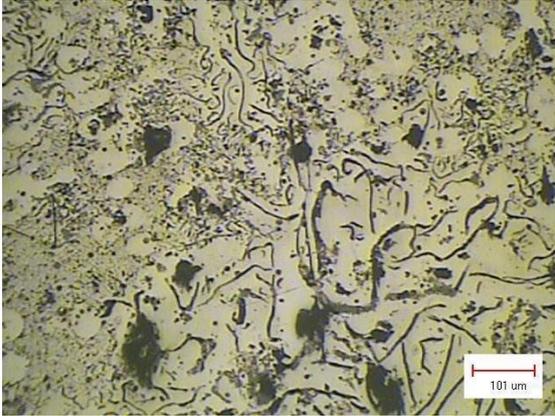


Figura 52 B: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “B”.

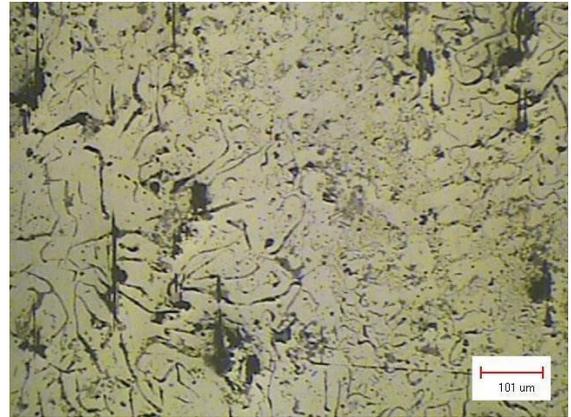


Figura 52 C: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 4 e 5.

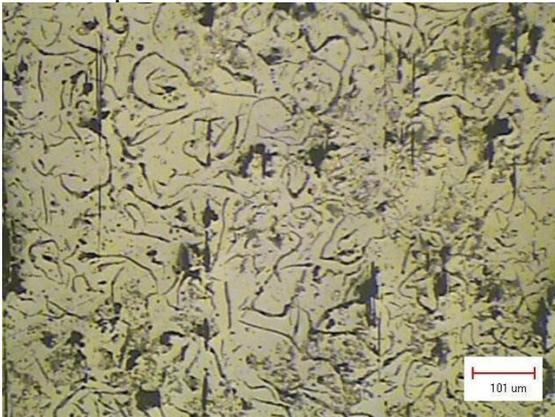
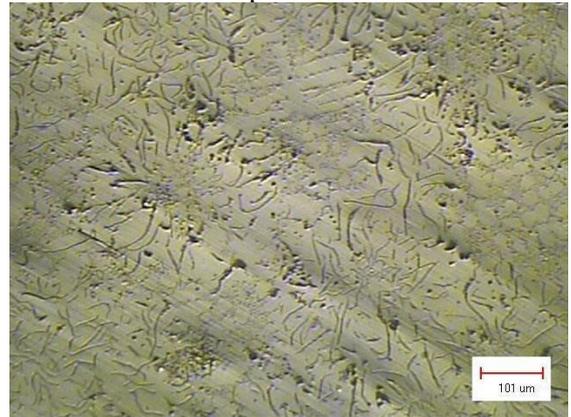


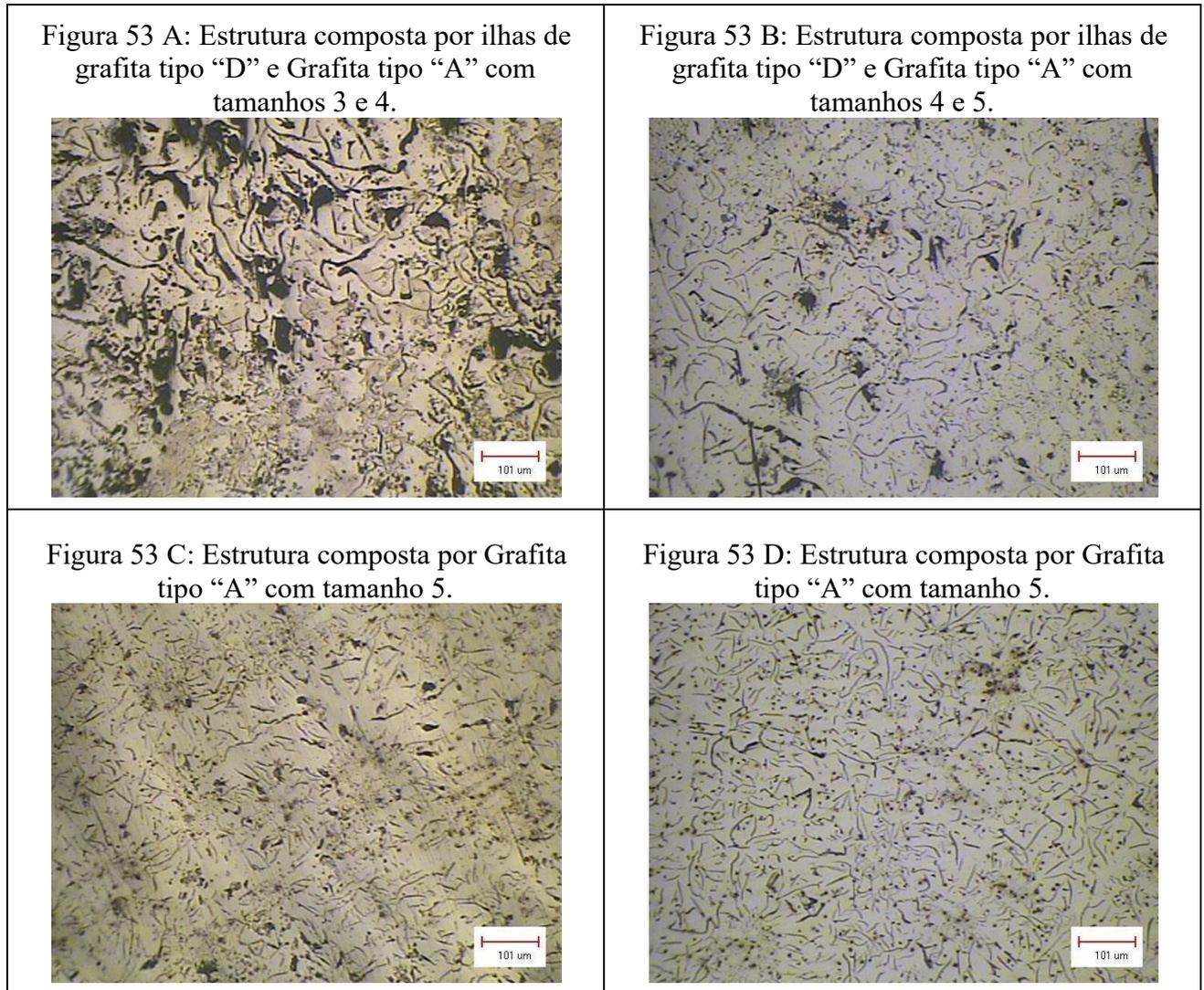
Figura 52 D: Estrutura composta por Grafita tipo “B”.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 53 foi realizado um tratamento com a adição de enxofre, a utilização de inoculantes de Fe-Si-Sr, 0,09% de inoculação sendo o nível mais baixo de inoculação utilizada e a uma temperatura mais alta de 1440 °C.

Figura 53 – Tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 54 foi realizado um tratamento com a adição de enxofre, a utilização de inoculantes de Fe-Si, 0,24% de inoculação sendo o nível mais alto de inoculação utilizada e a uma temperatura mais baixa de 1380 °C. Neste, pode-se verificar que em três dos quatro degraus há a presença de grafita do tipo “D” e nos outros dois degraus (3 e 4) há a presença de grafita do tipo “A” bem dispersa em toda a estrutura.

Figura 54 – Tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1380 °C – Aumento: 50x.

Figura 54 A: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 4 e 5.

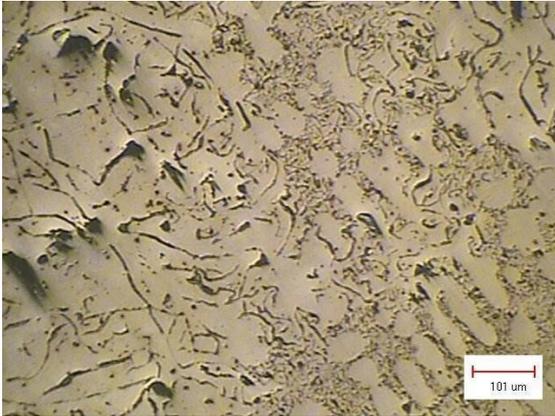


Figura 54 B: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 3, 4 e 5.

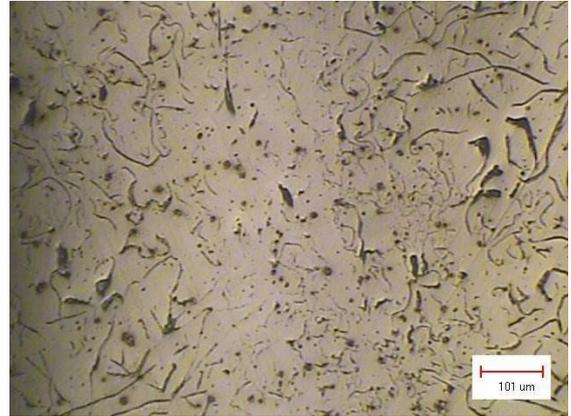


Figura 54 C: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 5.

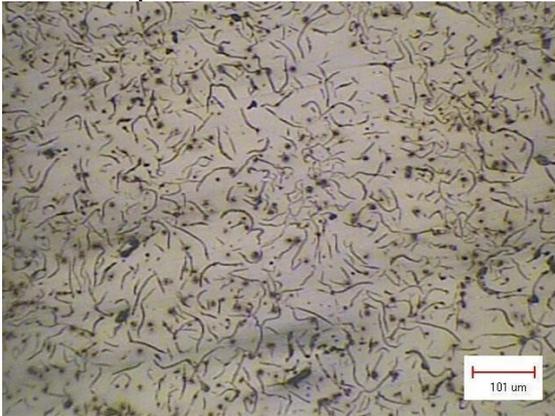
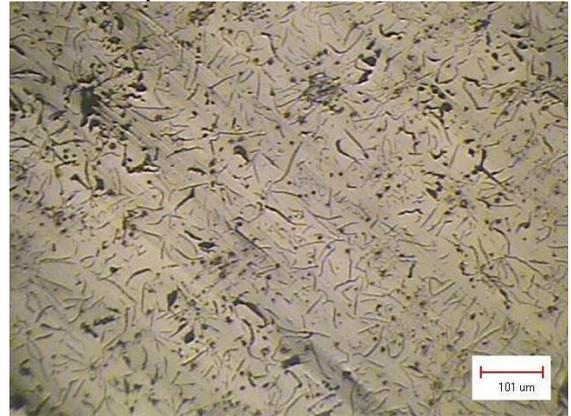


Figura 54 D: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 5.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 55 foi realizado um tratamento com a adição de enxofre, a utilização de inoculantes de Fe-Si, 0,24% de inoculação sendo o nível mais alto de inoculação utilizada e a uma temperatura mais alta de 1440 °C. No tratamento representado na Figura 55, pode-se verificar que em três dos quatro degraus há a presença de grafita do tipo “D”, no degrau 4 Grafita tipo “B” e no degrau 3 há a presença de grafita do tipo “A” bem dispersa em toda a estrutura.

Figura 55 – Tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C – Aumento: 50x.

Figura 55 A: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 3 e 4.

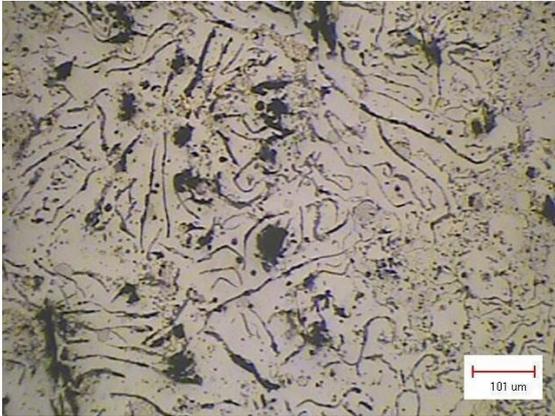


Figura 55 B: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “A” com tamanhos 3, 4 e 5.

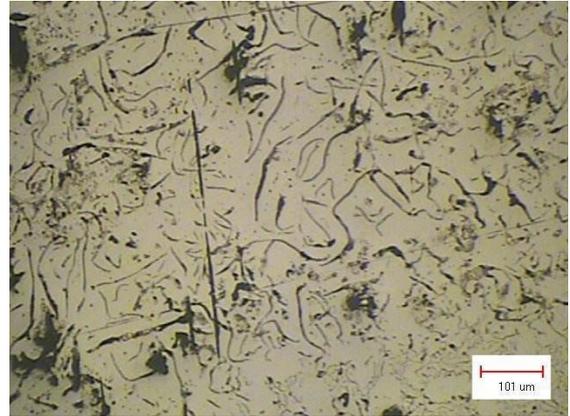


Figura 55 C: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanhos 3 e 4.

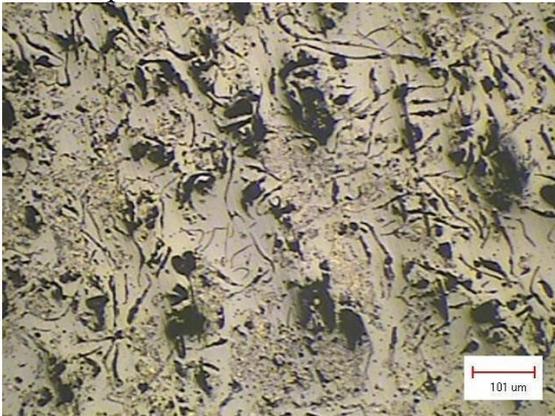
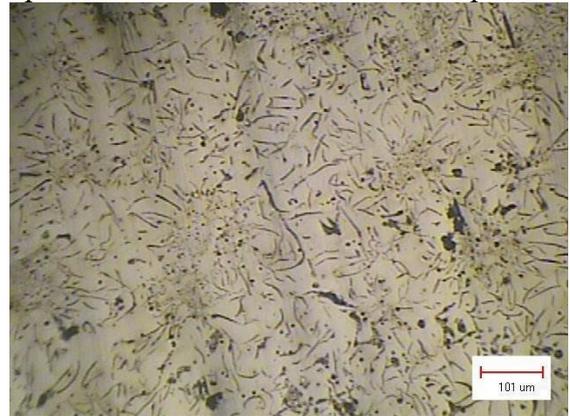


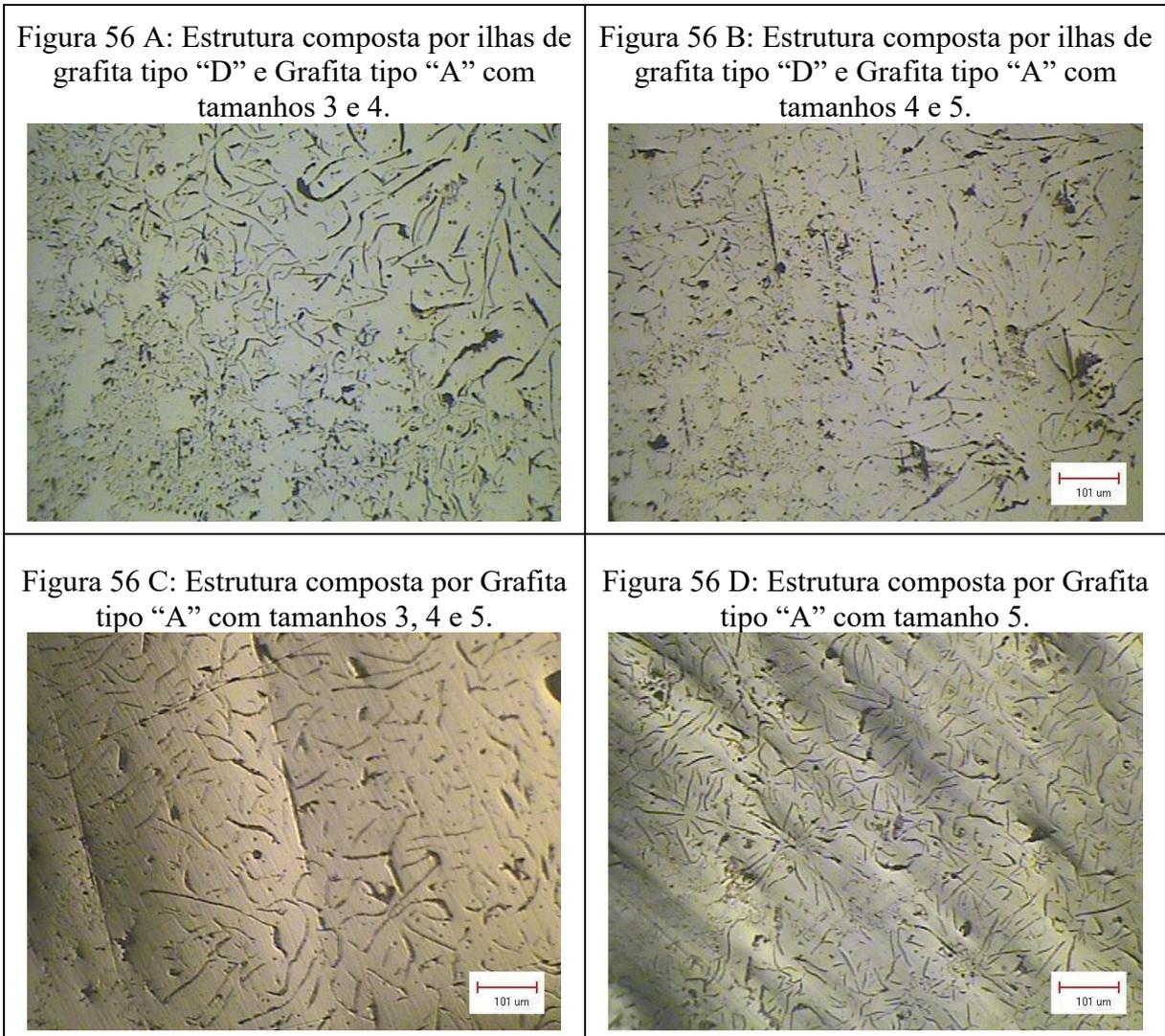
Figura 55 D: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 5 e Grafita tipo “A”.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 56 foi realizado um tratamento com a adição de enxofre, a utilização de inoculantes de Fe-Si-Sr, 0,24% de inoculação sendo o nível mais alto de inoculação utilizada e a uma temperatura mais baixa de 1380 °C. No tratamento representado na Figura 56, pode-se verificar que em dois dos quatro degraus há a presença de grafita do tipo “D”, enquanto nos degraus 4 e 5 há a presença de grafita do tipo “A” bem dispersa em toda a estrutura.

Figura 56 – Tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1380°C – Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 57 foi realizado um tratamento com a adição de enxofre, a utilização de inoculantes de Fe-Si-Sr, 0,24% de inoculação sendo o nível mais alto de inoculação utilizada e a uma temperatura mais alta de 1440 °C. No tratamento representado na Figura 57, pode-se verificar que em dois dos quatro degraus há a presença de grafita do tipo “D” e nos degraus 4 e 5 há a presença de grafita do tipo “A” bem dispersa em toda a estrutura.

Figura 57– Tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440°C – Aumento: 50x.

Figura 57 A: Estrutura composta por ilhas de grafita tipo “D” e Grafita tipo “B”.

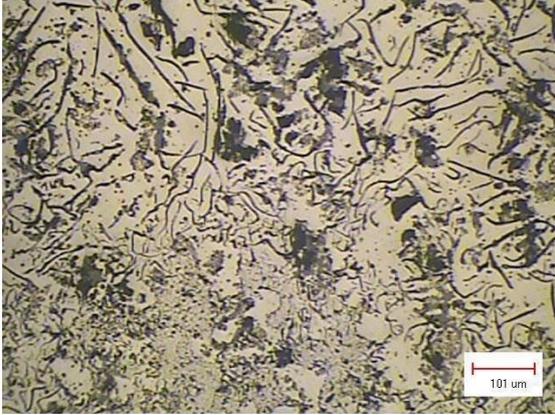


Figura 57 B: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanhos 3 e 4.

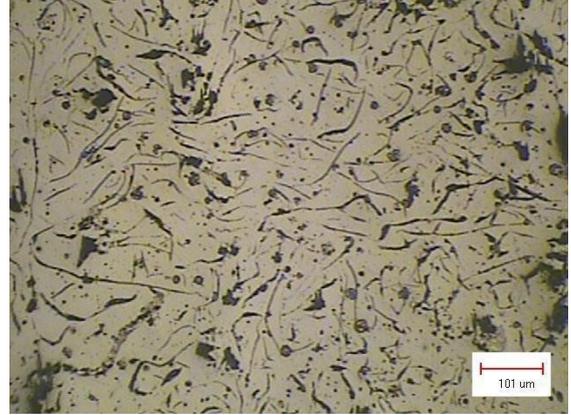


Figura 57 C: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanhos 3, 4 e 5.

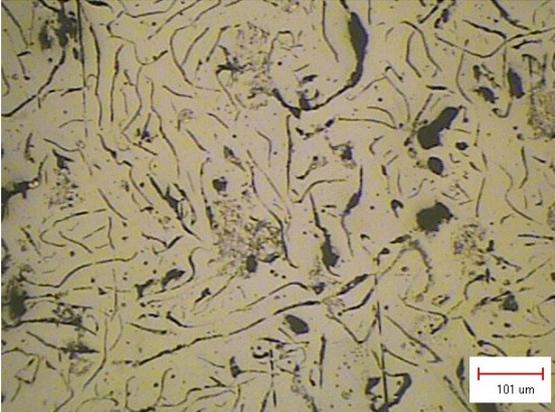


Figura 57 D: Estrutura composta por Grafita tipo “A” com tamanho 3 e 5.



Fonte: O autor (2019).

4.2.2 Células Eutéticas

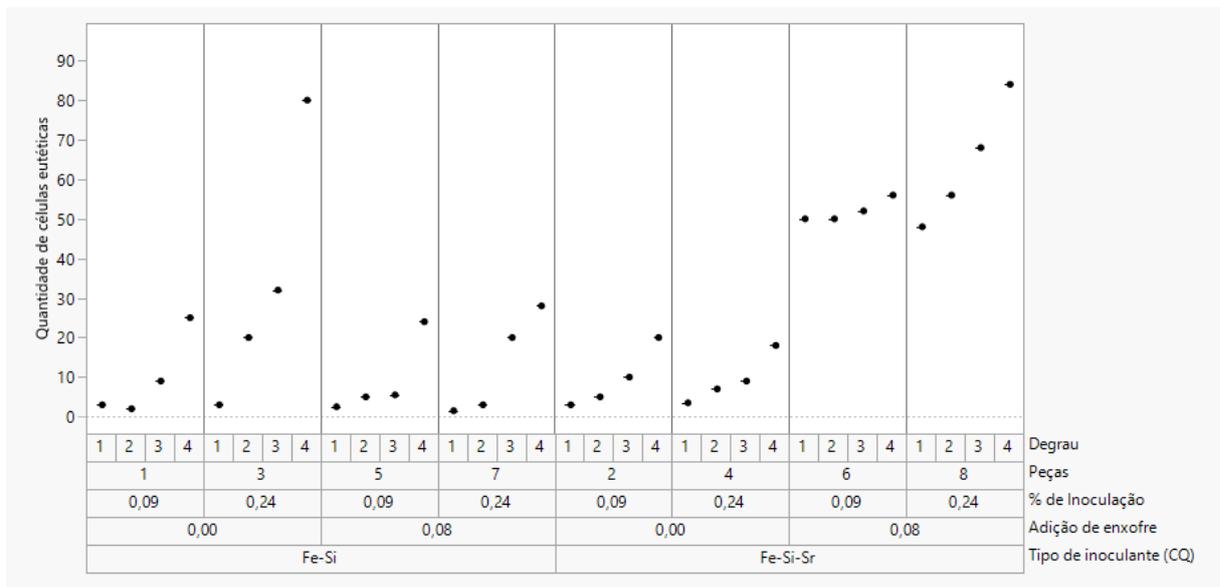
A análise realizada para medição da quantidade de células eutéticas foi feita com base nos tratamentos realizados e fatores que podem influenciar significativamente na quantidade da mesma, baseado em Nascimento (2016).

Com base no Gráfico 8, pode-se verificar o aumento na quantidade de células eutéticas com a adição de 0,08% de enxofre, nos dois percentuais de inoculação testados (0,09 e 0,24%) e com o inoculante Fe-Si-Sr, conforme teoria de Riposan (2005). Fato que não é visto na mesma composição de Fe-Si-Sr sem a adição de enxofre, comprovando a teoria de que o inoculante a

base de estrôncio precisa de um banho rico em sulfetos para que o mesmo seja efetivo e produza os núcleos de grafita do tipo “A”.

Os resultados obtidos neste experimento podem ser comparados ao de Guessser (2004), que apresentou para diferentes composições de inoculante o efeito do mesmo na quantidade de células eutéticas e que o aumento da quantidade de células eutéticas no inoculante com adição de estrôncio é maior que o que Fe-Si.

Gráfico 8 – Quantidade de células eutéticas por tratamento em cada degrau do CP.



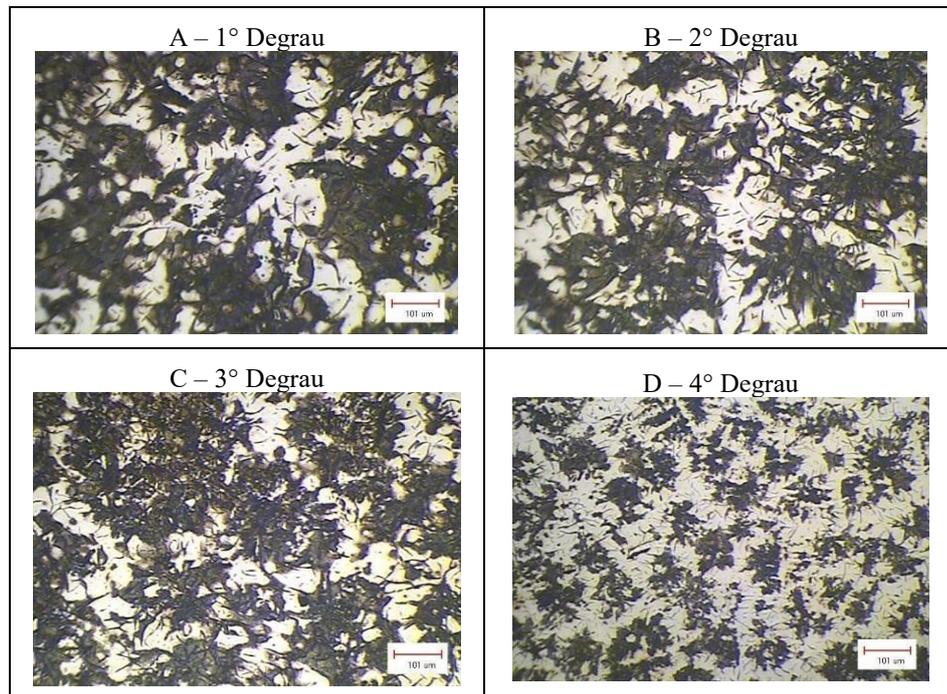
Fonte: O autor (2019).

As Figuras 58 a 65 apresentam a quantidade de células eutéticas em cada degrau analisado, do 1º ao 4º, demonstrando a influência da composição química do inoculante, da quantidade de inoculante adicionada e da adição de enxofre em cada tratamento realizado.

A Figura 58 demonstra a quantidade de células eutéticas no primeiro tratamento, conforme plano de amostragem definido na Figura 41, onde se pode observar o aumento da quantidade de células eutéticas em cada degrau.

Sendo o primeiro degrau (maior espessura) com células eutéticas maiores, mas em menores quantidades, e o quarto degrau (menor espessura entre os analisados) com uma maior quantidade de células eutéticas variando de 3 a 25 células eutéticas/mm².

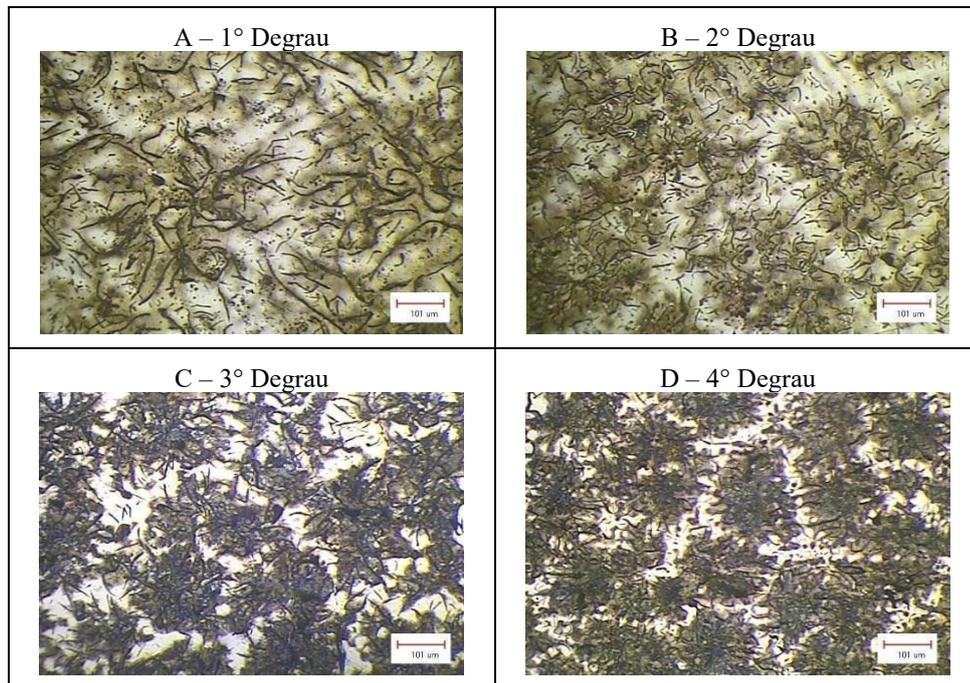
Figura 58 – Quantidade de células eutéticas do tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019)

A Figura 59 demonstra a quantidade de células eutéticas no segundo tratamento, conforme plano de amostragem definido na Figura 41, onde não há uma diferença significativa a partir do 2° degrau, sendo o primeiro degrau com células eutéticas maiores e a partir do 2° degrau células eutéticas menores, variando de 3 a 20 células eutéticas/mm².

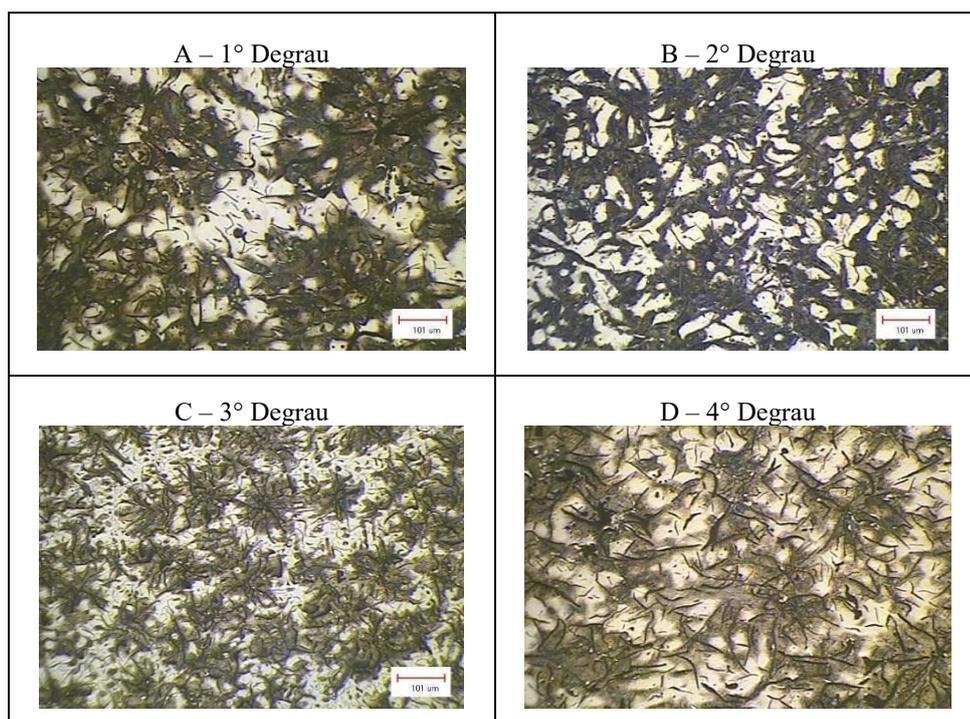
Figura 59 – Quantidade de células eutéticas do tratamento sem adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

A Figura 60 demonstra a quantidade de células eutéticas no terceiro tratamento. Existe uma diferença expressiva dependendo do degrau, variando de 3 a 80 células eutéticas/mm².

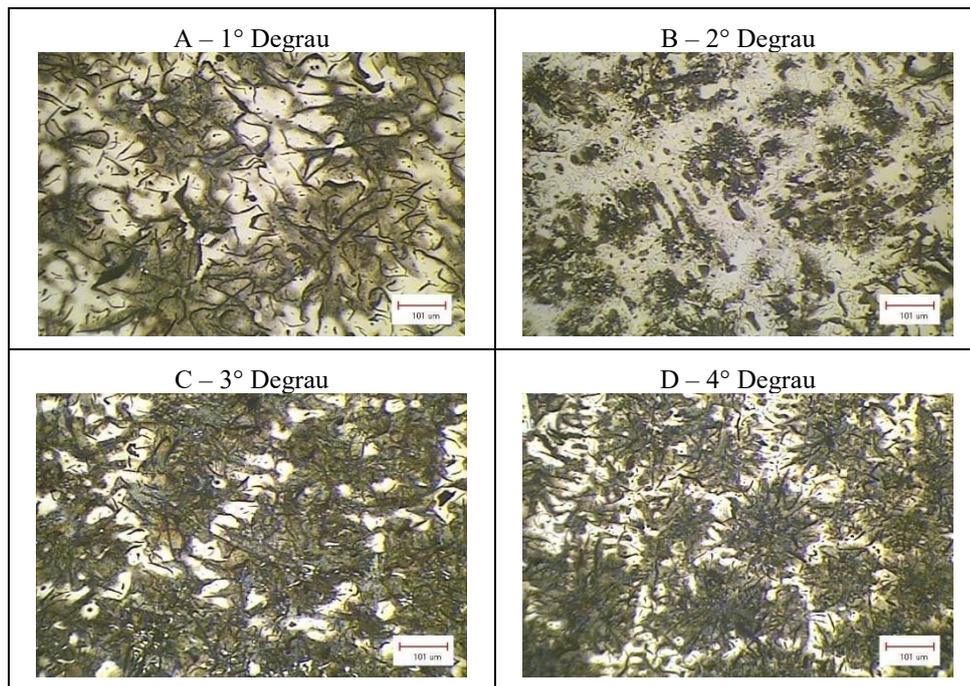
Figura 60 – Quantidade de células eutéticas do tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

A Figura 61 demonstra a quantidade de células eutéticas no quarto tratamento, conforme plano de amostragem definido na Figura 41, onde não há uma diferença significativa entre os degraus. O primeiro degrau continha células eutéticas maiores, mas em menores quantidades e, a partir do 2º degrau, células eutéticas menores e maior quantidade, variando de 3,5 a 18 células eutéticas/mm².

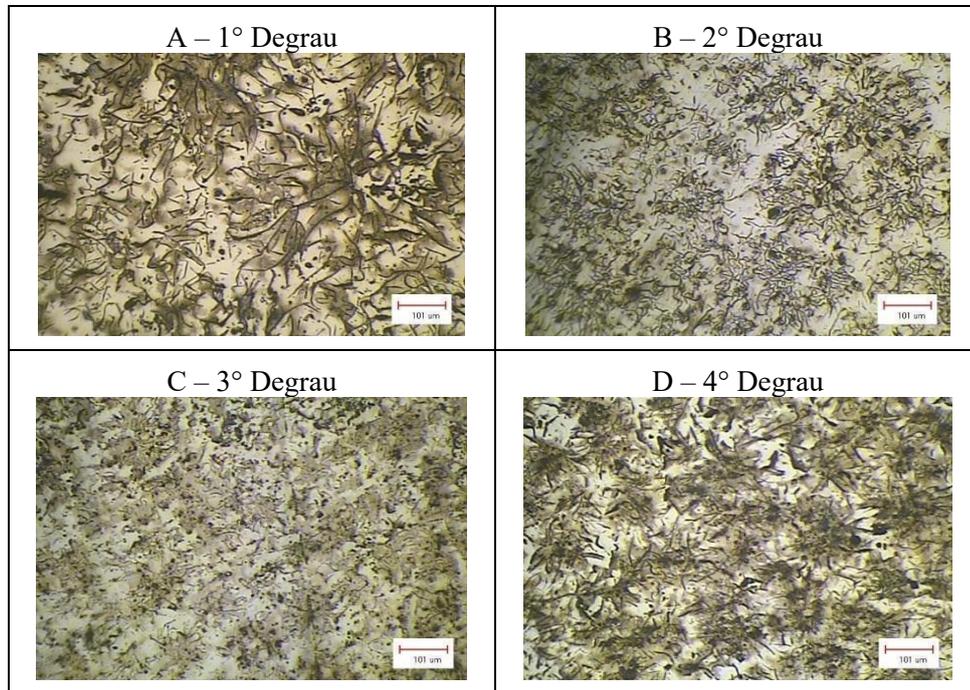
Figura 61 – Quantidade de células eutéticas do tratamento sem adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019)

A Figura 62 demonstra a quantidade de células eutéticas no quinto tratamento, conforme plano de amostragem definido na Figura 41. Foi verificada uma diferença significativa entre os degraus analisados, variando de 2,5 a 24 células eutéticas/mm².

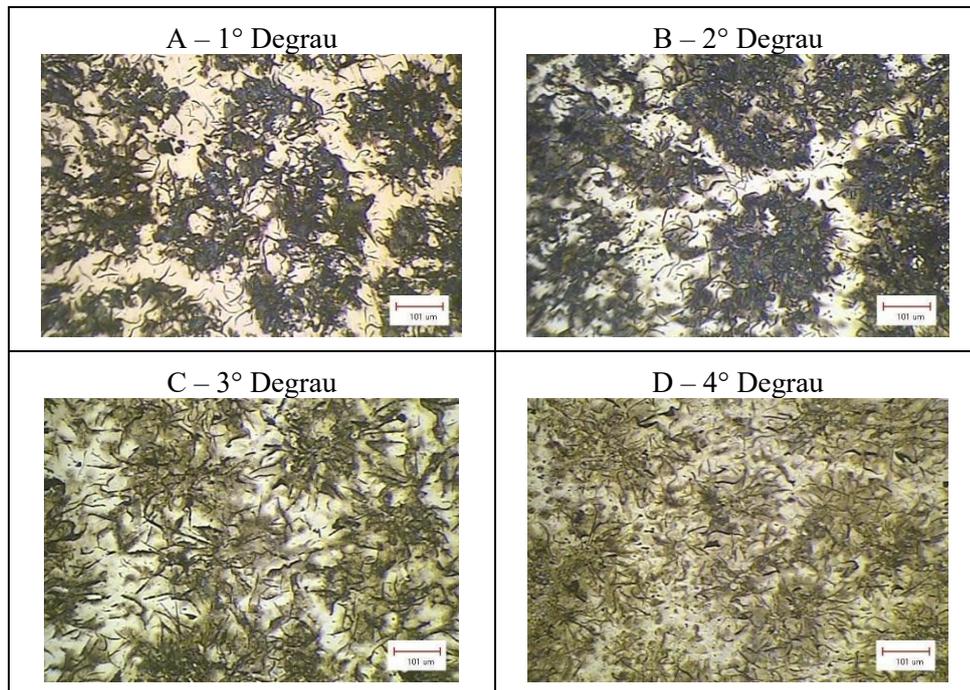
Figura 62 – Quantidade de células eutéticas do tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

A Figura 63 demonstra a quantidade de células eutéticas no sexto tratamento, conforme plano de amostragem definido na Figura 41, onde não há uma diferença entre os degraus. Os quatro degraus possuem células eutéticas menores em crescimento e em grande quantidade, variando de 50 a 56 células eutéticas/mm².

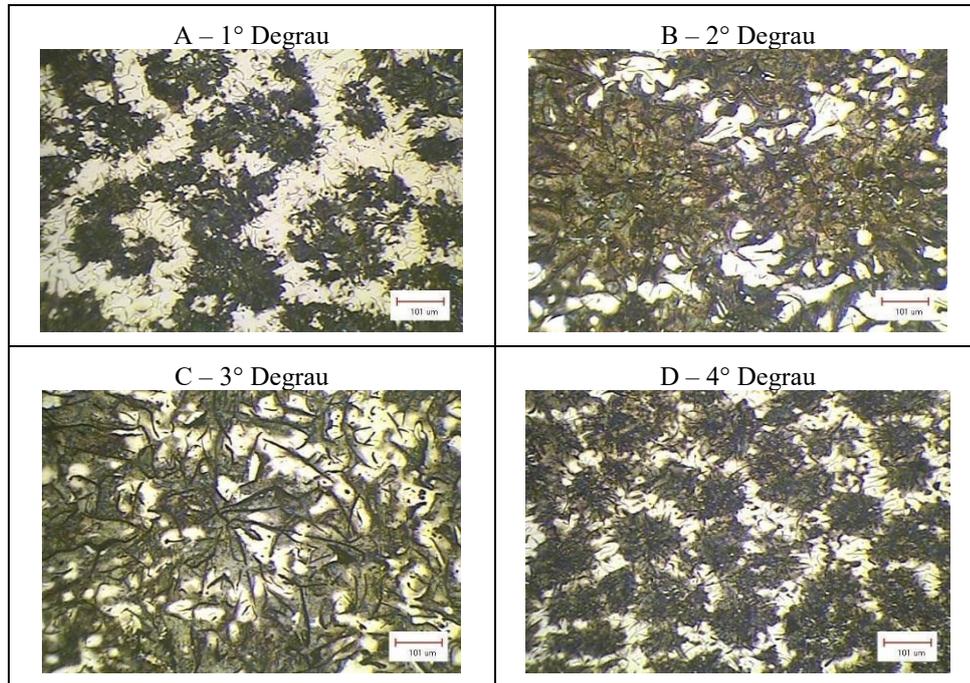
Figura 63 – Quantidade de células eutéticas do tratamento com adição de enxofre, 0,09% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

A Figura 64 demonstra a quantidade de células eutéticas no sétimo tratamento, conforme plano de amostragem definido na Figura 41, onde não há uma diferença entre os degraus. Os quatro degraus possuem células eutéticas menores em crescimento e em grande quantidade, variando de 50 a 56 células eutéticas/mm².

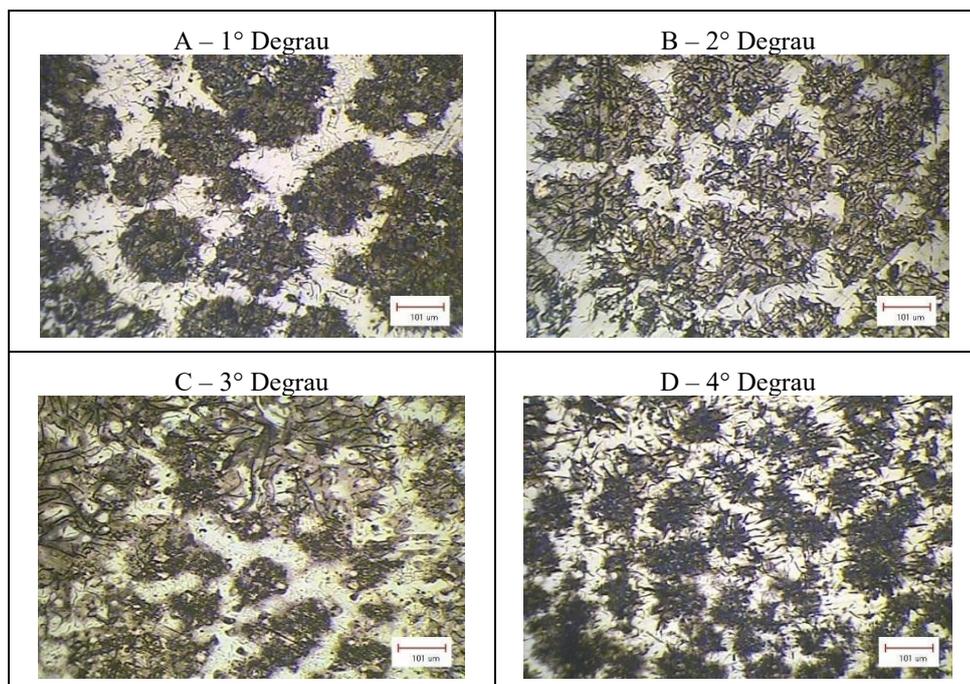
Figura 64 – Quantidade de células eutéticas do tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

A Figura 65 apresenta que os quatro degraus possuem células eutéticas menores em crescimento e em grande quantidade, variando de 48 a 84 células eutéticas/mm².

Figura 65 – Quantidade de células eutéticas do tratamento com adição de enxofre, 0,24% de inoculação em Fe-Si-Sr e temperatura de 1440 °C. Aumento: 50x.



Fonte: O autor (2019).

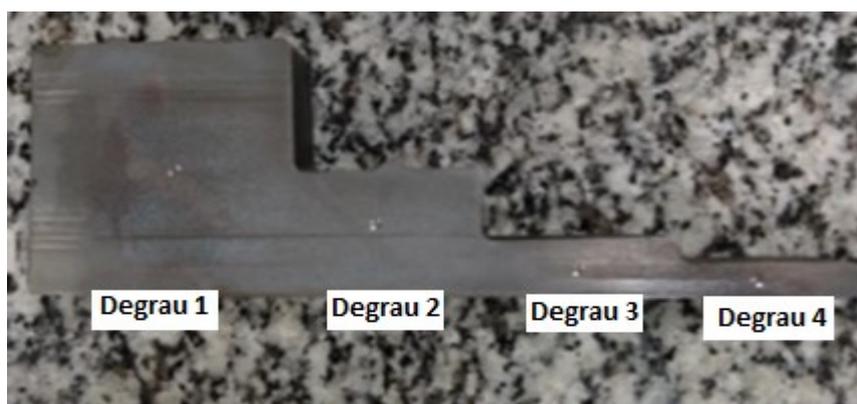
Com o experimento realizado pode-se comprovar os resultados de Guessser (2004), que demonstrou que nas mesmas condições, a utilização do inoculante composto por Fe-Si-Sr e adição de enxofre é o dobro da quantidade de células eutéticas quando comparado a utilização do inoculante de Fe-Si.

4.2.3 Dureza Brinell

O ensaio de dureza Brinell (HB) foi realizado nos quatro degraus dos corpos de prova, exatamente no meio dos mesmos, para não ter influência do efeito de borda nas análises, com base no estudo realizado por Stuewe (2008). A indentação em cada degrau foi realizada conforme Figura 66. O Gráfico 9 apresenta a variação da dureza HB em cada tratamento, fornecendo a informação de qual degrau e em cada tratamento realizado nos experimentos, buscando o tratamento que apresenta as melhores propriedades mecânicas.

Foi realizada a média em relação às duas composições químicas de inoculantes testados, mostrando que o inoculante de Fe-Si-Sr apresenta as durezas mais baixas de todo experimento. A menor relação de dureza foi encontrada no oitavo tratamento, conforme planejamento da Figura 41, onde há a adição de enxofre, com 0,24% de inoculação e o inoculante com adição de estrôncio, tendo a média 182 HB.

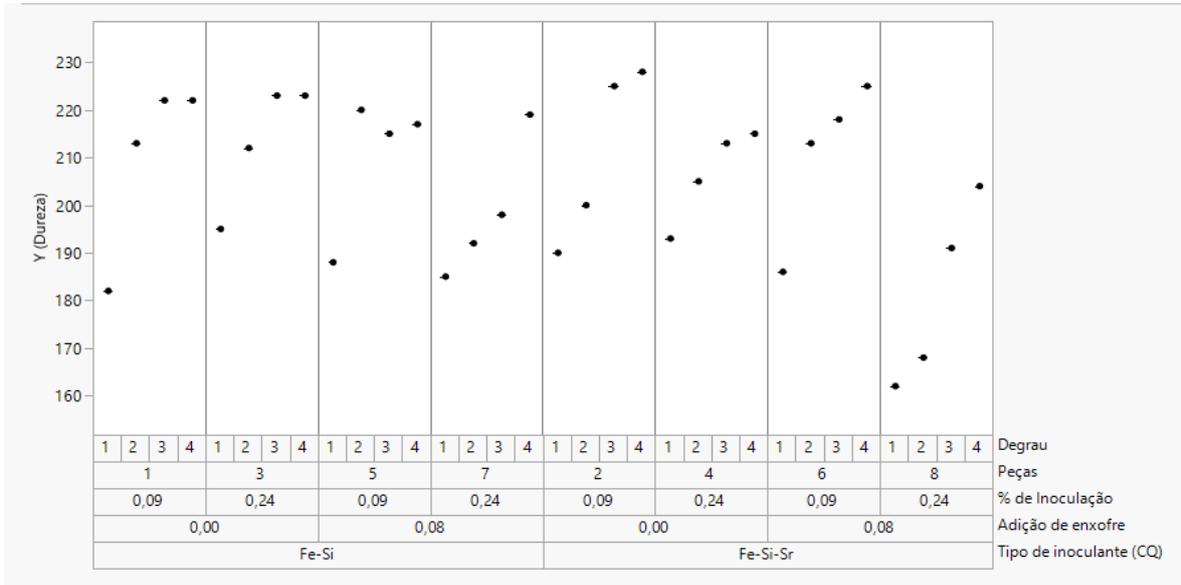
Figura 66 – Corpo de prova com local de indentação.



Fonte: O autor (2019).

O Gráfico 9 apresenta a dureza por tratamento com e sem a adição de enxofre, onde todas as amostras com adição de enxofre tiveram o resultado da propriedade de dureza menor, estando desta forma o mais próximo do requerido para o ferro fundido cinzento, conforme os limites de especificação, que variam de 170-210 HB (NASCIMENTO, 2016).

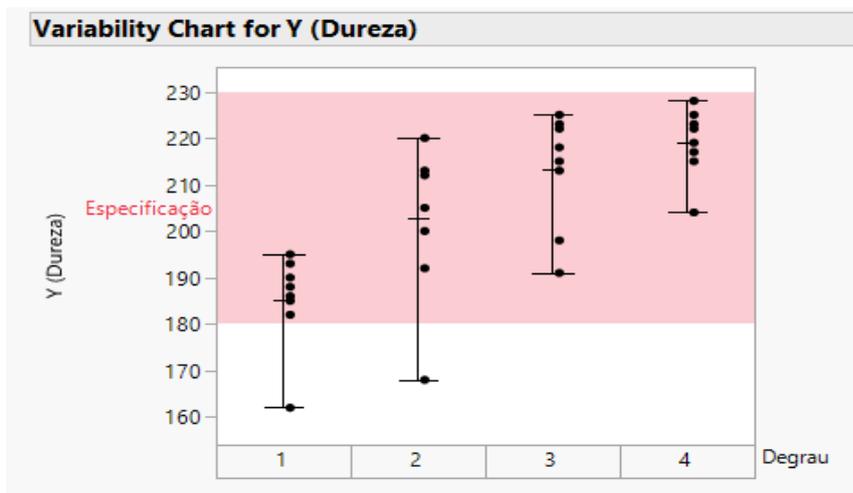
Gráfico 9 – Dureza HB por tratamento em cada degrau do corpo de prova.



Fonte: O autor (2019).

Todos os resultados de dureza foram crescentes ao passar do primeiro degrau para o quarto, como já era esperado segundo a teoria (NASCIMENTO, 2016; STUEWE, 2008), pois, quando mais fina a espessura, maior a troca de calor com o molde, mais rápida a solidificação e maior a tendência a matriz perlítica, aumentando a dureza do material. Gráfico 10 apresenta as amostras de todos os tratamentos em ordem crescente de dureza HB de acordo com os degraus, bem como a definição do limite de especificação onde há tratamentos com amostras acima e abaixo do especificado, mas a maior parte das amostras atende a especificação.

Gráfico 10 – Medida de dureza por degrau.

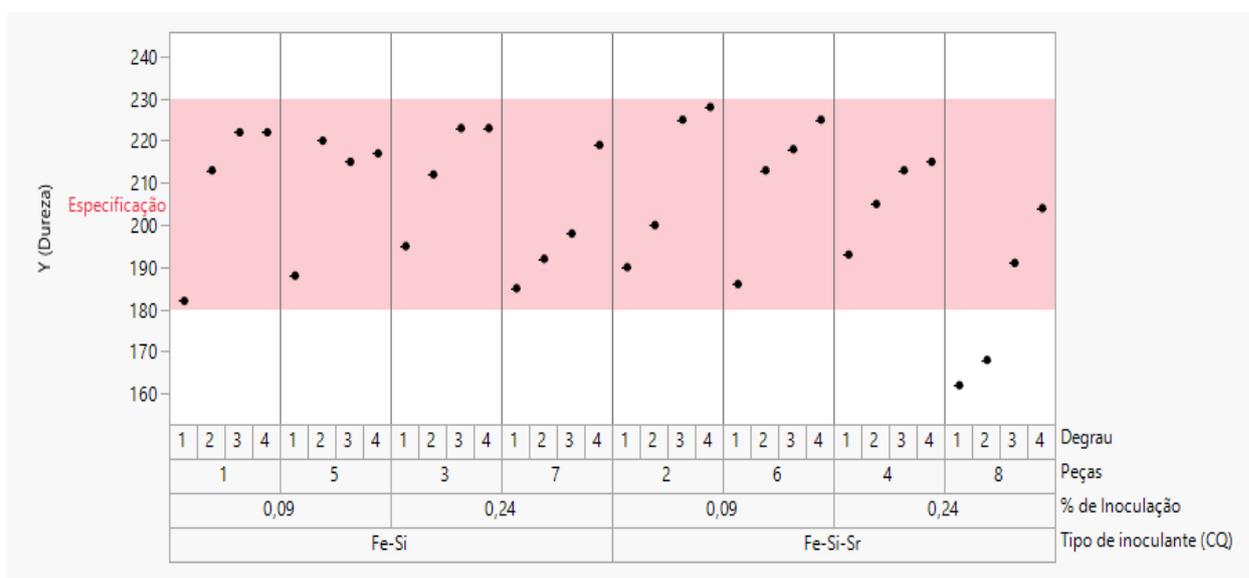


Fonte: O autor (2019).

Os resultados de dureza Brinell (HB) podem ser comparados aos de Pieske (1985), que apresentou uma dureza máxima de 217 HB em corpos de prova com diâmetro de 45 mm e 255 HB com diâmetro de 13 mm, confirmando os valores crescentes de dureza com a diminuição da espessura do degrau, obtidos no presente trabalho e apresentados no Gráfico 10. No Apêndice B, os gráficos B1, B2, B3 e B4, são um conjunto de gráficos que demonstram o comportamento da dureza e identificam os fatores e variáveis mais significativos para alteração desta. Com base nestes as medidas de dureza de acordo com a quantidade de enxofre adicionada, onde se observa uma grande dispersão de valores entre as amostras, desta forma não dependendo somente da adição de enxofre, mas também do tipo de inoculante utilizado. O fator considerado mais significativo é uma interação entre o percentual de adição do enxofre com o tipo de inoculante adicionado. Os maiores valores de dureza são obtidos com o inoculante de Fe-Si e sem adição de enxofre, e os menores valores desta propriedade com a adição de enxofre e utilização de Fe-Si-Sr.

Considerando as microestruturas apresentadas na seção 4.2.1 e quantidade de células eutéticas (Seção 4.2.2) deste trabalho, estes resultados já eram previstos, pois há predominância da grafita do tipo “D” em todos os degraus e um menor número de células eutéticas. A interação entre os fatores pode ser vista no Gráfico 11, o qual apresenta que alguns tratamentos não apresentam grande variação entre si, porém outros apresentam resultados mais consistentes, como o tratamento da inoculação com estrôncio.

Gráfico 11 – Interação entre percentual de inoculação, adição de enxofre e composição química do inoculante na medida de dureza.



Fonte: O autor (2019).

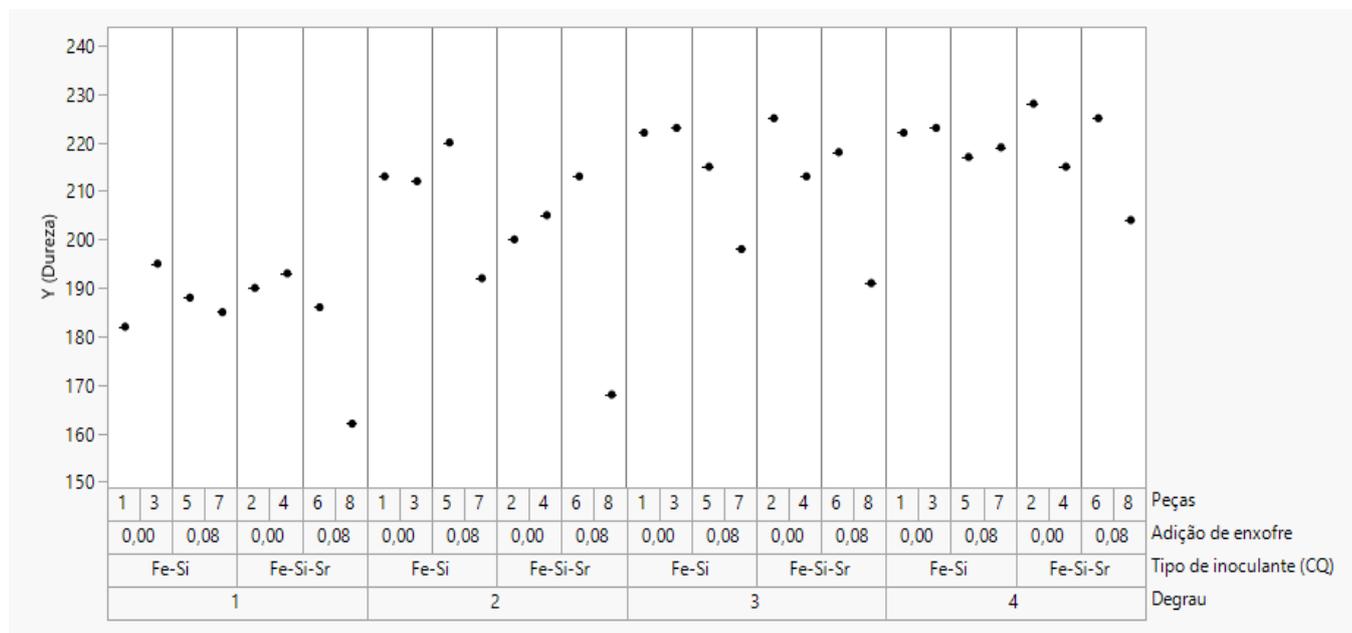
De acordo com os gráficos apresentados nesta seção pode-se concluir que o menor valor de dureza é encontrado com a adição de enxofre, 0,24% de inoculação, temperatura baixa (1380 °C) e com a composição química de Fe-Si-Sr do inoculante. Comparando este resultado com a quantidade de células eutéticas, foi possível observar que este foi o tratamento que possuiu a maior quantidade de células eutéticas/mm², variando de 48 a 84 células eutéticas/mm² (Seção 4.2.2). Desta forma há muitas células eutéticas no banho e em crescimento, fato que é confirmado com as microestruturas analisadas, justificando assim o menor valor de dureza encontrado neste tratamento.

No Apêndice B, o Gráfico B5 mostra todos os fatores e interações que são significativos para a resposta dureza, o qual confirma as afirmativas feitas no escopo do trabalho, onde os fatores considerados mais significativos são a composição química do inoculante e a adição de enxofre. Os resultados apresentados mostram que a teoria dos sulfetos apresentada em Riposan (2005) é realmente verificada na prática, pois, para o melhor desempenho do inoculante de Fe-Si-Sr é necessário um banho rico em sulfetos, sendo que neste trabalho foi utilizado enxofre.

O Gráfico 12 é um resumo de todos os analisados anteriormente, onde há o aumento desta propriedade ao passar do degrau 1 para os degraus posteriores e de menor espessura. Este fato já era esperado considerando a solidificação do ferro fundido cinzento e a reação do mesmo dependendo das condições em que é submetido durante e após o vazamento.

Os resultados mais estáveis e com valores aceitos de acordo com as normas do FC-200 (PIESKE, 1985) são os que contêm estrôncio na composição química do inoculante, isto porque de acordo com as teorias e fundamentação teórica já apresentada, alguns elementos químicos, como o estrôncio, possuem maior estabilidade durante a solidificação. Desta forma, há maior propensão da formação da grafita do tipo “A” e das propriedades mecânicas requeridas para esta classe de ferro fundido cinzento.

Gráfico 12 – Medida de dureza em cada degrau.



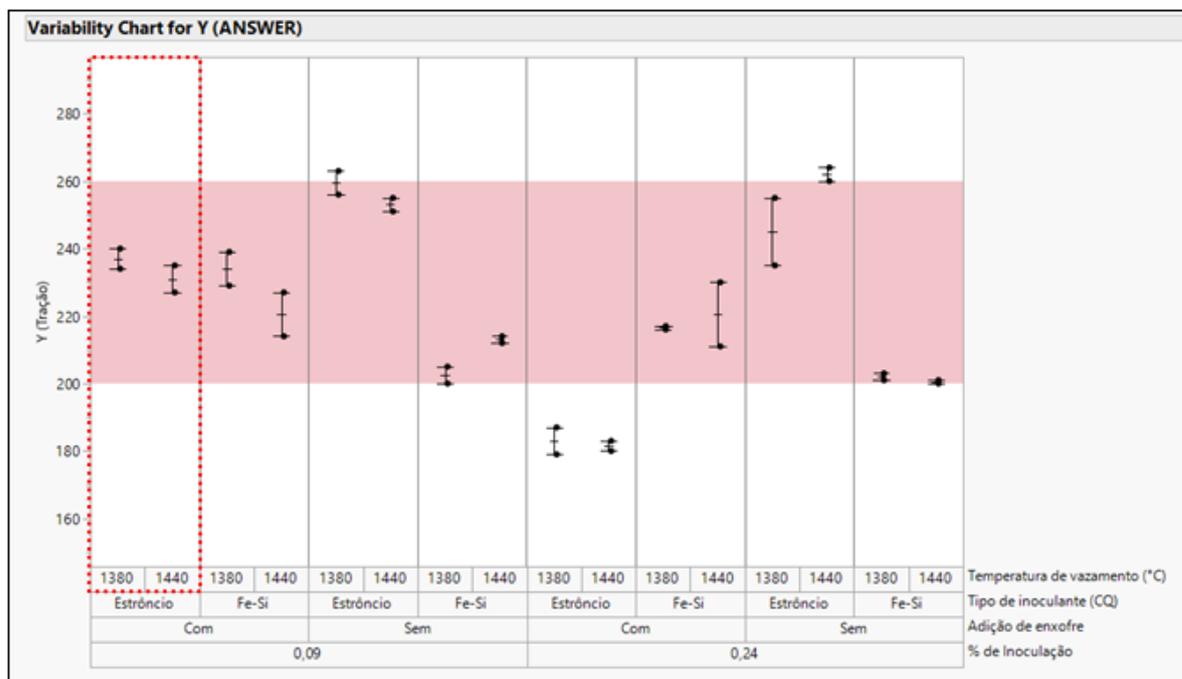
Fonte: O autor (2019).

4.2.4 Resistência à tração

A análise da resistência à tração foi realizada em todos os tratamentos, para verificação da variação entre as condições e fatores que foram manipulados durante o experimento. Como a resistência mecânica é fundamental para as peças, além das propriedades físicas das estruturas já vistas anteriormente no presente trabalho, o ensaio mecânico de resistência à tração torna-se essencial para a determinação desta propriedade. Foram realizados oito ensaios de tração neste experimento, onde em cada tratamento foi obtida uma resposta, a qual pode ser relacionada as demais análises já realizadas nas seções 4.2.1 a 4.2.3. No Gráfico 13 são apresentadas todas as resistências à tração dos tratamentos realizados, onde os maiores valores de resistência à tração são obtidos com o inoculante a base de estrôncio.

Com base no Gráfico 13, pode-se constatar que a adição de enxofre influencia fortemente no aumento ou queda desta propriedade mecânica, a qual depende da quantidade de inoculante adicionado e a utilização de enxofre na composição química da liga. Já para o inoculante de Fe-Si, esta diferença não é tão significativa, devido à relação óxido-sulfeto, (RIPOSAN, 2005), que indica uma relação mais forte nos inoculantes com adição de estrôncio.

Gráfico 13 – Interação de adição de enxofre, percentual de inoculação e tipo de inoculante de acordo com os limites de especificação.

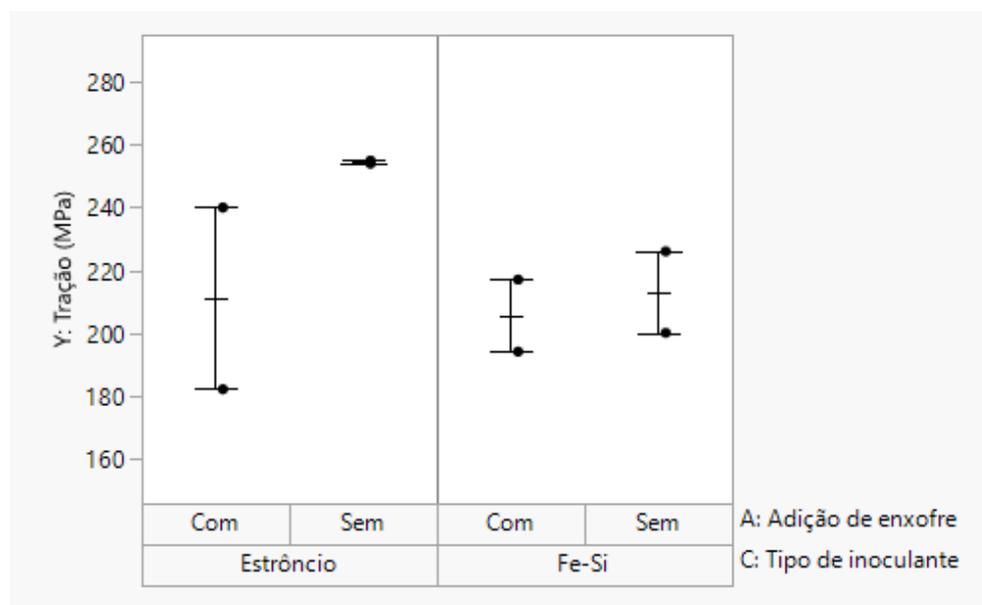


Fonte: O autor (2019).

Quando comparados os inoculantes de Fe-Si e Fe-Si-Sr, observa-se que os valores de resistência à tração são muito próximos para a composição de Fe-Si, sendo mais afetado quando não há enxofre no banho e um percentual maior de inoculação. Já para o inoculante de Fe-Si-Sr há a obtenção dos maiores valores da propriedade de resistência à tração, sendo muito afetado pelo percentual de inoculação adicionado ao banho líquido e pela quantidade de enxofre. O menor valor de resistência à tração foi obtido com a adição de inoculante e 0,24% de inoculação devido à estrutura formada, pois, quanto maior o percentual de inoculação, maior a tendência à formação de grafitas em crescimento e a falha do corpo de prova com uma resistência à tração menor (GUESSER, 2009).

Desta forma, todos os resultados ocorreram de acordo com o que já era previsto nas teorias de Guessser (2009) e Fuller (1986), onde a estrutura era afetada com a adição de enxofre, pois, forma-se um banho rico em sulfeto favorecendo a formação de núcleos estáveis e grafita do tipo “A”. O Gráfico 14 mostra a principal interação na resposta à resistência à tração, que é a composição química do inoculante e a quantidade de enxofre adicionada. Pode-se verificar que o inoculante sem adição de enxofre, o qual possui estrutura com grafita do tipo “D”, fornece os maiores valores de resistência à tração.

Gráfico 14 – Interação dos fatores de percentual de adição de enxofre e composição química do inoculante.



Fonte: O autor (2019).

A Tabela 6 apresenta resumidamente os resultados de cada tratamento realizado e das principais propriedades requeridas para o ferro fundido cinzento que foram obtidas.

Tabela 6 – Resumo dos resultados experimentais.

% Enxofre	% Inoculação	CQ Inoculante	Tipo de Grafita	Dureza (HB)	Resistência à tração (MPa)
0,00%	0,09%	Fe-Si	“A” e “D”	200	>220
0,00%	0,09%	Fe-Si-Sr	“A” e “D”	205	>260
0,00%	0,24%	Fe-Si	“A”	203	>200
0,00%	0,24%	Fe-Si-Sr	“A”	230	>260
0,08%	0,09%	Fe-Si	“D”	215	>200
0,08%	0,09%	Fe-Si-Sr	“A” e “D”	200	>240
0,08%	0,24%	Fe-Si	“A” e “D”	205	>215
0,08%	0,24%	Fe-Si-Sr	“A”	190	>185

Fonte: O autor (2019).

Observa-se que não houve uma alteração significativa nas propriedades mecânicas do material, sendo a dureza e resistência mecânica à tração muito similares e próximas ao limite superior de especificação. Isto se deve a estrutura presente no material e da composição química

do inoculante, pois, o inoculante a base de estrôncio possui maior tendência à formação de matriz gráfitica e é mais estável, porém necessita de um banho rico em óxido-sulfetos para ter sua eficiência potencializada (Riposan, 2005).

Isto ocorre porque, apesar da boa resistência mecânica, há uma grande dificuldade de usinabilidade deste material com a estrutura apresentada. Desta forma, mesmo com a maior adição de inoculante não houve uma variação nas propriedades mecânicas, mas sim na estrutura do material. Com base no comparativo dos resultados de resistência à tração, pode-se verificar que houve uma diminuição de 20 MPa comparativamente ao tratamento com a mesma quantidade de inoculante sem a adição de enxofre. Isto se deve ao maior percentual de grafitas presentes na estrutura, onde há a melhoria das propriedades físicas de dissipação de calor e bom amortecimento de vibrações, porém com diminuição da resistência à tração.

Conforme já esperado pela teoria de Guessser (2009) e Riposan (2005) e testes realizados, houve uma grande diminuição das propriedades mecânicas de dureza e resistência à tração, fato que é explicado pela estrutura do material que se caracteriza por uma matriz com grafita tipo “A” em toda sua estrutura, melhorando assim consideravelmente as propriedades físicas da peça. No Apêndice B, o conjunto de gráficos B6 a B11, apresenta detalhadamente as informações contidas no Gráfico 13 e Tabela 6, abordando os fatores e variáveis mais significativas para a propriedade de resistência a tração. De acordo com estes foi verificado que a interação do percentual de adição de enxofre com o tipo de inoculante é o fator mais significativo para o aumento da resistência à tração e que para a obtenção de uma resistência à tração de 211 MPa é necessária a adição de 0,04% de enxofre e utilização de Fe-Si-Sr.

A combinação com as piores propriedades mecânicas, onde foi adicionado 0,08% de enxofre com 0,24% de inoculação e inoculante Fe-Si-Sr e contrariamente onde ocorrem as melhores propriedades físicas e estruturais das peças.

Ainda a previsão apresenta, com base nos fatores de adição de enxofre, percentual de inoculação e composição química do inoculante, com o fator 0,04% de adição de enxofre e 0,165% de inoculação com a composição de Fe-Si se obtém uma tração de 223,5 MPa, sendo que um valor superior é obtido com a adição de enxofre nas mesmas condições. Ainda, com base nos dados do Gráfico 14, verifica-se que a interação dos fatores adição de enxofre e tipo de inoculante pode não ser considerada extremamente significativa, mas é muito superior aos demais fatores.

4.2.5 Composição química da liga

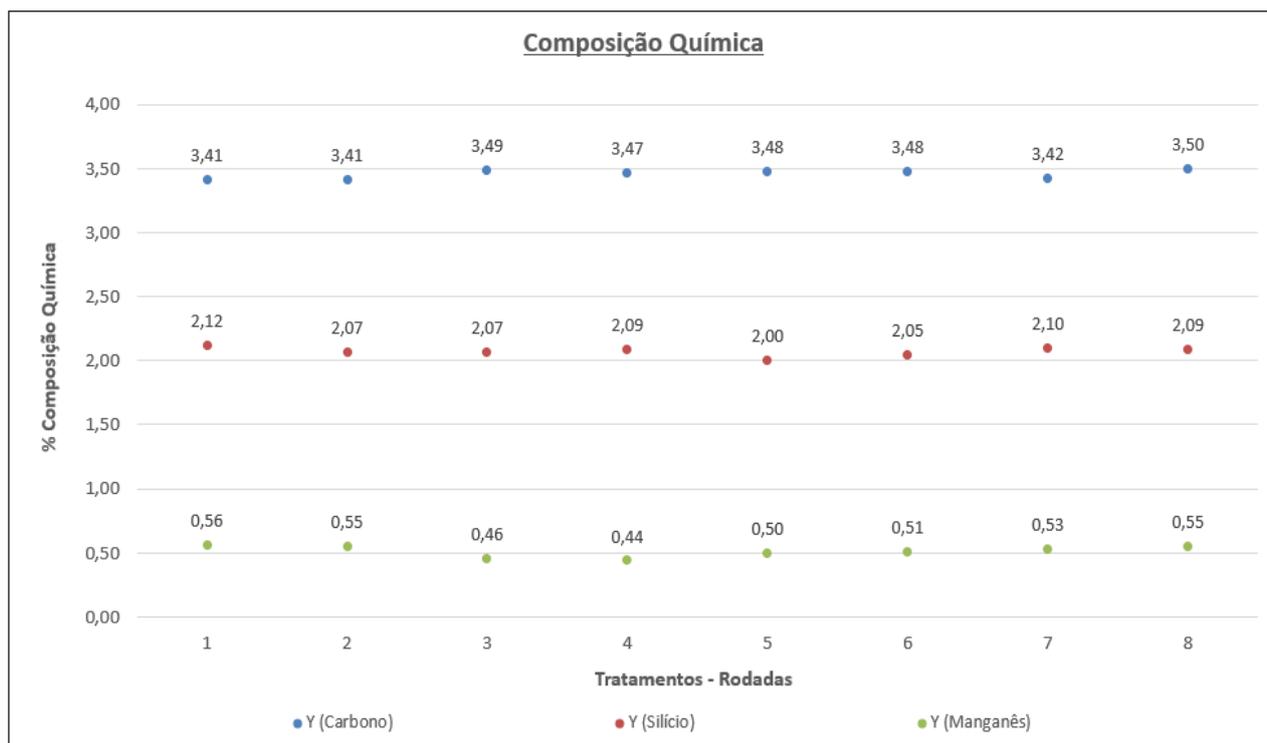
O controle da composição química do banho metálico foi primordial durante a realização dos testes, pois era um dos principais fatores a serem controlados durante o experimento. Além disto, o percentual de carbono e silício é determinante para a formação da estrutura grafitica, sendo que quanto maior o percentual de carbono equivalente menor o número de células eutéticas presentes (GUESSER, 2004), sendo que o percentual de silício é fundamental para a abertura do intervalo de solidificação e, conseqüentemente, a diminuição ocasiona a redução do super resfriamento (NASCIMENTO, 2016).

Sabendo que o silício amplia o intervalo de solidificação, há uma maior tendência para formação da grafita do tipo “A” dependendo das condições de velocidade de resfriamento e a temperatura em que foi realizado o tratamento. Os elementos carbono, silício, manganês e fósforo foram monitorados e os limites de especificação foram definidos de acordo com as normas FC-200, para que a estrutura atenda aos requisitos e as propriedades mecânicas e térmicas a que este material é solicitado.

O único elemento que foi controlado durante o experimento foi o enxofre, sendo apresentada a influência do mesmo nas seções 4.2.1 a 4.2.4 e manipulado em dois níveis (0,00 – 0,08%) de acordo com a teoria de PIESKE (1985). O Gráfico 15 apresenta os limites de especificação para todos os elementos de liga, de acordo com a especificação química para o FC-200.

A composição química do experimento variou nos seguintes valores: i) Carbono: 3,4-3,5%; ii) Silício: 2,0-2,1%; iii) Manganês: máximo 0,6%, sempre sendo balanceada de acordo com o percentual de enxofre; iv) Fósforo: máximo 0,08%.

Gráfico 15 – Composição química da liga durante os experimentos.



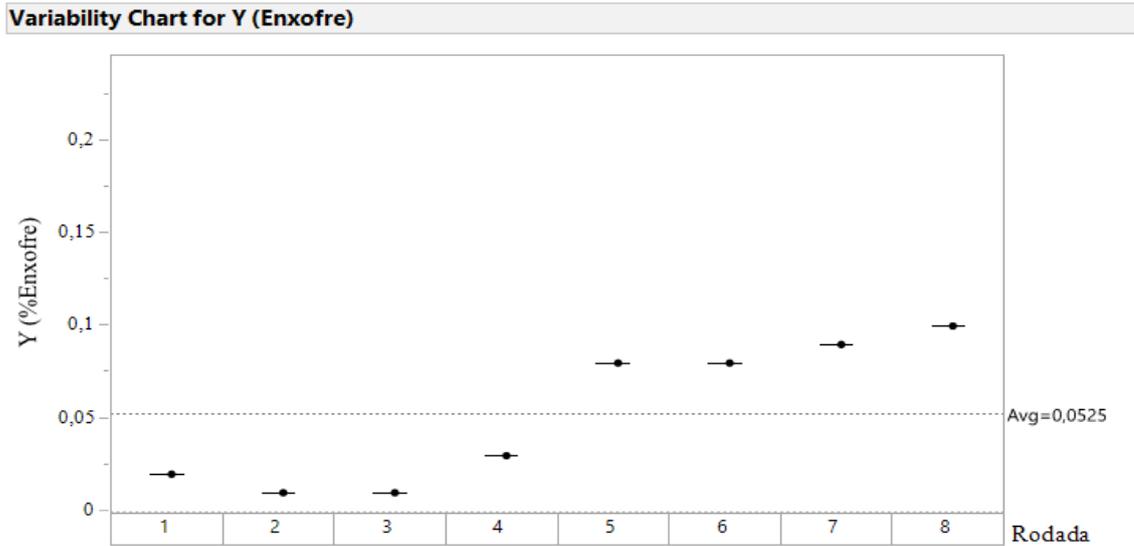
Fonte: O autor (2019).

O percentual dos elementos monitorados em cada tratamento pode ser verificado no Apêndice B - Gráficos B12 a B15, onde há o detalhamento desta quantidade e se os mesmos estavam dentro dos limites de especificação (ABNT/NBR 6589).

Conforme apresentado em Guesser (2004), dependendo da composição química há alteração nas propriedades mecânicas da peça, influenciando os resultados do experimento. Com base nisto foi de extrema importância o monitoramento da quantidade dos elementos químicos, pois, desta forma pode-se verificar a influência dos mesmos na estrutura de cada tratamento e nas propriedades físicas e mecânicas.

No Gráfico 16 estão apresentados os valores controlados de enxofre por tratamento, já que este fator foi manipulado durante o experimento e é de suma importância que o mesmo esteja de acordo com o especificado.

Gráfico 16 – Enxofre amostras e limites de especificação.

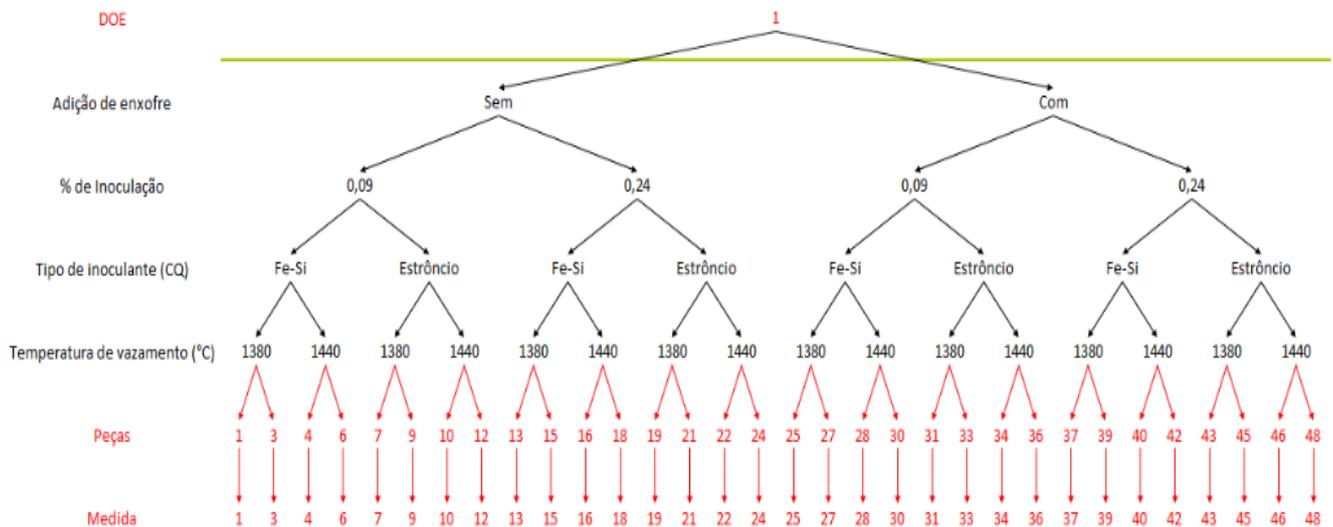


Fonte: O autor (2019).

4.2.6 Ferro duro

A quantidade de ferro duro foi analisada durante os tratamentos realizados, conforme apresentado na Figura 67, onde foram realizadas 16 condições de experimento e analisadas três amostras em cada condição. As amostras analisadas foram retiradas do 5º degrau de cada CP (corpo de prova), que é o degrau de menor espessura e mais favorável ao aumento da altura de coquilhamento (ferro duro).

Figura 67 – Plano de amostragem para o defeito de ferro duro.

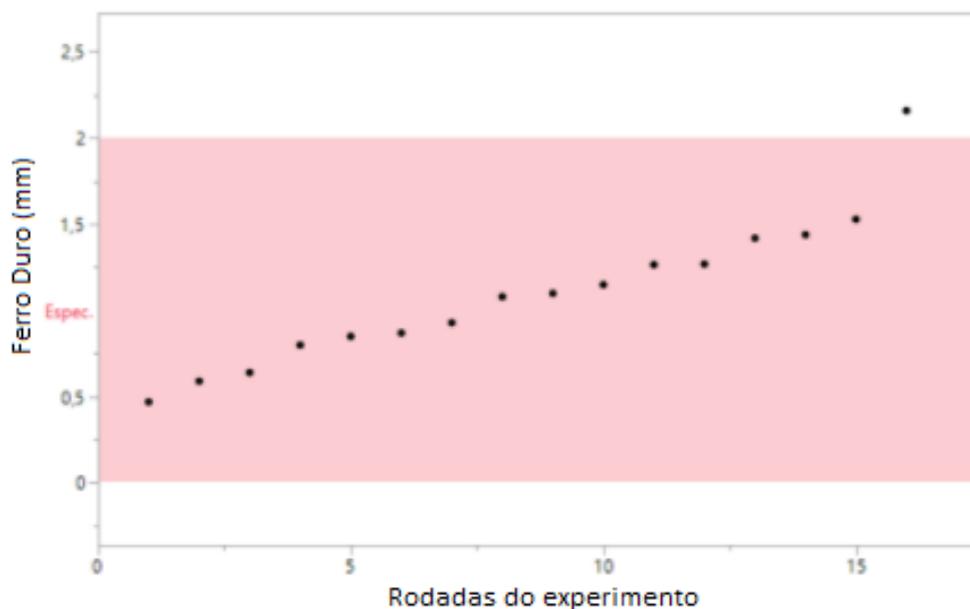


Fonte: O autor (2019).

É muito importante o conhecimento desta variável resposta, pois, para a realização da usinagem das peças é necessário que a matriz propicie a formação de grafitas, que facilitam a usinabilidade das peças. Já quando as peças têm uma alta profundidade de coquilhamento (maior percentual de ferro duro), há maior dificuldade de usinagem, pois há ausência de grafita e lubrificação das peças, influenciando diretamente na propriedade mecânica das mesmas.

O percentual de ferro duro em cada amostra pode ser visto no Gráfico 18, que apresenta em cada tratamento esta altura, bem como o limite de especificação definido para uma boa usinabilidade das peças. De acordo com o Gráfico 17, apenas uma das peças obteve um valor maior do que a especificação, ficando inviável sua usinabilidade.

Gráfico 17 – Quantidade de ferro duro em todas as rodadas dos experimentos.



Fonte: O autor (2019).

A influência de cada fator sobre a variável resposta pode ser vista no Apêndice B, Gráfico B18, onde a análise estatística realizada pelo software JMP (software de análise estatística) demonstra que o percentual de inoculação e a interação do fator adição de enxofre e composição química do inoculante foram os mais significativos para alteração na variável resposta. Não houveram causas especiais, ou seja, nenhuma das amostras destoou das demais sofrendo influência de fatores externos. O experimento gerou variação, pois, alguns tratamentos atenderam a especificação, mas alguns ficaram acima. Como o mínimo da especificação é zero, nenhum tratamento obteve valor negativo.

No Apêndice B (Gráficos B18 a B20) sabem-se quais os graus de liberdade com maior efeito sobre o ferro duro, mas não quer dizer que eles são realmente significativos. i) Gráfico normal plot, que indica quais são os graus de liberdade que realmente influenciam na variável resposta. iii) Sorted estimates que são as duas análises anteriores em conjunto. O fator que mais influenciou foi o percentual de inoculação e uma interação de Adição de enxofre com tipo de inoculante, como já era esperado de acordo com Nascimento (2016) e Guessser (2004) e conforme os resultados de dureza e resistência à tração. Conforme Guessser (2004), quando há a adição de estrôncio e enxofre na composição do inoculante, o percentual de ferro duro (altura de coquilhamento) é menor que 1 mm, confirmando os resultados dos experimentos realizados, que com esta composição obtiveram os menores valores de ferro duro.

5 CONCLUSÃO

O estudo foi realizado de acordo com a metodologia Six Sigma com utilização de experimentos planejados, com o objetivo de verificar quais as melhores condições para nucleação e obtenção das propriedades mecânicas e físicas do FC-200.

O primeiro experimento teve como premissa verificar a influência da granulometria e percentual de inoculação diretamente no jorro de metal líquido, em diferentes temperaturas para as respostas de quantidade de células eutéticas, dureza e altura de coquilhamento (ferro duro). Para a resposta de quantidade de células eutéticas foi verificado que quanto menor a espessura dos degraus menor o tamanho e maior a quantidade das mesmas, apresentando diferenças de estrutura e grau de nucleação, nas mesmas condições de vazamento, mas espessuras de peça diferentes. A quantidade de células eutéticas variou de 5 a 50 células eutéticas/mm², onde as maiores variações ocorreram nos degraus 3 e 4 com 20 a 50 células eutéticas/m². O experimento foi realizado em dias diferentes para verificar se algum fator externo influenciaria na variável resposta, porém o comportamento dos resultados foi o mesmo independente do dia. Para esta propriedade todos os fatores foram considerados críticos, onde a melhor condição foi verificada quando há uma maior nucleação (1,5 g/s), maior temperatura e menor granulometria do inoculante.

Na análise da altura de coquilhamento (ferro duro) a maior influência foi a granulometria do inoculante, atingindo de 0 a 1,8mm dependendo das condições do tratamento realizado. Isto se deve ao fato de que quanto maior o tamanho da partícula adicionada diretamente no jorro pior a dissolução deste inoculante e reação do mesmo, podendo causar inclusive inclusões do inoculante na peça fundida dependendo do tamanho da partícula.

Na avaliação da propriedade dureza Brinell foi verificado que o fator mais crítico foi uma interação entre percentual de adição de inoculante com granulometria do inoculante, seguindo a mesma resposta do ferro duro. A resposta de dureza variou de 150 HB à 212 HB no 3º degrau é de 162 HB à 229 HB no 4º degrau, esta variação é decorrente da espessura do material, pois, no 4º degrau (mais fino) há uma extração de calor maior e mais refinada é a estrutura do material.

Foi constatado através das análises que quanto menor a espessura do degrau maior a resposta de dureza, independente do tratamento, isto se deve ao fato da alteração das condições de resfriamento que ocorre em espessuras diferentes, fato que foi refletido também na quantidade de células eutéticas. Porque quanto menor o tamanho do degrau mais rápido ocorre

a solidificação, deixando o carbono ficar na matriz obtendo uma grafita mais refinada, de menor tamanho e matriz perlítica.

O segundo experimento foi realizado com base nos melhores resultados do primeiro, onde foi determinada uma granulometria específica para a inoculação diretamente na panela de vazamento. Os parâmetros analisados foram a composição química do inoculante (Fe-Si e Fe-Si-Sr), a quantidade de inoculante adicionada, a temperatura do metal e a adição de enxofre. Da mesma forma que no primeiro experimento, todos os ensaios foram realizados em corpos de prova escalonados, objetivando a análise dos resultados em diferentes espessuras das peças. As variáveis resposta verificadas foram a microestrutura das peças, resistência à tração, dureza, altura de coquilhamento, e a quantidade e distribuição microestrutural das células eutéticas em cada degrau do corpo de prova escalonado.

Na análise microestrutural foi verificada uma grande variação de estrutura dependendo do tratamento realizado, nos degraus 01 e 03 com 0,09% de inoculante (menor percentual) com composição de Fe-Si-Sr com a adição de 0,08% de enxofre já se obtém a grafita do tipo “A” bem distribuída em toda estrutura. Nos degraus 02 e 04 a estrutura requerida foi obtida apenas com 0,24% de inoculante com composição Fe-Si-Sr com a adição de 0,08% de enxofre.

O tratamento que obteve o maior número de células eutéticas foi utilizando 0,24% de inoculante, composição de Fe-Si-Sr e adição de enxofre, fato que pode ser explicado pela teoria dos óxidos-sulfetos. Isto porque quanto mais estável o substrato de nucleação maior é a formação de núcleos e mais alto o grau de nucleação do banho, sendo que o óxido de enxofre é um dos compostos que mais promove a formação de substratos de nucleação, pois, tem uma das menores energias livres facilitando a nucleação.

O menor resultado da propriedade dureza foi de 160 HB e obtido com 0,24% de inoculação, 0,08% de adição de enxofre e adição de estrôncio, se obtendo-se uma média de 182 HB, que é justificado pela matriz e quantidade de grafitas presentes neste tratamento. O tratamento que foi mais adequado ao FC-200 foi o de 0,09% de inoculação, com adição de enxofre e estrôncio. O fator mais significativo foi a interação entre percentual de adição e composição química do inoculante. Conforme a espessura do degrau existe a elevação do valor da dureza, decorrente da estrutura da matriz que varia com as condições de solidificação e resfriamento para cada espessura.

Para a propriedade de resistência à tração os maiores valores foram acima de 260 MPa e obtidos sem a adição de enxofre, com inoculante contendo estrôncio, independentemente da quantidade de inoculante adicionada. O único tratamento com estas características é com 0,09%

de adição de inoculante, com estrôncio e adição de enxofre na composição, mesmo resultado obtido para propriedade de dureza.

O controle da composição química da liga foi fundamental para correlacionar as propriedades obtidas em cada ensaio e tratamento, pois, de acordo com a teoria, há alteração da solidificação dependendo da composição do banho líquido.

A altura de coquilhamento também foi avaliada, obtendo como variáveis mais críticas a quantidade de inoculante adicionada e uma concentração de adição de enxofre com composição química do inoculante. O tratamento que obteve a menor altura de coquilhamento, máximo de 0,85mm foi plotado de forma estatística com base nos resultados dos demais experimentos, sendo definido com a adição de enxofre, 0,15% de inoculante, com adição de estrôncio e independente da temperatura de tratamento.

Com base na presente dissertação foi possível determinar que a condição foi obtida com o tratamento 0,09% de inoculação, com adição de enxofre e com inoculação de Fe-Si-Sr é a que utiliza a menor quantidade do inoculante e possui o melhor balanceamento em relação às propriedades físicas e mecânicas aos demais. Com estas condições a resistência à tração atinge até 240 MPa, uma dureza média de 200 HB, com uma estrutura predominantemente de grafita do tipo “A” e “D”, ferro duro (coquilhamento) abaixo de 0,85mm e acima de 50 células eutélicas/mm².

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de continuar o presente trabalho em outras direções e com aprofundamento mais específico, seguem as sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar experimentos planejados com teores crescentes de inoculante e percentual de enxofre para diferentes tipos de composição química de inoculante e determinar a influência dos mesmos sobre propriedades mecânicas e físicas do material;
- Realizar avaliação de um maior número de peças por tratamento, com o intuito de verificar a variação por amostragem;
- Estudar as variações da matriz do ferro fundido cinzento com a variação de fatores, como extração de calor e temperatura de tratamento.

7 REFERÊNCIAS

ALDERSON, A. **The Influence of manganese and sulfur on the structure and Mechanical Properties of gray cast iron.** Report No.1512, BCIRA J. 1983, pg. 59.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1382 – **Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis;**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 8/8M - **Ensaio de tração de materiais metálicos;**

ASM Metals Handbook, volume 15. **Casting.** 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 187-1/99 - **Materiais Metálicos - Dureza Brinell /Parte 1: Medição da Dureza Brinell.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892 - **Materiais Metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6849/1986 - **Ferro fundido cinzento - Determinação do número e tamanho das células eutéticas.**

BCRA Broadsheet. Properties and application of grey irons.

BISGAARD, S., FULLER, H., **Analysis of factorial experiments with defects or defectives as the response,** Quality quandaries, University of Wisconsin, 1995.

BOX, G., LIU, P., **Statistics as a Catalyst to Learning by Scientific Method Part I,** Journal of Quality Technology, 1998.

BRITISH CAST IRON RESEARCH ASSOCIATION (BCIRA), **Effects of cerium in nodular (SG) iron.** Broadsheet 211-6,1986.

CALLISTER, William D. **Fundamentals of materials Science and Engineering**. 2001.

CHAVES FILHO, LUIZ M.A. **Avaliação do comportamento de alguns inoculantes para ferros fundidos cinzentos**, SOCIESC.1981.

CZITROM, V. **One-Factor-at-a-Time Versus Designed Experiments**. Teacher's Gornel. 1997.

ELLIOT, R. **Cast Iron Technology**. 1 ed. Butterworths. 1988.

FULLER, A.G. **Fading of inoculants**, AFS Transactions, p 274-287, maio 1979.

Diego Ruben Martin¹; Joao Roberto Sartori Moreno¹; André de Albuquerque Vicente. **Effects of different inoculants on the microstructural characteristics of gray cast iron gg-25, hardness and useful life of tools**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, c2015. Disponível em <http://www.uem.br/acta> ISSN - Doi:10.4025/actascitechnol.v37i4.27460.

FROEHLICH, A.R.; WARMLING, G.; STROHAECKER, T. R. **Influência de número de células eutécticas sobre a tenacidade à fratura de ferros fundidos nodulares perlíticos**. In: CONGRESSO NACIONAL DE FUNDIÇÃO, 1997, São Paulo. ABIFA.p. 1-17. 1997.

FUOCO, R. **Defeitos de fundição**. Apresentação de curso de defeitos de fundição – Instituto de Pesquisas tecnológicas,2018.

FUOCO, R., CABEZAS, C.S. **Influence of Graphite/Austenite Interface on Formation of Ferrite or Pearlite in Cast Iron**. AFS Transactions 2004. American Foundry Society, Des Plaines IL USA.

FUOCO, R., CAVALCANTE, A.H, SANTOS, E.R. **Determinação do grau de nucleação de ferros fundidos cinzentos via análise térmica**. Congresso Nacional de Fundição, 2003.

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. Campinas: UNICAMP. 2002

GOODRICH, G.M., OAKWOOD, T.G., GUNDLACH, R.B. **Manganese, Sulfur and manganese-sulfur Ratio Effects in Gray cast iron.** AFS TRansactions. 2003. American Foundry Society, Des Plaines IL USA.

GRASSMUECK, André. **Estudo da influência da inoculação no controle e definição da camada coquilhada aplicada a tuchos de válvula para motores à combustão.** .2009.60f. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Materiais, 2009.

GUESSER, Wilson L e KUHL, R. **Ferros fundidos maleáveis.** SOCIESC, 1984.

GUESSER, Wilson L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos.** 2009.

GUESSER, Wilson L e KUHL, R. **Constituição dos Ferros Fundidos Cinzentos.** SOCIESC, 2003.

GUESSER, Wilson L e KUHL, R. **Forno Cubilô.** SOCIESC, 2004.

ISO 185 – **Grey Cast Irons - Classification.**

JUNIOR, Amir Rivaroli. **Influência dos elementos de liga nos parâmetros de processo de fundição de ferros fundidos especiais.** .2014.124f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

KANNO, T. **Effect of alloying elements on eutecic temperatures in cst iron.** AFS Transactions. V.113, p.1-9, 2005.

LECO CORPORATION. **Manual de instruções do determinador de carbono/enxofre CS230.** St. Joseph: 2007.

LENTH, RUSSELL V. **Quick and Easy Analysis of Unreplicated Factorials.** 1989.

LERNER, Y. **Inoculação em Ferro Fundido.** Modern Casting. Junho, 1999.

LOPER JR, CARL R. **Como os inoculantes atuam sobre a microestrutura dos Ferros fundidos**. Revista Fundação e serviços. São Paulo março 1998.

MASON, R. L., GUNST, R. F., and HESS, J. L. **Statistical Design & Analysis of Experiments**. New York: Wiley. 1989.

MORROGH, H; The solidification of cast iron and interpretation of results obtained from chilled test pieces. The British Froundryman,v.53,p.221-242,1960.

NASCIMENTO, D., SANTANA, P.I. **Ferros Fundidos Cinzento e Branco**. UNISOCIESC. 2016.

PIESKE, A et all. Metalurgia dos ferros fundidos cinzento e nodular, Joinville, 1985..

PIESKE, A.; SUGIYAMA, N.; OLIVEIRA, P.F.A.; SANTOS, A.B.S. **Efeitos de bismuto na quantidade de carbonetos e no número de nódulos de grafita em ferro fundido nodular**. Metalurgia, São Paulo, v. 30, n. 198, p. 321-327, maio. 1974.

PIESKE, A., FILHO, L.M.C., REIMER, J.F. **Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade**. SOCIESC, 1975.

POZZI, Ricardo José. **Estudo comparativo de dois inoculantes em ferro nodular ferrítico**. 2009. Dissertação (Mestrado) - INSTITUTO SUPERIOR TUPY,2009.

POWELL, J., SHERWOOD, R.E. **Getting Back to basics – The Why, What, When e How of inoculation**. The castings Development centre, England B48 7QB. 1977.

SANTOS, A.B.S Efeitos de algumas variáveis na inoculação dos ferros fundidos. São Paulo: IPT, 1989.

RIPOSAN, I., CHISAMERA, M., STAN, S., *et al.* “**A New Approach to Graphite Nucleation Mechanism in Gray Irons**”, In: Proceedings of the AFS Cast Iron Inoculation Conference, pp. 31-42, 2005.

SANTOS, A.B.S; CASTELO BRANCO, C.H. **Metalurgia dos Ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo: IPT, 1991.

SANTOS, A.B.S Microestruturas de ferros fundidos nodulares esfriados lentamente, São Paulo USP, 1976.

SANTOS, A.B.S., MERY, R., SILVA. **Alguns efeitos de manganês e enxofre em ferros fundidos cinzentos**. Trabalho a se apresentado no 56º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 16 a 20 de julho de 2001, Belo Horizonte (MG).

SENAI, Departamento Regional de Minas Gerais. **Ferros fundidos de grafita lamelar**. 2a ed. Belo Horizonte: Senai-Mg, 1987. 2v.

SOUZA SANTOS, A.B., CASTELLO BRANCO, C.H. **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares**. IPT, 1977.

STUEWE, Luciana. **Avaliação da influência do cromo e molibdênio na solidificação e formação de rechupes em ferro fundido cinzento**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo, 2008.

WENDONG, Xue; YAN, Li. **Pretreatments of gray cast iron with diferente inoculants**. Beijing, China: University of Science and Technology Beijing, 2016. Disponível em Journal of Allys and Compounds 689 (2016) 408-415.

GUIQUAN, Wang; XIANG, Chen; YANXIANG, Li and ZHONGLI, Liu. **Effects of Inoculation on the Pearlitic Gray Cast Iron with High Thermal Conductivity and Tensile Strength**. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Disponível em Materials 2018, 11, 1876; doi:10.3390/ma11101876.

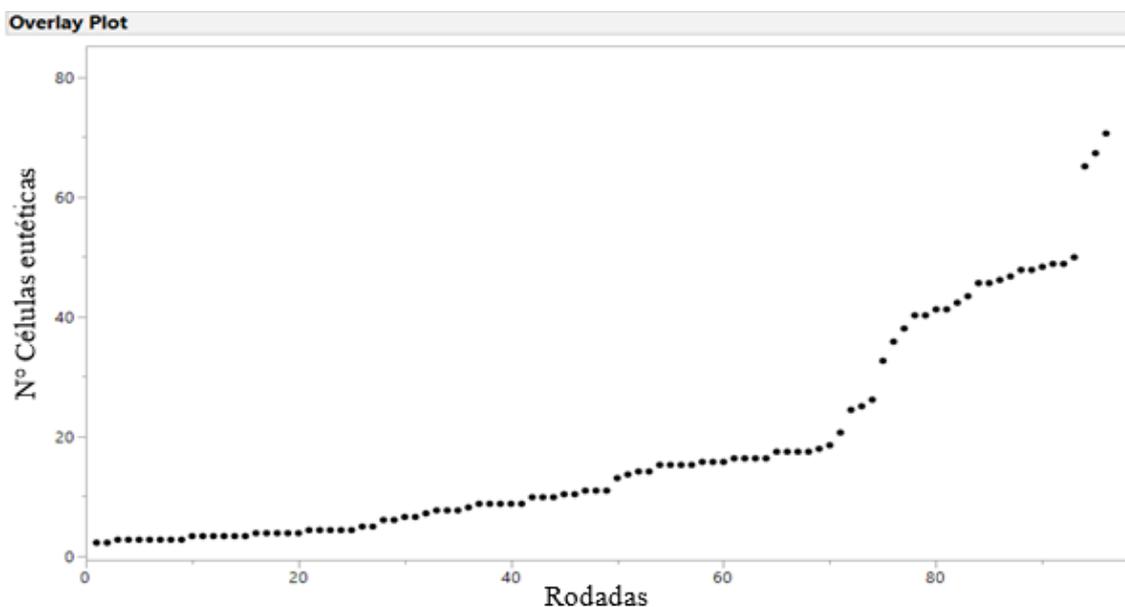
8 APÊNDICE A

Para análise de DOE'S é comumente utilizada a regra de Ross, com o objetivo de evitar interpretações incorretas sobre os dados. Desta forma esta análise deve seguir uma sequência de três etapas: análise prática (Overley Plot), análise gráfica (Pareto Plot of Estimates, o Normal Plot e o Sorted Parameter Estimates) e análise quantitativa (Prediction Profiler) (BISGAARD, 1995).

Assim no presente trabalho tanto os resultados do primeiro experimento quanto do segundo foram analisados seguindo a regra de Ross e dispondo de todos os gráficos citados. No Apêndice A são apresentados os resultados do primeiro experimento realizado neste trabalho, sendo avaliada a quantidade de células eutéticas, ferro duro (coquilhamento) e dureza nos degraus 3 e 4, pois, foram os únicos degraus que apresentaram grande variação nestas propriedades.

A análise prática é a primeira etapa para análise dos dados e qualifica os mesmos para dar prosseguimento as etapas posteriores.

Gráfico A1 – Medida do número de células eutéticas em todas as condições propostas no primeiro experimento.



Fonte: O autor (2019).

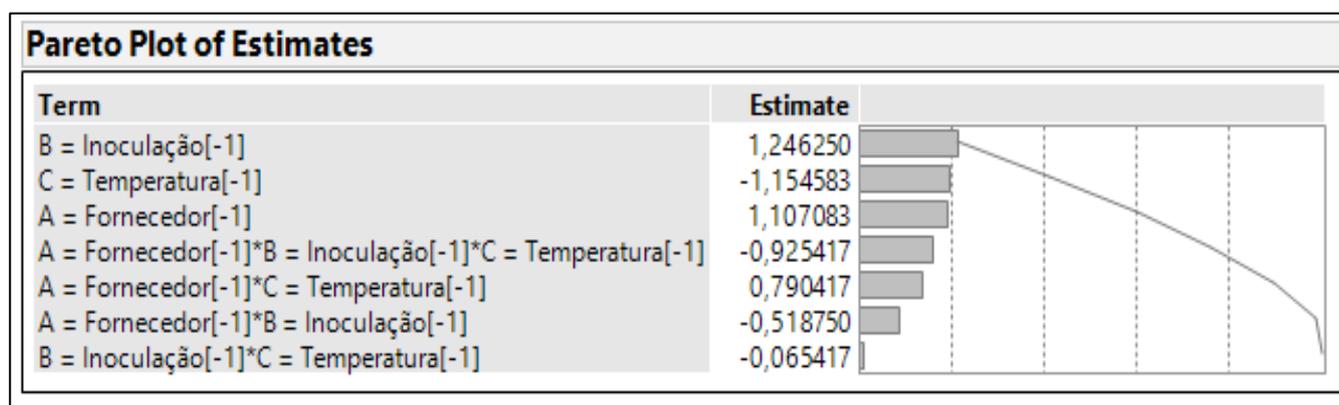
O Gráfico A1 mostra o número de células eutéticas em cada rodada do experimento, estando em torno de 20% das amostras com mais de 40 células eutéticas/mm² e as demais com resultado inferior a esta linha de corte. Foi possível observar através da análise estatística as seguintes características sobre o experimento realizado:

- Não houve causas especiais, conforme se pode observar no “overlay plot”.
- O experimento gerou variação, pois, mesmo não tendo uma meta específica, a quantidade de células eutéticas variou de 0 a 80 células/mm².
- Levando em consideração o melhor tratamento, que possui de 20-50 células eutéticas, foi possível perceber que ocorreram valores abaixo e acima, atendendo o especificado.

Seguindo a análise de dados conforme a regra de Ross, a próxima etapa é a análise gráfica onde se busca os fatores ou interações mais significativas para o experimento realizado. Nesta etapa utilizam-se os gráficos Pareto Plot of Estimates, o Normal Plot e o Sorted Parameter Estimates, os quais são analisados via software JMP (Software de análise estatística).

O gráfico Pareto plot apresenta em ordem quais são os graus de liberdade com maior efeito na variável resposta, sendo que todos possuem um número na coluna "estimates" (Estimates = efeito do GL/2). Desta forma o efeito do grau de liberdade na variável resposta Y é igual a duas vezes o valor encontrado no Pareto e caso este valor seja negativo, o efeito é de diminuir os resultados da variável resposta (BOX, 1998).

Gráfico A2 – Gráfico Pareto Plot para a quantidade de células eutéticas – 3° Degrau.

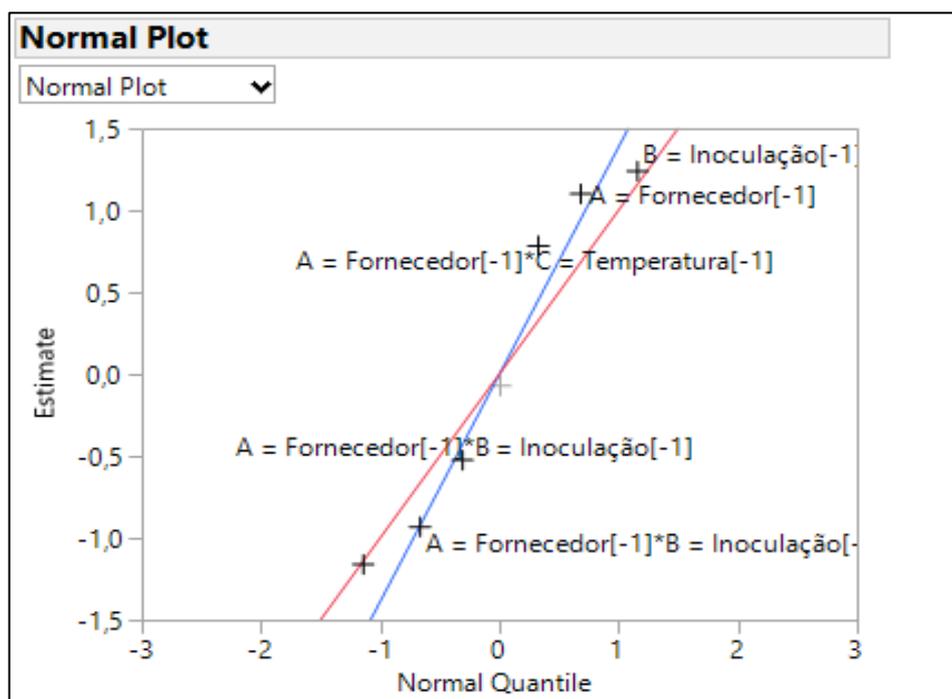


Fonte: O autor (2019).

Desta forma se pode concluir que, para a resposta quantidade de células eutéticas (Gráfico A2), os fatores mais significativos são: inoculação (quanto maior este fator maior a quantidade de células eutéticas), Temperatura (quanto menor este fator maior a quantidade de células eutéticas) e granulometria (quanto maior este fator maior a quantidade de células eutéticas).

Para analisar quais são os graus de liberdade com maior efeito sobre o Y, é construído um gráfico Normal Plot, que indica quais são os graus de liberdade que estatisticamente impactam na variável resposta (LENTH, 1989).

Gráfico A3 – Gráfico Normal Plot demonstrando os fatores mais críticos a resposta de quantidade de células eutéticas – 3º Degrau.



Fonte: O autor (2019).

No Gráfico A3 todos os fatores e interações aparecem significativos, não podendo definir um fator que influenciou significativamente na variável resposta para este degrau, obtendo o mesmo resultado que no Gráfico A2.

Para verificar a significância estatística dos graus de liberdade, utiliza-se o gráfico Sorted Parameter Estimate no JMP (Software de análise estatística), Gráfico A4, observando o p-value de cada grau de liberdade e assim verificando quais são estatisticamente significativos.

O p-Value de cada grau de liberdade representa quão estatisticamente significativo são os fatores manipulados no experimento. Quanto menor é esse valor, maior a probabilidade de o resultado do experimento ter sido alterado por este fator, sendo a linha de corte considerada pelo software JMP (Software de análise estatística) do p-Value igual a 0,20 (BISGAARD, 1995).

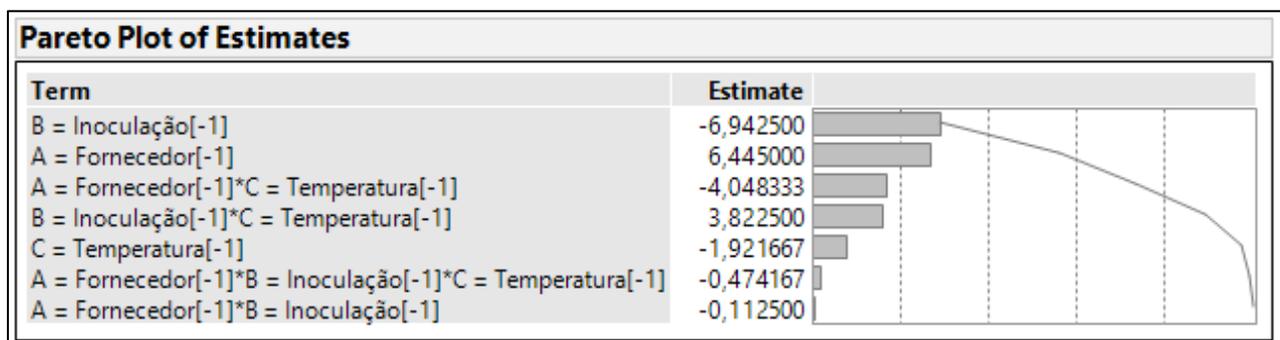
Gráfico A4 – Fatores mais significativos para quantidade de células eutéticas – 3º Degrau.

Sorted Parameter Estimates					
Term	Estimate	Std Error	t Ratio		Prob> t
B = Inoculação[-1]	1,24625	0,256932	4,85		0,0002*
C = Temperatura[-1]	-1,154583	0,256932	-4,49		0,0004*
A = Fornecedor[-1]	1,1070833	0,256932	4,31		0,0005*
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	-0,925417	0,256932	-3,60		0,0024*
A = Fornecedor[-1]*C = Temperatura[-1]	0,7904167	0,256932	3,08		0,0072*
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]	-0,51875	0,256932	-2,02		0,0606
B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	-0,065417	0,256932	-0,25		0,8023

Fonte: O autor (2019).

Da mesma forma que nos Gráficos A2 e A3, no Gráfico A4 todos os fatores foram considerados significativos, ou seja, não há nenhum fator que possa ser considerado como principal para o aumento ou diminuição da variável resposta.

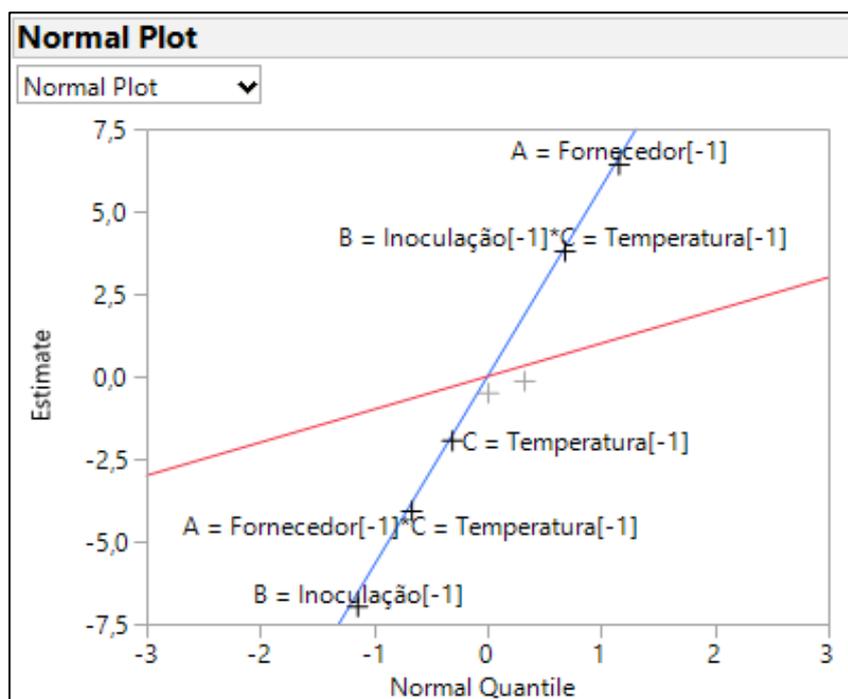
Gráfico A5 – Gráfico Pareto Plot para a quantidade de células eutéticas – 4º Degrau.



Fonte: O autor (2019).

No 4º degrau foi considerado como críticos quase todos os fatores, Gráfico A5, assim como no 3ºdegrau, Gráfico A2. Sendo os principais Inoculação, Temperatura e granulometria. Além destas, também as interações de Inoculação x Temperatura e Granulometria x Temperatura.

Gráfico A6 – Gráfico Normal Plot demonstrando os fatores mais críticos para resposta de quantidade de células eutéticas – 4º Degrau.



Fonte: O autor (2019).

O Gráfico A6 demonstra os fatores mais significativos para alteração no número de células eutéticas no 4º grau. Porém, assim como no Gráfico A5, não houve fator de destaque que possa ser considerado o principal fator para a alteração da variável resposta.

Gráfico A7 – Gráfico Sorted Parameter Estimates para a quantidade de células eutéticas – 4º Degrau.

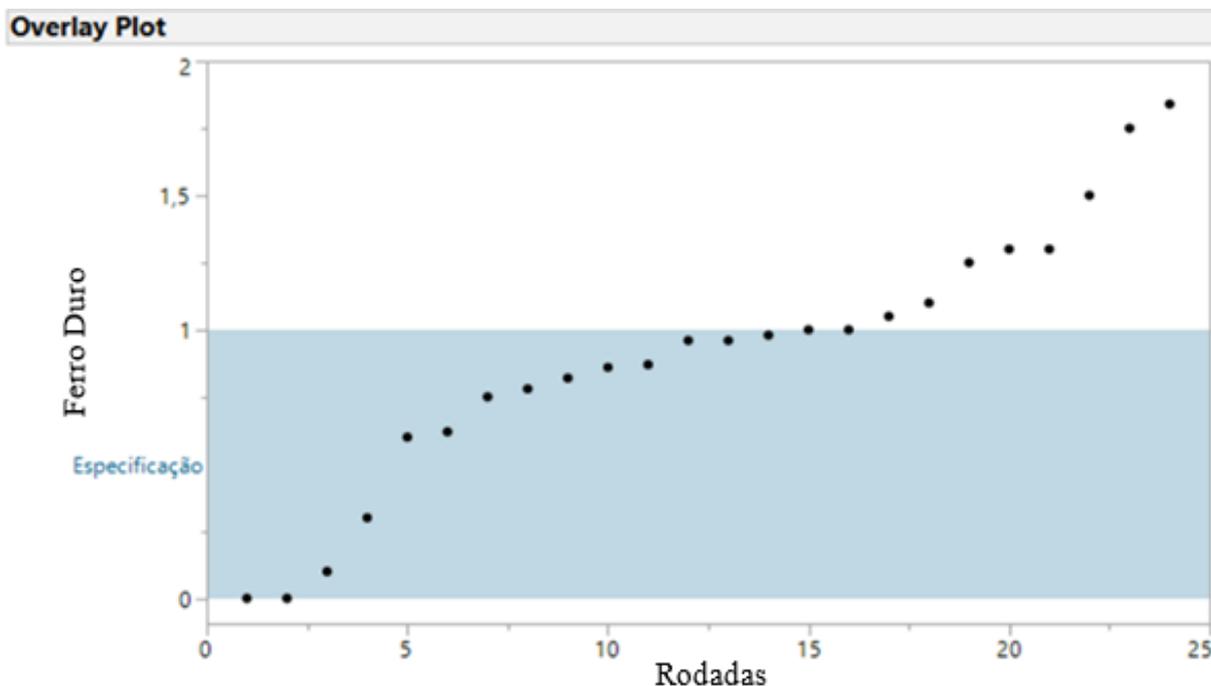
Sorted Parameter Estimates					
Term	Estimate	Std Error	t Ratio		Prob> t
B = Inoculação[-1]	-6,9425	0,359522	-19,31		<,0001*
A = Fornecedor[-1]	6,445	0,359522	17,93		<,0001*
A = Fornecedor[-1]*C = Temperatura[-1]	-4,048333	0,359522	-11,26		<,0001*
B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	3,8225	0,359522	10,63		<,0001*
C = Temperatura[-1]	-1,921667	0,359522	-5,35		<,0001*
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	-0,474167	0,359522	-1,32		0,2058
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]	-0,1125	0,359522	-0,31		0,7584

Fonte: O autor (2019).

Similarmente ao 3º grau, o Gráfico A7 demonstra os fatores mais significativos para o 4º grau, onde todas as variáveis são consideradas críticas, não havendo uma variável que possa ser destacada como mais importante.

A conclusão para o coquilhamento, chamado neste experimento de ferro duro, é que todas as teorias citadas na seção 2.10 foram confirmadas para resposta no degrau 5, onde os mesmos foram analisados.

Gráfico A8 – Medida de ferro duro nas rodadas de experimento.

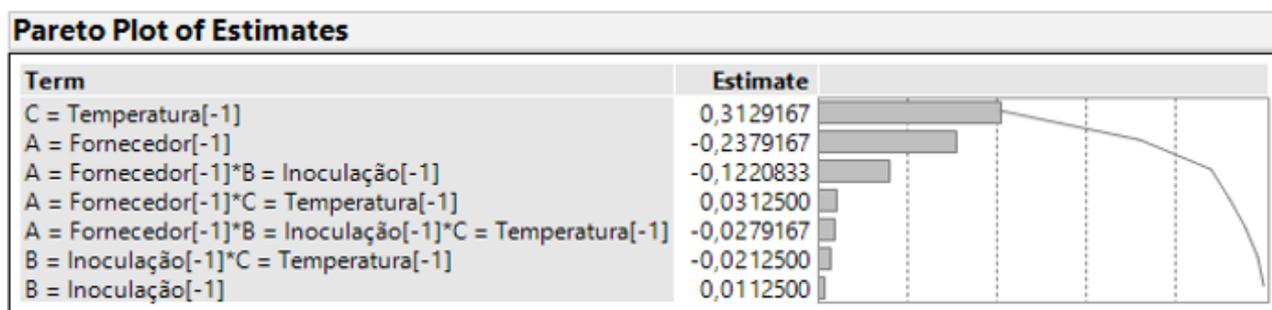


Fonte: O autor (2019).

Com base no Gráfico A8 foi possível observar as seguintes características sobre o experimento realizado para resposta de ferro duro:

- Não houve causas especiais, conforme se pode observar no overlay plot (Gráfico A8).
- O experimento gerou variação, pois, alguns tratamentos atenderam a especificação, mas alguns ficaram acima. Como o mínimo da especificação é zero, nenhum tratamento obteve valor negativo.
- Levando em consideração o especificado, o objetivo foi atingido, tendo a maior parte dos tratamentos dentro do especificado.

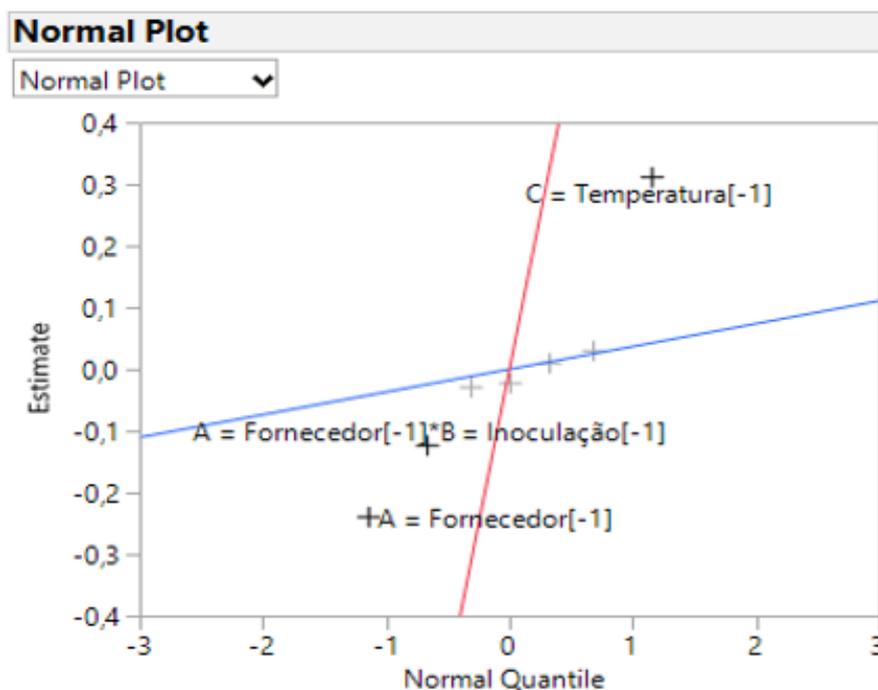
Gráfico A9 – Fatores mais significativos para ocorrência do ferro duro em ordem de significância.



Fonte: O autor (2019).

O Gráfico A9 demonstra que para resposta do ferro duro (coquilhamento), os fatores temperatura de vazamento e granulometria são os mais significativos para a ocorrência do defeito, sendo desta forma a principal causa raiz para ocorrência do defeito, ou seja, os maiores valores na coluna Estimate.

Gráfico A10 – Gráfico Normal Plot demonstrando os fatores mais críticos a quantidade de ferro duro.



Fonte: O autor (2019).

O Gráfico A10 descreve os graus de liberdade com maior significância para alteração na variável resposta ferro duro (coquilhamento), sendo os fatores mais significativos Temperatura, granulometria e uma interação de Granulometria x Inoculação assim como pode ser verificado no Gráfico A9.

Gráfico A11 – Gráfico Sorted Parameter Estimates para a resposta de ferro duro (coquilhamento).

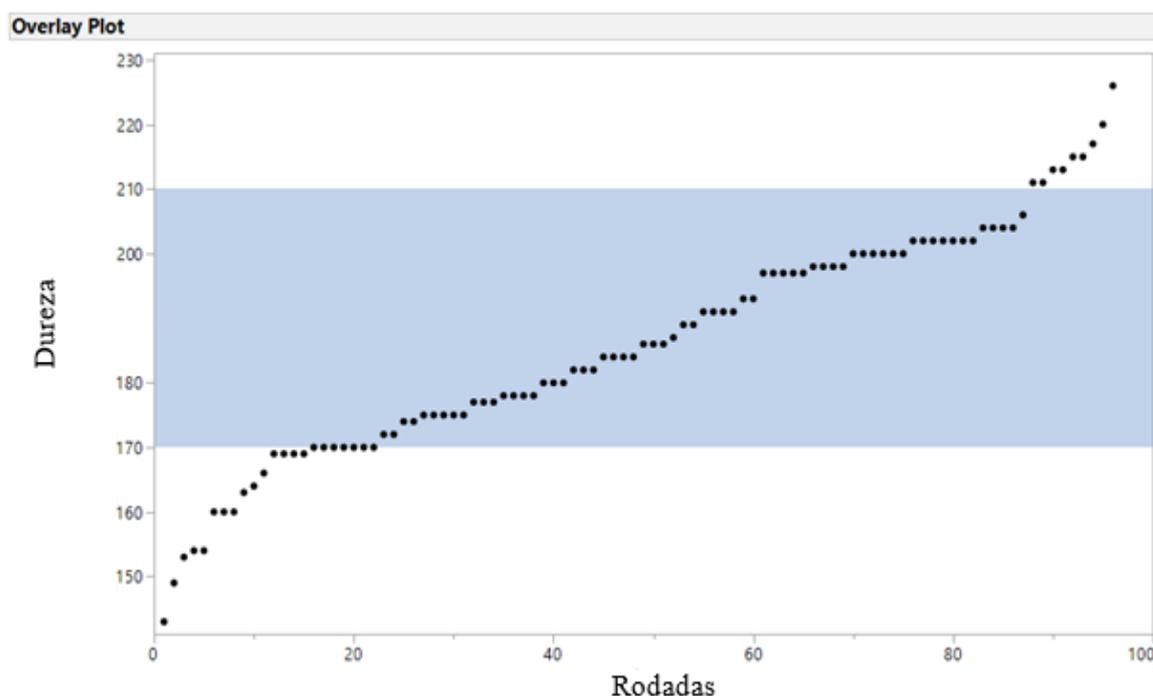
Sorted Parameter Estimates					
Term	Estimate	Std Error	t Ratio		Prob> t
C = Temperatura[-1]	0,3129167	0,056281	5,56		<,0001*
A = Fornecedor[-1]	-0,237917	0,056281	-4,23		0,0006*
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]	-0,122083	0,056281	-2,17		0,0455*
A = Fornecedor[-1]*C = Temperatura[-1]	0,03125	0,056281	0,56		0,5864
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	-0,027917	0,056281	-0,50		0,6266
B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	-0,02125	0,056281	-0,38		0,7107
B = Inoculação[-1]	0,01125	0,056281	0,20		0,8441

Fonte: O autor (2019).

No Gráfico A11 os fatores mais significativos são Temperatura, Granulometria e uma interação de Granulometria x Inoculação, assim como foi verificado nos Gráficos A9 e A10.

Para medida de dureza, o Gráfico A12 apresenta a análise prática da primeira etapa para análise dos dados e qualifica os mesmos para dar prosseguimento as etapas posteriores.

Gráfico A12 – Medida de Dureza em todas as condições propostas no experimento.

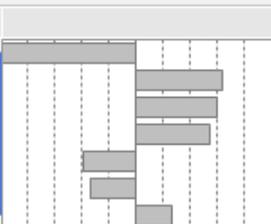


Fonte: O autor (2019).

Com base na análise do Gráfico A12, pode-se afirmar que:

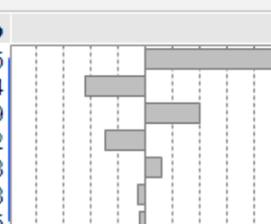
- Não houve causas especiais, conforme se pode observar no “overlay plot”.
- O experimento gerou variação, pois foram obtidos valores tanto no range da especificação quanto fora.
- Levando em consideração o especificado, o objetivo foi atingido, tendo a maior parte dos tratamentos dentro do especificado.

Gráfico A13 – Fatores mais significativos para medida de Dureza – 3° Degrau.

Sorted Parameter Estimates					
Term	Estimate	Std Error	t Ratio		Prob> t
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	-3,541667	3,168859	-1,12		0,2802
C = Temperatura[-1]	2,2916667	3,168859	0,72		0,4800
A = Fornecedor[-1]	2,125	3,168859	0,67		0,5120
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]	1,9583333	3,168859	0,62		0,5453
A = Fornecedor[-1]*C = Temperatura[-1]	-1,375	3,168859	-0,43		0,6701
B = Inoculação[-1]	-1,208333	3,168859	-0,38		0,7080
B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	0,9583333	3,168859	0,30		0,7662

Fonte: O autor (2019).

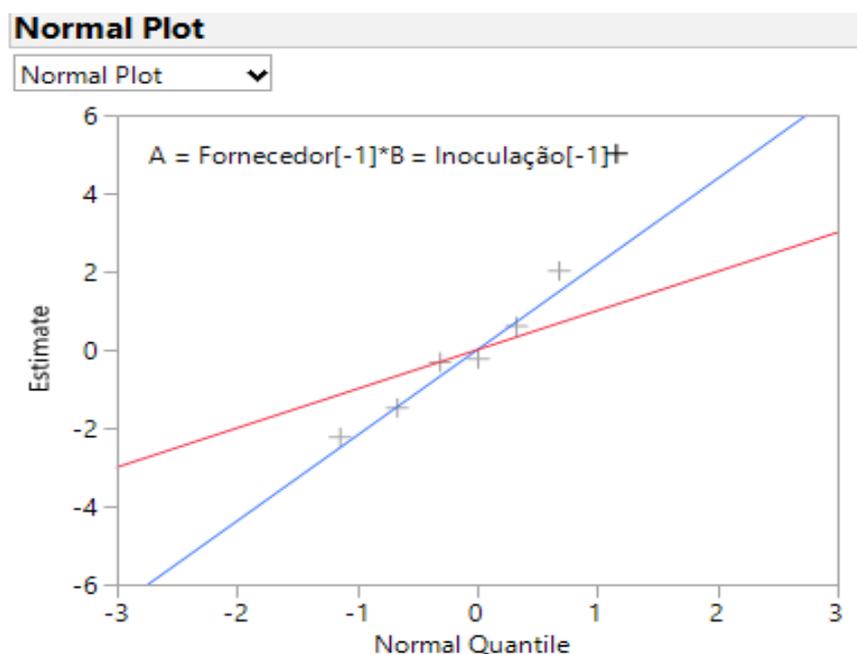
Gráfico A14 – Fatores mais significativos para medida de Dureza – 4° Degrau.

Sorted Parameter Estimates					
Term	Estimate	Std Error	t Ratio		Prob> t
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]	5,0416667	3,447523	1,46		0,1630
A = Fornecedor[-1]	-2,208333	3,447523	-0,64		0,5309
B = Inoculação[-1]	2,0416667	3,447523	0,59		0,5620
C = Temperatura[-1]	-1,458333	3,447523	-0,42		0,6779
A = Fornecedor[-1]*B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	0,625	3,447523	0,18		0,8584
A = Fornecedor[-1]*C = Temperatura[-1]	-0,291667	3,447523	-0,08		0,9336
B = Inoculação[-1]*C = Temperatura[-1]	-0,208333	3,447523	-0,06		0,9526

Fonte: O autor (2019).

No Gráfico A13, 3° degrau, o fator que mais influencia é uma interação entre Granulometria do inoculante (Granulometria) e Inoculação, sendo considerado mesmo tendo um pValue superior a 0,20, pois o mesmo é um valor muito menor que o segundo fator, que é de 0,48. O mesmo comportamento pode ser visto no Gráfico A14, que corresponde ao 4° degrau com um valor inferior a 0,20, sendo mais crítica esta interação em uma espessura menor.

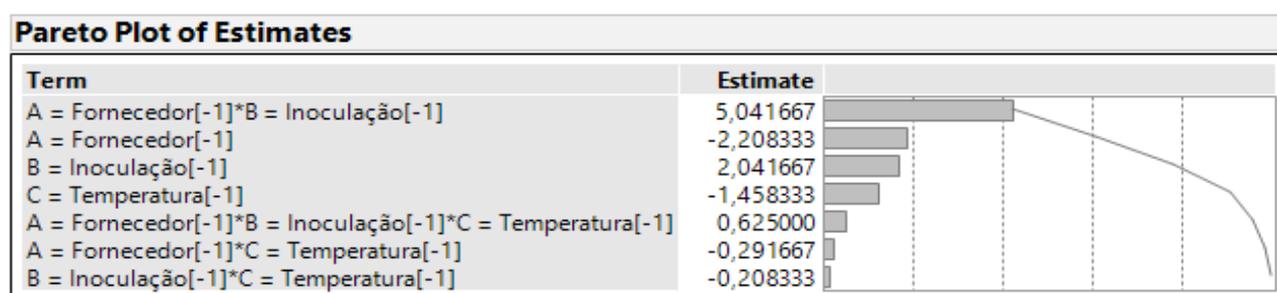
Gráfico A15 – Gráfico Normal Plot demonstrando os fatores mais críticos a medida de dureza – 4° Degrau.



Fonte: O autor (2019).

O Gráfico A15 apresenta graficamente o que foi verificado nos gráficos anteriores, demonstrando que a interação entre granulometria e percentual de inoculação são os fatores mais significativos para o aumento da propriedade mecânica de Dureza. Assim, quanto menor a granulometria menor a dureza, e quanto menor a inoculação maior o valor de dureza, conforme gráfico Pareto plot (Gráfico A16), que apresenta em ordem quais são os graus de liberdade com maior efeito na variável resposta, sendo que todos possuem um número na coluna "estimates", sendo a interação entre granulometria e inoculação, confirmando o resultado dos Gráficos A13, A14 e A15.

Gráfico A16 – Fatores mais significativos para medida de Dureza em ordem de significancia.

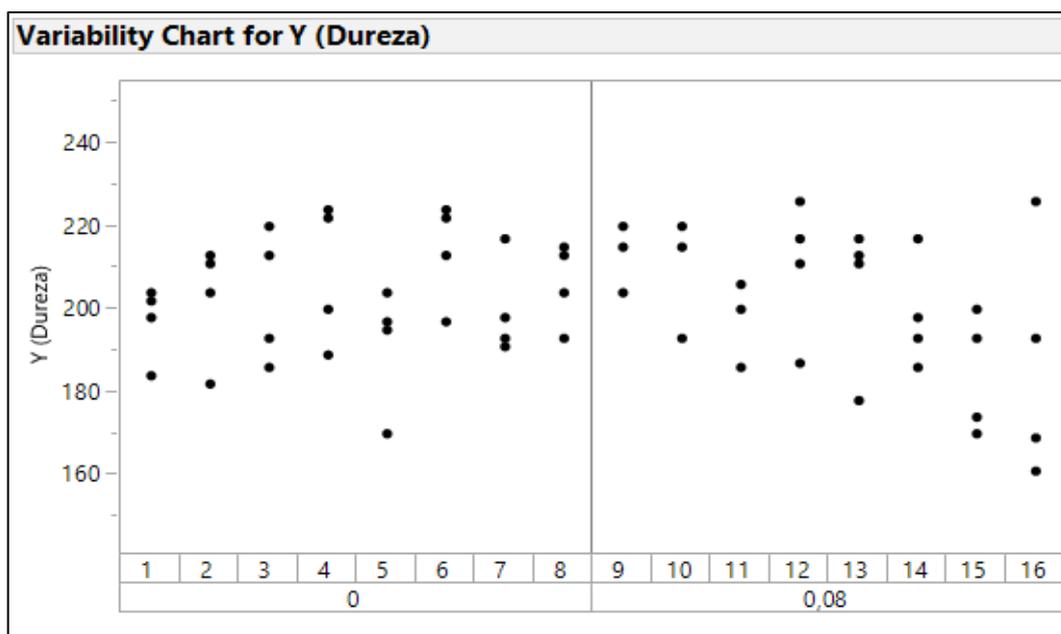


Fonte: O autor (2019).

9 APÊNDICE B

O Gráfico B1 apresenta as amostras de todos os tratamentos em ordem crescente de dureza HB, bem como a definição do limite de especificação onde há tratamentos com amostras acima e abaixo do especificado, mas a maior parte das amostras atende a especificação.

Gráfico B1 – Medida de Dureza em função da quantidade de enxofre adicionada.



Fonte: O autor (2019).

O Gráfico B2 apresenta as medidas de dureza de acordo com a quantidade de enxofre adicionada, onde se observa uma grande dispersão de valores entre as amostras, desta forma não dependendo somente da adição de enxofre, mas também do tipo de inoculante usado.

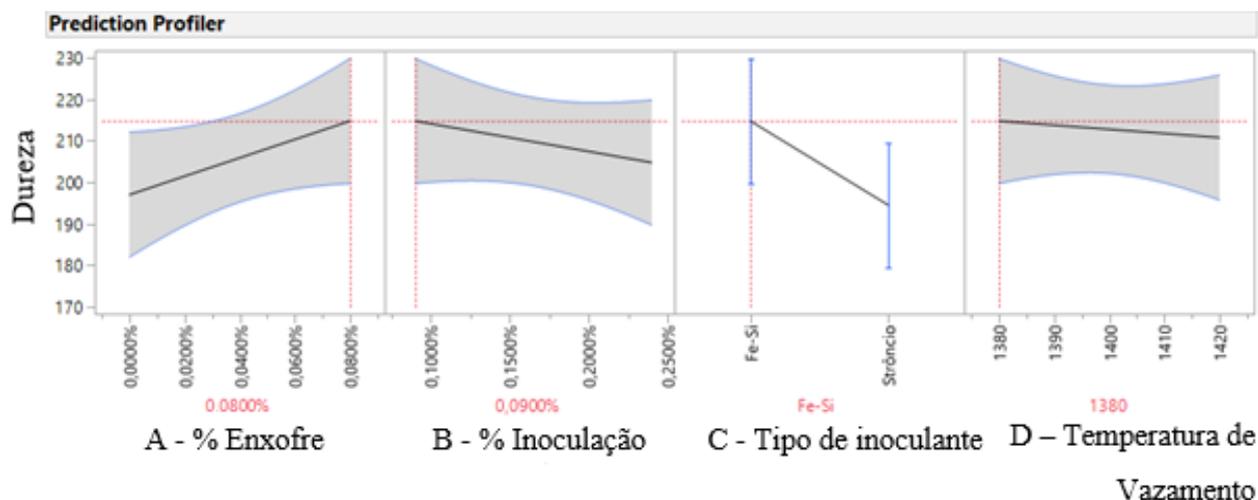
Gráfico B2 – Fatores mais significativos para dureza.

Response Y (Dureza)				
Sorted Parameter Estimates				
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t
(A - % Adição de Enxofre-0,0004)*C - Tipo de Inoculante (CQ)[Fe-Si]	10195,312	4683,755	2,18	0,0345*
(A - % Adição de Enxofre-0,0004)*(B - % Inoculação-0,00165)	-11614583	6245007	-1,86	0,0690
B - % Inoculação	-4604,167	2498,003	-1,84	0,0715
D - Temperatura de Vazamento (*C)	0,1523438	0,093675	1,63	0,1104
(A - % Adição de Enxofre-0,0004)*C - Tipo de Inoculante (CQ)[Fe-Si]*(D - Temperatura de Vazamento (*C)-1400)	-349,6094	234,1878	-1,49	0,1420
C - Tipo de Inoculante (CQ)[Fe-Si]	2,484375	1,873502	1,33	0,1911
(A - % Adição de Enxofre-0,0004)*(B - % Inoculação-0,00165)*(D - Temperatura de Vazamento (*C)-1400)	-341145,8	3122503	-1,09	0,2800
(A - % Adição de Enxofre-0,0004)*(D - Temperatura de Vazamento (*C)-1400)	-248,0469	234,1878	-1,06	0,2948
(B - % Inoculação-0,00165)*C - Tipo de Inoculante (CQ)[Fe-Si]*(D - Temperatura de Vazamento (*C)-1400)	111,45833	124,9001	0,89	0,3766
(B - % Inoculação-0,00165)*C - Tipo de Inoculante (CQ)[Fe-Si]	1895,8333	2498,003	0,76	0,4516
A - % Adição de Enxofre	-2773,437	4683,755	-0,59	0,5565
C - Tipo de Inoculante (CQ)[Fe-Si]*(D - Temperatura de Vazamento (*C)-1400)	-0,041406	0,093675	-0,44	0,6605
(A - % Adição de Enxofre-0,0004)*(B - % Inoculação-0,00165)*C - Tipo de Inoculante (CQ)[Fe-Si]*(D - Temperatura de Vazamento (*C)-1400)	-59895,83	3122503	-0,19	0,8487
(B - % Inoculação-0,00165)*(D - Temperatura de Vazamento (*C)-1400)	11,458333	124,9001	0,09	0,9273
(A - % Adição de Enxofre-0,0004)*(B - % Inoculação-0,00165)*C - Tipo de Inoculante (CQ)[Fe-Si]	-156250	6245007	-0,03	0,9801

Fonte: O autor (2019).

O Gráfico B2 demonstra que o fator mais significativo é a interação entre o percentual de adição do enxofre com o tipo de inoculante adicionado.

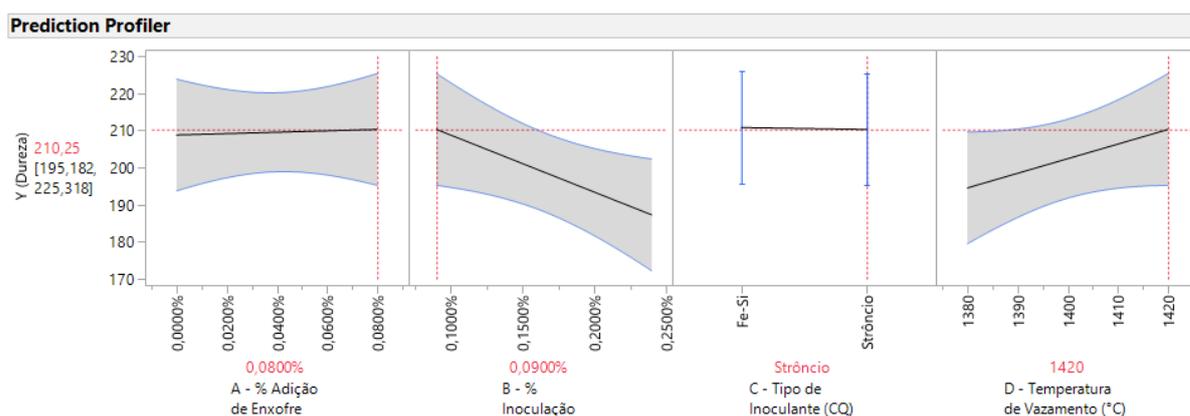
Gráfico B3 – Comportamento de cada fator sobre a variável resposta de dureza.



Fonte: O autor (2019).

O Gráfico B3 mostra o comportamento de cada fator sobre a variável resposta, que é a dureza, no qual o maior valor de dureza foi encontrado com a adição de enxofre, 0,09% de inoculação, temperatura baixa (1380 °C), e com a composição química de Fe-Si do inoculante.

Gráfico B4 – Comportamento de cada fator sobre a variável resposta de dureza, com estrôncio e temperatura alta.

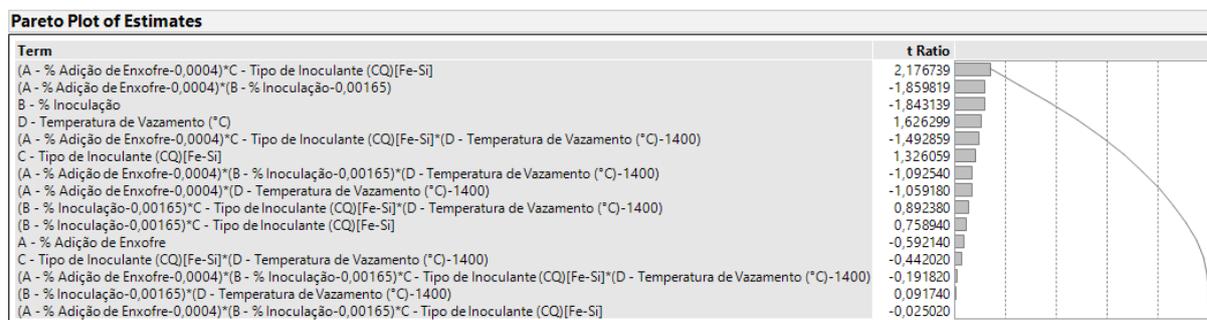


Fonte: O autor (2019)

O Gráfico 32 apresenta um comportamento contrário, onde o menor valor de dureza é encontrado com a adição de enxofre, 0,24% de inoculação, temperatura baixa (1380 °C) e com a composição química de Fe-Si-Sr do inoculante.

O Gráfico B5 mostra todos os fatores e interações que são significativos para resposta de dureza, onde confirma as afirmativas feitas no escopo do trabalho.

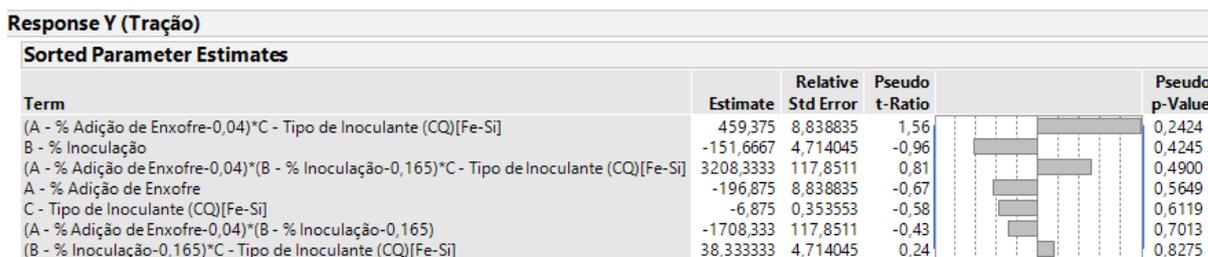
Gráfico B5 – Fatores mais significativos para dureza em ordem crescente.



Fonte: O autor (2019).

No gráfico B6 é apresentado, em ordem decrescente, o fator mais significativo para o menos significativo, sendo verificado que a interação de % de adição de enxofre com tipo de inoculante são os fatores mais significativos para o aumento da resistência à tração.

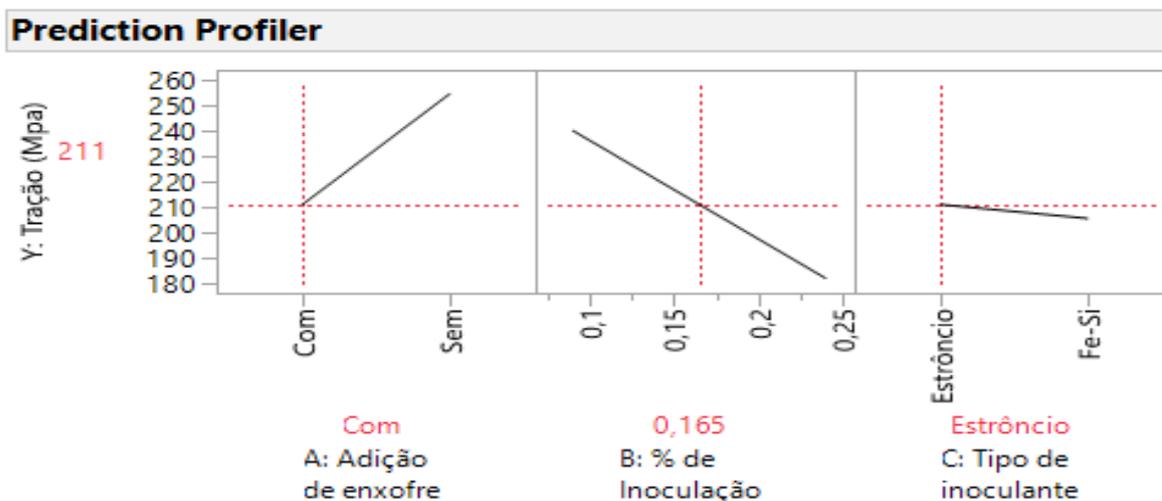
Gráfico B6 – Fatores mais significativos para resistência à tração.



Fonte: O autor (2019).

No gráfico B7 pode ser verificado o comportamento de cada fator sobre a variável resposta, sendo que para obtenção de uma resistência à tração de 211 MPa foi necessário a adição de enxofre (0,04%) e a utilização de Fe-Si-Sr.

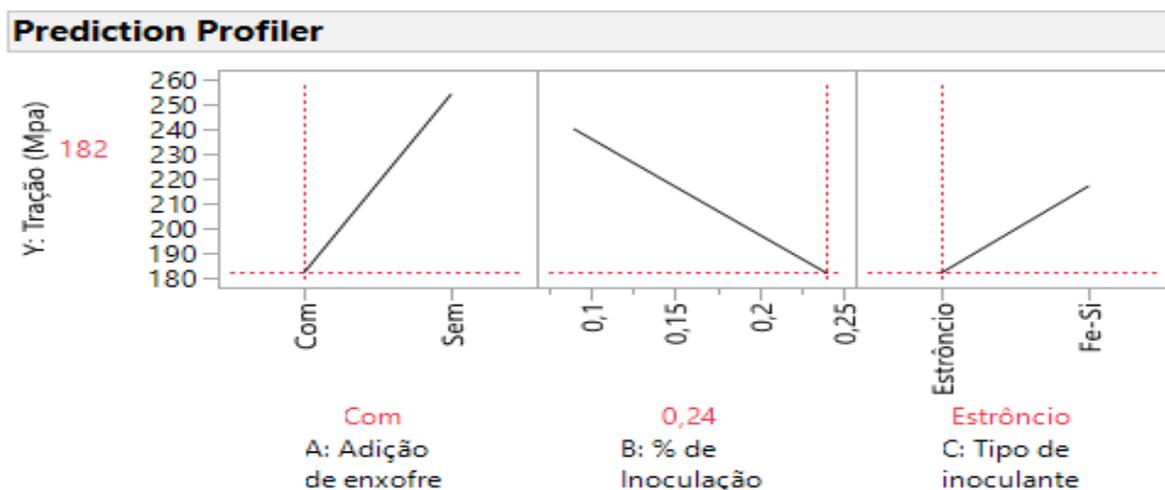
Gráfico B7 – Comportamento de cada fator sobre a variável resposta de resistência à tração, com adição de enxofre, 0,165% de inoculação e Estrôncio.



Fonte: O autor (2019).

No Gráfico B8 está descrita a combinação com as piores propriedades mecânicas, onde foi adicionado 0,08% de enxofre, 0,24% de inoculação e Fe-Si-Sr e, contrariamente, onde ocorrem as melhores propriedades físicas e estruturais das peças.

Gráfico B8 – Comportamento de cada fator sobre a variável resposta de resistência à tração, com adição de enxofre, 0,24% de inoculação e Estrôncio.



Fonte: O autor (2019).

No Gráfico B9, há a previsão estatística da resistência a tração, com base nos fatores de adição de enxofre, percentual de inoculação e composição química do inoculante, podendo-se verificar que com o fator A 0,04% de adição de enxofre e 0,165% de inoculação com a composição de Fe-Si, obteve-se uma tração de 223,5 MPa, e um valor superior é obtido com a adição de enxofre nas mesmas condições.

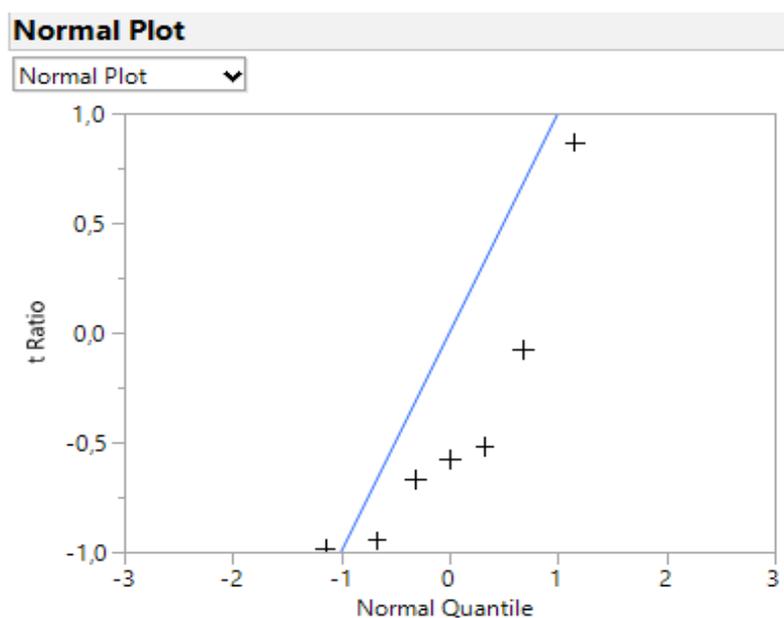
Gráfico B9 – Comportamento de cada fator sobre a variável resposta de resistência à tração, com adição de enxofre, 0,165% de inoculação e Fe-Si.



Fonte: O autor (2019).

Já no gráfico normal plot, Gráfico B10, pode se observar que não há nenhum fator estatisticamente significativo para resposta de resistência à tração. Porém, se verifica que a interação dos fatores adição de enxofre e tipo de inoculante pode não ser considerada significativa, mas é superior aos demais fatores.

Gráfico B10 – Gráfico Normal Plot demonstrando os fatores mais críticos para resistência à tração.

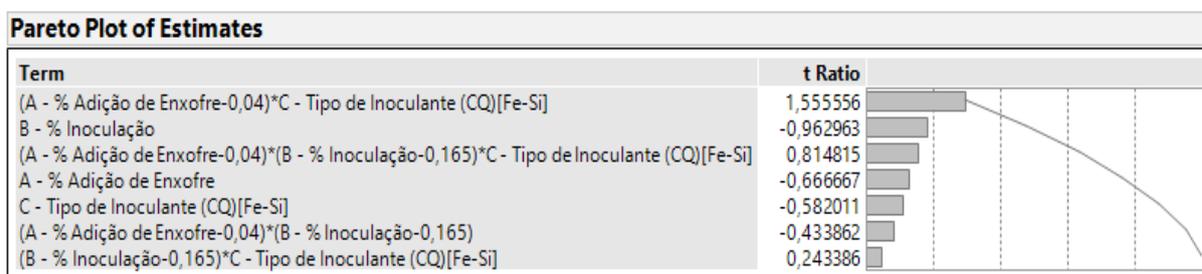


Fonte: O autor (2019).

O mesmo pode ser visto no Gráfico B11, onde a interação com 0,04% de adição de enxofre e composição química de Fe-Si é a mais significativa para o aumento no valor de

resistência a tração, a qual não está demonstrada nos gráficos, pois trata-se de uma previsão estatística realizada pelo software.

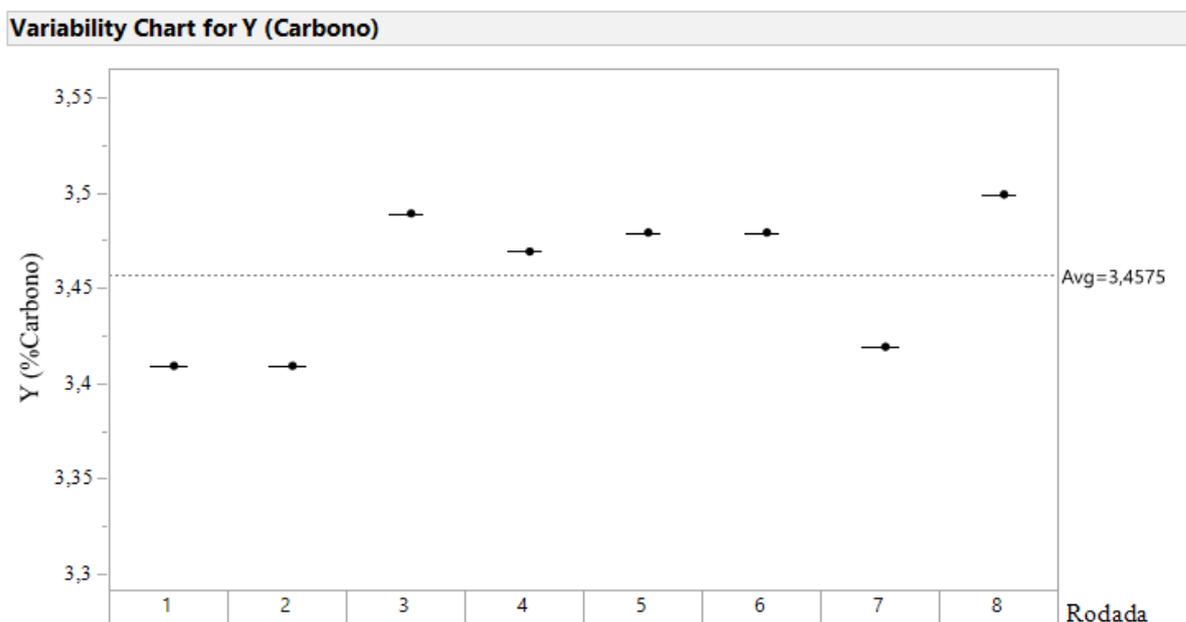
Gráfico B11 – Fatores mais significativos para resistência à tração em ordem crescente.



Fonte: O autor (2019).

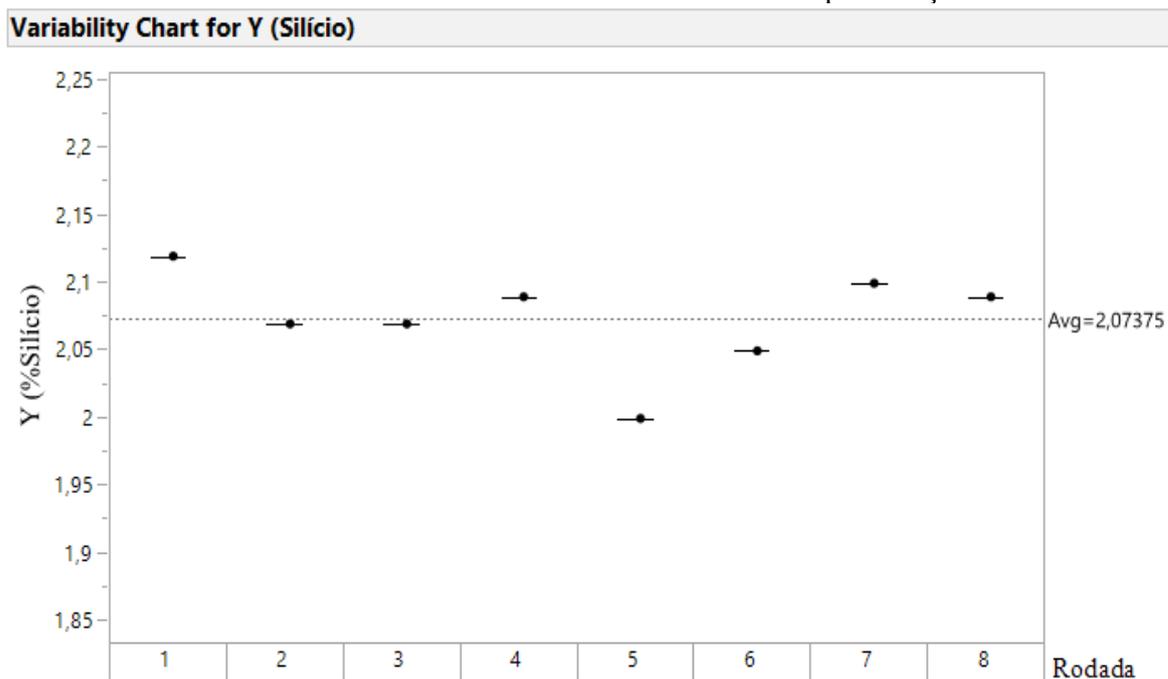
O percentual dos elementos monitorados em cada tratamento pode ser verificado nos Gráficos B12 a B15, onde há o detalhamento desta quantidade e se os mesmos estavam dentro dos limites de especificação.

Gráfico B12 – %Carbono amostras e limites de especificação.



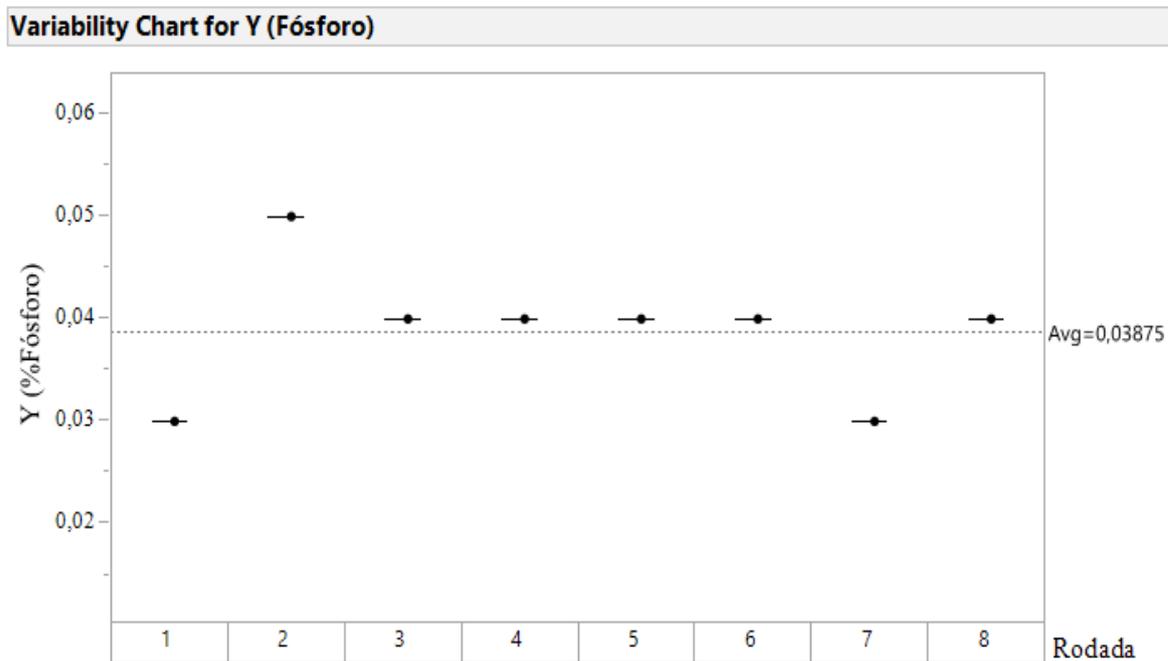
Fonte: O autor (2019).

Gráfico B13 – %Silício amostras e limites de especificação.



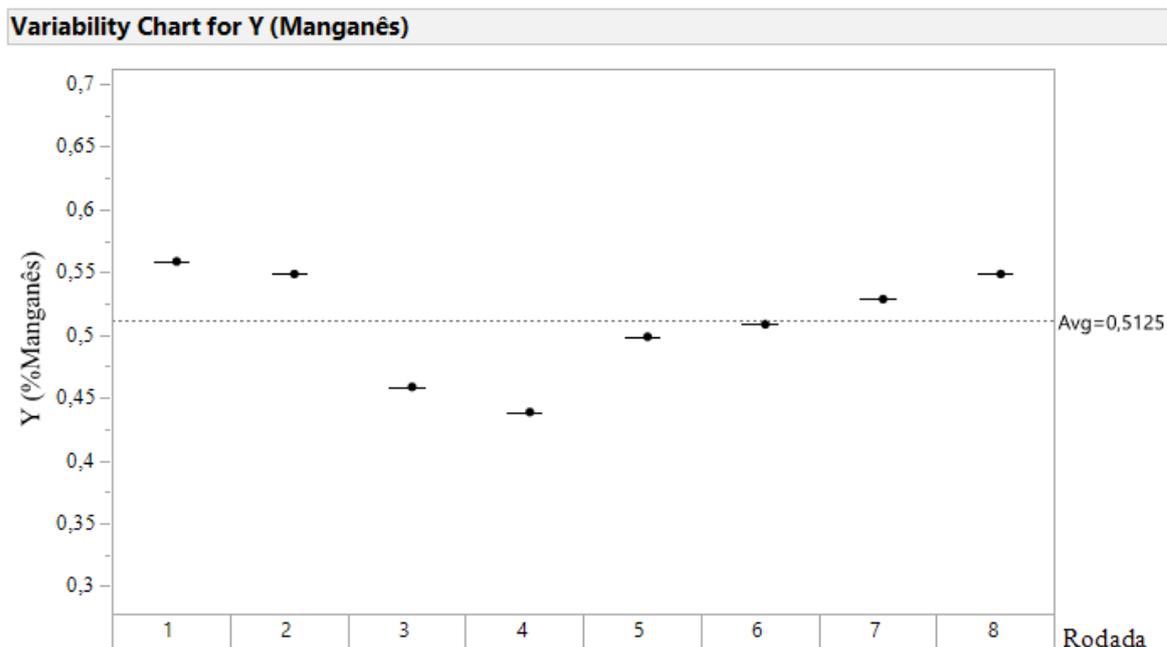
Fonte: O autor (2019).

Gráfico B14 – %Fósforo amostras e limites de especificação.



Fonte: O autor (2019).

Gráfico B15 – %Manganês amostras e limites de especificação.



Fonte: O autor (2019).

A influência de cada fator sobre a variável resposta pode ser observada no Gráfico B16, onde, através da análise estatística realizada pelo software JMP (Software de análise estatística), demonstra que o percentual de inoculação e a interação do fator adição de enxofre e composição química do inoculante foram os mais significativos para alteração na variável resposta.

Gráfico B16 – Fatores mais significativos para quantidade de ferro duro.

Response Y (ANSWER)

Sorted Parameter Estimates

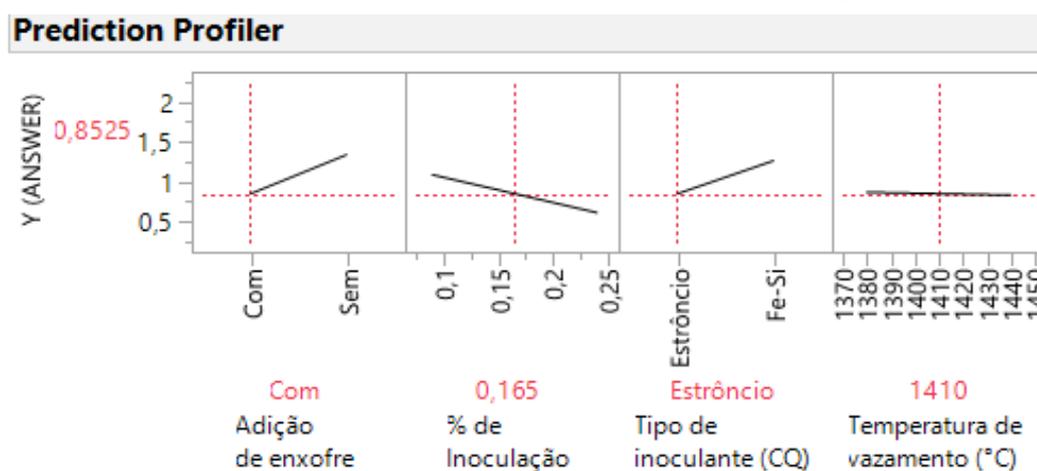
Term	Estimate	Relative Std Error	Pseudo t-Ratio	Pseudo p-Value
% de Inoculação	-3,938333	3,333333	-4,97	0,0042*
Adição de enxofre[Com]*Tipo de inoculante (CQ)[Estrôncio]	-0,204625	0,25	-3,44	0,0184*
Adição de enxofre[Com]*(% de Inoculação-0,165)*(Temperatura de vazamento (*C)-1410)	-0,044056	0,111111	-1,67	0,1562
Adição de enxofre[Com]*(% de Inoculação-0,165)	1,255	3,333333	1,58	0,1741
(% de Inoculação-0,165)*Tipo de inoculante (CQ)[Estrôncio]	-1,011667	3,333333	-1,28	0,2578
Adição de enxofre[Com]*Tipo de inoculante (CQ)[Estrôncio]*(Temperatura de vazamento (*C)-1410)	0,0022375	0,008333	1,13	0,3100
(% de Inoculação-0,165)*(Temperatura de vazamento (*C)-1410)	0,0223889	0,111111	0,85	0,4354
Temperatura de vazamento (*C)	-0,001429	0,008333	-0,72	0,5030
Adição de enxofre[Com]*(% de Inoculação-0,165)*Tipo de inoculante (CQ)[Estrôncio]	0,5283333	3,333333	0,67	0,5345
Adição de enxofre[Com]	-0,039125	0,25	-0,66	0,5395
Tipo de inoculante (CQ)[Estrôncio]*(Temperatura de vazamento (*C)-1410)	-0,001196	0,008333	-0,60	0,5725
(% de Inoculação-0,165)*Tipo de inoculante (CQ)[Estrôncio]*(Temperatura de vazamento (*C)-1410)	0,0148333	0,111111	0,56	0,5987
Adição de enxofre[Com]*(% de Inoculação-0,165)*Tipo de inoculante (CQ)[Estrôncio]*(Temperatura de vazamento (*C)-1410)	0,00035	0,111111	0,13	0,8998
Adição de enxofre[Com]*(Temperatura de vazamento (*C)-1410)	-0,000196	0,008333	-0,10	0,9251
Tipo de inoculante (CQ)[Estrôncio]	-0,001625	0,25	-0,03	0,9792

Fonte: O autor (2019).

Na análise gráfica são identificados os fatores ou interações mais significativos, por isto foram utilizados três gráficos em conjunto:

i) O gráfico Pareto plot, Gráfico B17, o qual apresenta em ordem quais são os graus de liberdade com maior efeito na variável resposta, sendo que todos possuem um número na coluna "estimates" (Estimates = efeito do GL/2). Nessa análise sabem-se quais os graus de liberdade com maior efeito sobre Y (ferro duro), mas isto não significa que eles são realmente significativos

Gráfico B17 – Comportamento de cada fator sobre a variável resposta de resistência à tração, com adição de enxofre, 0,15% de inoculação, estrôncio e temperatura alta.



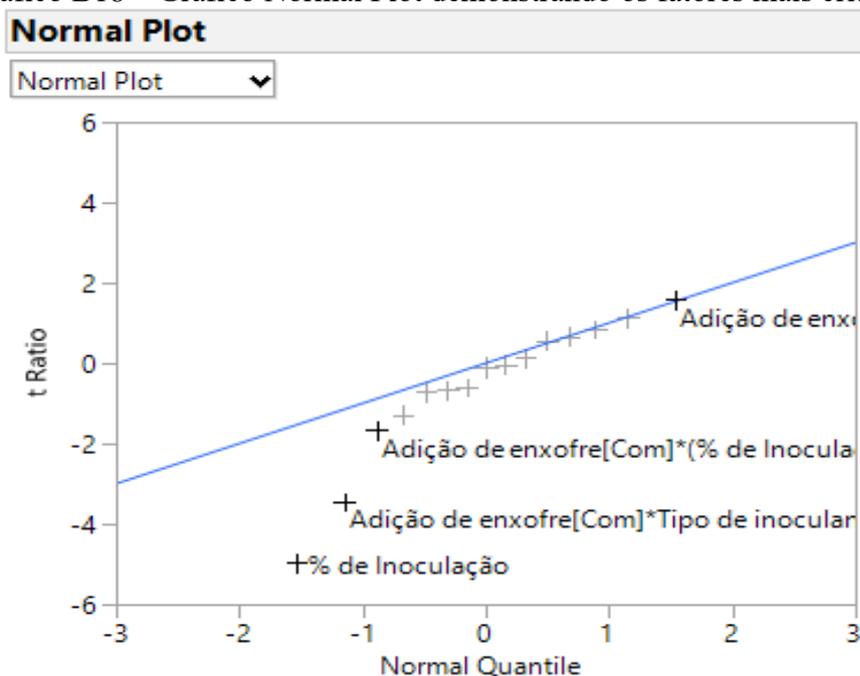
Fonte: O autor (2019).

O gráfico normal plot, que indica quais são os graus de liberdade que realmente influenciam na variável resposta.

iii) Sorted estimates que são as duas análises anteriores em conjunto.

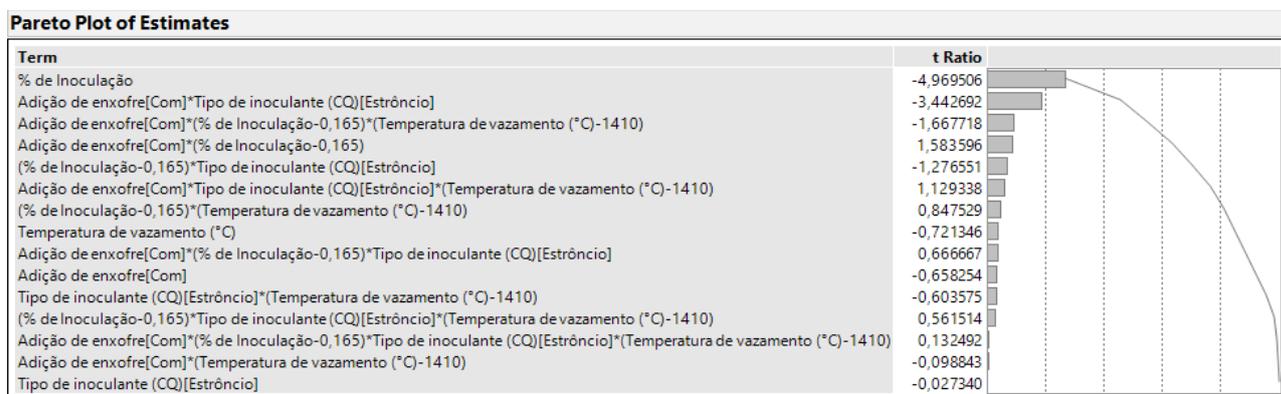
O fator que mais influenciou foi o percentual de inoculação e uma interação de Adição de enxofre com tipo de inoculante (como já era esperado) e ocorrido na resposta de dureza e resistência à tração.

Gráfico B18 – Gráfico Normal Plot demonstrando os fatores mais críticos.



Fonte: O autor (2019).

Gráfico B19 – Fatores mais significativos para quantidade de ferro duro em ordem crescente.



Fonte: O autor (2019).

10 ANEXO

DECLARAÇÃO DE AUTORIZAÇÃO

Declaramos, para os devidos fins, que a empresa WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A inscrita sob CNPJ 07.175.725/0010-50 autoriza a colaboradora Michelle Beatriz de Araújo, inscrita sob CPF 068.311.449-26 a publicação do estudo de Dissertação de mestrado intitulado "DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO INOCULANTE UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO" ao programa de Pós-graduação em engenharia e ciências mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina, bem como a publicação de resultados da pesquisa em periódicos especializados.



Felipe Guilherme Coelho do Amarante
Gerente Departamento Metalúrgico I e II