



Valcir Marques de Menezes

**CORRELAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS PELA ALTERAÇÃO NO
TEOR DE ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DO FERRO FUNDIDO NODULAR**

Horizontalina - RS

2018

Valcir Marques de Menezes

**CORRELAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS PELA ALTERAÇÃO NO
TEOR DE ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DO FERRO FUNDIDO NODULAR**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Sirnei César Kach, Me.

Horizontina - RS

2018

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**Correlação dos efeitos causados pela alteração no teor de elementos de liga
nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular**

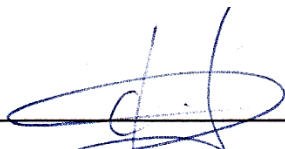
Elaborada por:

Valcir Marques de Menezes

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

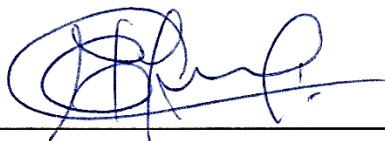
Aprovado em: 03/12/2018

Pela Comissão Examinadora



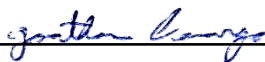
Me. Sirnei César Kach

Presidente da Comissão Examinadora - Orientador



Me. Eloir Fernandes

FAHOR – Faculdade Horizontalina



Me. Jonathan Felipe Camargo

FAHOR – Faculdade Horizontalina

Horizontalina - RS

2018

“Se fui capaz de ver mais longe, é porque me apoiei em ombros de gigantes”.

(Isaac Newton)

RESUMO

Tendo em vista a importância de se entender os impactos dos elementos químicos durante a manufatura de ferros fundidos, uma vez que estes determinam a capacidade do material resistir aos esforços sem que ocorra danos ao mesmo. Pesquisou-se sobre os efeitos da alteração no teor dos elementos químicos quanto as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. Com o intuito de entender os impactos causados pelos principais elementos que constituem o ferro fundido de grafita esferoidal GGG40 em suas propriedades mecânicas. Para tanto, foi necessário realizar simulações numéricas e as correlacionar com condições industriais através de ensaios mecânicos e metalográficos realizados em corpos de prova. Através de simulações numéricas buscou-se entender quais os efeitos causados perante a variação dos elementos de liga no material e determinar quais os elementos químicos que possuem um maior impacto quanto alterações em suas propriedades mecânicas. Realizou-se então, uma pesquisa do tipo estudo de caso com característica exploratória. Diante disto, verificou-se o efeito de cada um dos principais elementos químicos que constituem o ferro fundido nodular GGG40, quais destes possuem um maior impacto em suas propriedades mecânicas perante sua variação percentual e definiu-se um parâmetro para a manipulação destes elementos. O que impôs a constatação de que através do conhecimento dos efeitos causados pela variação percentual dos elementos químicos que constituem o ferro fundido, se define um parâmetro no suporte de tomada de decisões em preparações de carga, o que possibilita evitar erros durante a definição da composição química a fim de se atender à especificações mecânicas estipuladas para peças fundidas.

Palavras-chave: Processo de fundição. Simulação numérica. Composição química.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Solidificação cristalina	21
Figura 2 - Diagrama de fases Fe-C	23
Figura 3 - Mudanças microestruturais durante a solidificação de um Fe-C	25
Figura 4 - Curvas de resfriamento e microestrutura	26
Figura 5 - Solidificação de um ferro fundido hipoeutético	27
Figura 6 - Microestruturas do ferro fundido nodular	29
Figura 7 - Sobreposição da malha computacional em uma geometria	36
Figura 8 - Representação esquemática da tensão	39
Figura 9 - Analisador de espectrometria de emissões óticas.....	41
Figura 10 - Denominação dos corpos de prova utilizados	45
Figura 11 - Corpo de prova para ferros fundidos nodulares – CP02	47
Figura 12 - Máquina Sopradora Flexicore.....	48
Figura 13 - Molde em areia confeccionado pelo processo Flexicore	49
Figura 14 - Pirômetro de imersão	50
Figura 15 - Coquilha e corpo de prova CP01.....	51
Figura 16 - Ensaio de espectrometria	52
Figura 17 - Ensaio de dureza Brinell.....	53
Figura 18 - Realização dos ensaios mecânicos.....	54
Figura 19 - Regiões de análise – simulação de correlação	57
Figura 20 - Malha computacional – simulação de correlação	58
Figura 21 - Perspectiva de Definições	59
Figura 22 - Variáveis da simulação de correlação	60
Figura 23 - Definição dos objetivos – simulação de correlação	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição química dos ferros sem os elementos de liga	28
Quadro 2 - Composição base para ferros fundidos nodulares.....	29
Quadro 3 - Efeitos dos elementos de liga sobre o ferro fundido	30
Quadro 4 - Testes típicos de dureza.....	40
Quadro 5 - Matéria prima para a obtenção do metal base.....	46
Quadro 6 - Composição química / ensaio de espectrometria	52
Quadro 7 - Sequência de <i>designs</i> – Simulação de correlação	61
Quadro 8 - Determinação do fator de correção para resultados de dureza	63
Quadro 9 - Composição química usual da empresa em estudo	64
Quadro 10 - Limites percentuais de cada elemento analisado	65
Quadro 11 - Parametrização de variáveis para a simulação DOE.....	66
Quadro 12 - Resultados do processo de correlação.....	70
Quadro 13 - Ensaio realizados em amostras do material GGG40.	71
Quadro 14 - Especificações de resultados das simulações.....	72
Quadro 15 - Percentuais de utilização do Mg no <i>software</i> MAGMASOFT®	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	13
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.4 HIPÓTESES.....	14
1.5 JUSTIFICATIVA	15
1.6 OBJETIVOS	16
1.6.1 Objetivo Geral	16
1.6.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 FUNDIÇÃO.....	18
2.1.1 Ferro fundido	18
2.1.2 Solidificação	20
2.1.3 Diagrama de fases	21
2.1.4 Composição química.....	28
2.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA NA FUNDIÇÃO DE METAIS	31
2.2.1 MAGMASOFT®	32
2.2.2 Descrição geométrica e discretização.....	33
2.2.3 Princípio de cálculo	34
2.2.4 Volumes finitos	35
2.2.5 Verificações em simulações	37
2.3 ENSAIOS APLICADOS EM FERROS FUNDIDOS.....	37
2.3.1 Metalografia microscópica.....	37
2.3.2 Ensaio de resistência à tração	38
2.3.3 Ensaio de dureza	39
2.3.4 Ensaio de espectrometria.....	40
3 METODOLOGIA	42
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS.....	43
3.1.1 Correlação entre o <i>software</i> e o ambiente fabril.....	43
3.1.1.1 Obtenção do metal base	46
3.1.1.2 Manufatura do corpo de prova CP02.....	47
3.1.1.3 Definição da temperatura inicial de vazamento.....	49

3.1.1.4 Determinação da composição química utilizada	50
3.1.1.5 Valores objetivos – Ensaio mecânicos	52
3.1.1.6 Valores objetivos – Ensaio metalográfico.....	55
3.1.1.7 Definições da simulação de correlação	56
3.1.2 Definição de parâmetros para as variações de composição	63
3.1.3 Definição das simulações DOE.	65
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	66
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
4.1 LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES GERAIS	69
4.2 Correlação entre o <i>software</i> de simulação e o ambiente fabril.....	69
4.3 IMPACTO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO FERRO FUNDIDO GGG40.....	71
4.3.1 Carbono.....	72
4.3.2 Silício.....	74
4.3.3 Manganês.....	74
4.3.4 Cromo.....	75
4.3.5 Enxofre	75
4.3.6 Cobre.....	76
4.3.7 Magnésio.....	76
4.4 IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS COM MAIOR IMPACTO PERANTE AS PROPRIEDADES DOS FERRO FUNDIDO NODULAR.....	76
CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
REFERÊNCIAS.....	81
APÊNDICE A - FORNO DE INDUÇÃO E MATÉRIA PRIMA DO FERRO FUNDIDO NODULAR GGG40.....	84
APÊNDICE B - MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS MECÂNICOS	85
APÊNDICE C - ENSAIO METALOGRAFICO DE CORRELAÇÃO	86
APÊNDICE D - INTERFACE DE RESULTADOS DOE	88
APÊNDICE E - ANÁLISE DE RESULTADOS DOE	89
APÊNDICE F - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE CORRELAÇÃO.....	90
APÊNDICE G - CARBONO / ALONGAMENTO (HIPOEUTÉTICO).....	91
APÊNDICE H - CARBONO / DUREZA (HIPOEUTÉTICO)	92
APÊNDICE I - CARBONO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (HIPOEUTÉTICO)	93
APÊNDICE J - CARBONO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (HIPOEUTÉTICO)	94
APÊNDICE K - CARBONO / FORMAÇÃO DE PERLITA (HIPOEUTÉTICO)	95

APÊNDICE L - CARBONO / FORMAÇÃO DE FERRITA (HIPOEUTÉTICO)	96
APÊNDICE M - CARBONO / ALONGAMENTO (HIPEREUTÉTICO)	97
APÊNDICE N - CARBONO / DUREZA (HIPEREUTÉTICO)	98
APÊNDICE O - CARBONO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (HIPEREUTÉTICO).....	99
APÊNDICE P - CARBONO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (HIPEREUTÉTICO).....	100
APÊNDICE Q - CARBONO / FORMAÇÃO DE PERLITA (HIPEREUTÉTICO).....	101
APÊNDICE R - CARBONO / FORMAÇÃO DE FERRITA (HIPEREUTÉTICO).....	102
APÊNDICE S - SILÍCIO / ALONGAMENTO (HIPOEUTÉTICO).....	103
APÊNDICE T - SILÍCIO / DUREZA (HIPOEUTÉTICO)	104
APÊNDICE U - SILÍCIO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (HIPOEUTÉTICO)	105
APÊNDICE V - SILÍCIO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (HIPOEUTÉTICO)	106
APÊNDICE W - SILÍCIO / FORMAÇÃO DE PERLITA (HIPOEUTÉTICO).....	107
APÊNDICE X - SILÍCIO / FORMAÇÃO DE FERRITA (HIPOEUTÉTICO).....	108
APÊNDICE Y - SILÍCIO / ALONGAMENTO (HIPEREUTÉTICO).....	109
APÊNDICE Z - SILÍCIO / DUREZA (HIPEREUTÉTICO)	110
APÊNDICE AA - SILÍCIO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (HIPEREUTÉTICO)	111
APÊNDICE AB - SILÍCIO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (HIPEREUTÉTICO)	112
APÊNDICE AC - SILÍCIO / FORMAÇÃO DE PERLITA (HIPEREUTÉTICO).....	113
APÊNDICE AD - SILÍCIO / FORMAÇÃO DE FERRITA (HIPEREUTÉTICO).....	114
APÊNDICE AE - MANGANÊS / ALONGAMENTO	115
APÊNDICE AF - MANGANÊS / DUREZA	116
APÊNDICE AG - MANGANÊS / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO	117
APÊNDICE AH - MANGANÊS / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	118
APÊNDICE AI - MANGANÊS / FORMAÇÃO DE PERLITA.....	119
APÊNDICE AJ - MANGANÊS / FORMAÇÃO DE FERRITA.....	120
APÊNDICE AK - CROMO / ALONGAMENTO	121
APÊNDICE AL - CROMO / DUREZA	122
APÊNDICE AM - CROMO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO	123
APÊNDICE AN - CROMO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	124
APÊNDICE AO - CROMO / FORMAÇÃO DE PERLITA	125
APÊNDICE AP - CROMO / FORMAÇÃO DE FERRITA	126
APÊNDICE AQ - ENXOFRE / ALONGAMENTO.....	127
APÊNDICE AR - ENXOFRE / DUREZA	128
APÊNDICE AS - ENXOFRE / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO	129

APÊNDICE AT - ENXOFRE / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	130
APÊNDICE AU - ENXOFRE / FORMAÇÃO DE PERLITA.....	131
APÊNDICE AV - ENXOFRE / FORMAÇÃO DE FERRITA.....	132
APÊNDICE AW - COBRE / ALONGAMENTO	133
APÊNDICE AX - COBRE / DUREZA.....	134
APÊNDICE AY - COBRE / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO.....	135
APÊNDICE AZ - COBRE / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	136
APÊNDICE BA - COBRE / FORMAÇÃO DE PERLITA	137
APÊNDICE BB - COBRE / FORMAÇÃO DE FERRITA	138
APÊNDICE BC - MAGNÉSIO / ALONGAMENTO.....	139
APÊNDICE BD - MAGNÉSIO / DUREZA	140
APÊNDICE BE - MAGNÉSIO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO	141
APÊNDICE BF - MAGNÉSIO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	142
APÊNDICE BG - MAGNÉSIO / FORMAÇÃO DE PERLITA.....	143
APÊNDICE BH - MAGNÉSIO / FORMAÇÃO DE FERRITA.....	144
APÊNDICE BI - CARBONO / FORMAÇÃO DE NÓDULOS.....	145
ANEXO A - FENÔMENOS DURANTE O PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO DE UM METAL.....	146
ANEXO B - FLUXOGRAMA DE GERAÇÃO DE UMA MALHA COMPUTACIONAL	147

1 INTRODUÇÃO

A indústria de fundição de metais sempre teve foco em equilibrar as necessidades técnicas e comerciais a fim de garantir operações eficientes e proteger a rentabilidade do negócio. A maneira de como é realizada a comercialização de peças fundidas está em constante mudança, os clientes estão optando cada vez mais pela terceirização de peças fundidas, o que demanda maiores exigências sobre os recursos de engenharia das empresas de fundição. Através do conhecimento quantitativo sobre as propriedades dos materiais trabalhados pode-se configurar um processo robusto que garanta as especificações necessárias. O uso destas propriedades permite explorar plenamente o potencial do sistema de fundição, o que apoia fortemente no desenvolvimento de novos componentes fundidos. (STURM; BUSCH, 2011).

As propriedades mecânicas definem como o material irá se comportar quando submetido a esforços, portanto este trabalho se justifica pela necessidade de uma melhor compreensão de quais variáveis microestruturais causam maior impacto nas propriedades dos ferros fundidos nodulares. A realização de um estudo entre as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular GGG40 e o teor dos elementos químicos que o constituem surgiu devido a necessidade de se controlar as características mecânicas de peças fundidas. Evitar o mau planejamento da composição do material a ser fundido também pode ser descrito como uma necessidade, bem como, manter uma maior estabilidade do processo de produção de uma empresa de fundição. Sendo assim, se define como problema a incerteza dos impactos causados com a variação percentual dos elementos químicos deste material.

Tendo em vista que as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular dependem diretamente de sua microestrutura. Busca-se com este trabalho correlacionar e entender quais são os efeitos dos elementos de liga¹ nas propriedades mecânicas do ferro fundido de grafita nodular GGG40. Sendo estes efeitos evidenciados através do auxílio do *software* de simulação MAGMASOFT[®] e ensaios realizados em laboratório. Visando atingir uma maior estabilidade das

¹ Elementos de liga: Elementos químicos adicionados a uma matriz para a formação de ligas metálicas.

propriedades mecânicas em peças fundidas de acordo com as características das mesmas.

1.1 TEMA

Efeitos da alteração no teor dos elementos químicos quanto as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se na avaliação do impacto causado pela variação no teor dos elementos químicos que constituem o ferro fundido nodular GGG40. Consideram-se como elementos a serem avaliados: carbono, cromo, cobre, magnésio, manganês, enxofre e silício. Sendo as propriedades mecânicas a serem analisadas: dureza, resistência à tração, resistência ao escoamento e alongamento do ferro fundido nodular GGG40 produzido na empresa onde foi realizado o presente estudo.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Componentes manufaturados em ferro fundido são soluções que permitem a redução do número de processos industriais necessários para se chegar a um produto final. Com a grande demanda de se desenvolver produtos em um intervalo de tempo cada vez menor, empresas tendem a desenvolver projetos de fundidos sempre que aplicável. Contudo, este é um procedimento que depende de inúmeros fatores relacionados ao controle de fabricação e isto desencadeia a necessidade de estudos relacionados com este tipo de componente, ferramentas que possam auxiliar no processo, como por exemplo *softwares* de simulação numérica, também devem ser exploradas. Atualmente existem *softwares* de simulação que permitem a previsão desde o comportamento do metal durante o enchimento de moldes até a sua completa solidificação de maneira eficiente.

Um dos pontos de maior impacto na produção de componentes fundidos está relacionado com a sua composição química, devido ao processo de fusão para a obtenção de uma liga metálica se basear na adição de elementos de liga a um material em maior quantidade denominado solvente. Os elementos de liga também chamados de solutos (elementos em menor quantidade da mistura) possuem grande

influência nas propriedades dos materiais fundidos. Dentre estas propriedades pode-se citar as mecânicas (resistência a tração e ao escoamento, alongamento e dureza) e as microestruturais (número de nódulos por milímetro quadrado, percentual de ferrita e percentual de perlita).

Sendo assim, o controle do percentual de cada soluto na composição de um produto fundido é de grande importância. Saber quais são os efeitos de cada um destes elementos quanto as propriedades dos produtos fundidos e quais geram maior impacto nas características do material em estudo, também é um ponto a ser analisado. Isto é ressaltado quando se depende de alterações na composição do material para atender alguma exigência estipulada devido a aplicação de um item a ser manufaturado em ferro fundido.

Este trabalho busca analisar o seguinte fator: Quais são os impactos causados nas propriedades mecânicas do ferro fundido GGG40 perante alterações no teor em percentuais dos principais elementos que constituem sua composição química?

1.4 HIPÓTESES

A tomada de decisões durante o desenvolvimento de projetos de maneira rápida e eficaz, assim como a realização de ajustes em processos de fabricação visando o aumento do desempenho de componentes, estão cada vez mais presentes nas necessidades de empresas voltadas para a fundição de materiais.

O controle de processos industriais durante a fabricação de componentes é um dos aspectos de maior relevância dentro de empresas do setor de fundição. Dentre estes está presente o controle quanto ao teor dos elementos químicos que constituem os materiais a serem fundidos. Estes teores determinam as características microestruturais e mecânicas dos componentes manufaturados. Portanto, as seguintes hipóteses são levantadas para este trabalho:

- a) Definir um parâmetro quanto as variações dos elementos químicos em análise que constituem o material em estudo;
- b) Validar os parâmetros determinados através da geração de documentação.

Estes parâmetros podem ser desenvolvidos com o auxílio de um *software* de simulação numérica juntamente com ensaios mecânicos e metalográficos em corpos de prova. Com a utilização destes se assume como viável a verificação dos efeitos da variação, para mais e para menos, dos principais elementos químicos que constituem o ferro fundido nodular GGG40.

1.5 JUSTIFICATIVA

Justifica-se este trabalho pela importância de se entender os impactos dos elementos químicos durante a definição de cargas no processo de fusão do ferro fundido nodular. Por conta de as características específicas de cada material serem o parâmetro principal no condicionamento e determinação do uso destes elementos perante a exigência de esforços e aplicações de peças fundidas.

O processo de fundição possibilita a produção de peças de poucas gramas ou até dezenas de toneladas, componentes simples ou de grande complexidade geométrica. Isso se soma ao fato de que a manufatura de peças através do processo de fundição representa o menor caminho entre a matéria prima e o produto final.

Pode-se ressaltar também, que com a exceção dos itens produzidos por técnicas de metalurgia do pó, todas as peças e componentes metálicos durante a sua manufatura, passam pelo menos uma vez pelo procedimento de fundição. Itens fundidos podem ser aplicados nos mais diversos segmentos, entre eles podem-se citar: segmento automotivo, agrícola, ferroviário, de máquinas e equipamentos e até mesmo no setor de energias renováveis, tendo como exemplo os cubos de geradores eólicos.

O uso da tecnologia de simulação numérica no processo de fundição de metais está cada vez mais presente nas empresas, dentre as vantagens da utilização destes softwares destacam-se: a redução de custos relacionados a qualidade de peças fundidas, otimização do rendimento metalúrgico e a redução do método de tentativa e erro (tendo em vista de que o cenário experimental ocorrerá todo na interface do *software*). Portanto, para se manter competitivo neste mercado de constante mudança e que cada vez mais necessita de prazos menores no desenvolvimento de novos produtos, empresas do ramo de fundição estão adotando estes *softwares* como importantes ferramentas em seus processos.

Os ferros fundidos nodulares são de grande importância para as indústrias, por apresentarem uma boa correlação entre custos e propriedades mecânicas. Devido a possibilidade de incrementar elementos de liga e tratamentos térmicos, este tipo de material pode ser utilizado em aplicações que anteriormente eram exclusivas dos aços.

Dentre as escolhas mais importantes a se realizar durante o desenvolvimento de projetos está a definição do material a ser utilizado. Ao se falar de materiais um dos pontos mais importantes a ser abordado são as propriedades mecânicas, pois são estas que irão determinar a aplicação de um ou outro tipo de material em um componente específico. Estas propriedades definem como o material irá se comportar quando submetido a esforços mecânicos e determinam a capacidade de um material resistir ou transmitir esforços sem que ocorra danos ao mesmo, como por exemplo, deformações, trincas e rompimentos.

Após a definição do material é irrefutável a necessidade de se ter um controle de produção eficaz. A definição de um método de controle de qualidade de produtos é crucial para as empresas evitarem contratempos com a qualidade de seus produtos, principalmente os que estão relacionados com as propriedades mecânicas dos materiais que em sua grande maioria se evidenciam após o produto estar em posse de seus clientes.

Pelo fato de a microestrutura ser a responsável pelas características mecânicas dos ferros fundidos nodulares, torna-se evidente a importância de se entender quais são as variáveis, tratando-se de elementos químicos, que causam mais impacto nas propriedades do mesmo. Desta maneira estudos sobre este tipo de material são de grande valia tanto para o ramo acadêmico quanto para o ramo industrial.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objeto geral entender os principais efeitos causados nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular GGG40 perante a variação dos elementos químicos que o constituem. Possibilitando uma maior estabilidade e assertividade quanto a definição das propriedades de peças manufaturadas em ferro fundido, atendendo assim às especificações estipuladas em projetos de fundição.

1.6.2 Objetivos Específicos

Buscando alcançar o objetivo deste estudo, serão levantados os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar simulações numéricas e as correlacionar com as condições industriais através de ensaios mecânicos e microestruturais em corpos de prova;
- b) A partir de simulações entender os efeitos da variação dos elementos de liga no ferro fundido nodular GGG40;
- c) Determinar quais os elementos químicos predeterminados possuem um maior impacto quanto alterações nas propriedades do material.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 FUNDIÇÃO

A fundição é provavelmente o mais antigo processo de produção. Estimativas datam que a mesma tenha existido por mais de 5000 anos, há relatos históricos de seu uso tanto na história antiga quanto na era medieval. Alguns exemplos podem ser citados como: machados moldados em moldes abertos feitos de pedra a cerca de 5000 anos, componentes feitos de bronze, ouro e prata como uma cabeça de bronze fundido da Mesopotâmia remota feita a cerca de 2250 a.C. O primeiro centro de fundição surgiu na dinastia de Shang na China por volta de 1766 – 1122 a.C. (BAWA, 2006).

A fundição de metais parte do aquecimento do material a fim de transformá-lo em um estado líquido, após este é transferido para uma cavidade a qual permanecerá até a sua solidificação onde irá assumir a forma da mesma. Esta cavidade é denominada molde, que pode ser expansível (molde de areia) ou permanente (molde metálico) (BOLJANOVIC, 2009).

Trata-se de um processo complexo que depende de uma série de variáveis, as quais influenciam diretamente na definição das características microestruturais do material. Dentre essas variáveis pode ser citado a forma como ocorre a transferência de calor, microestrutura do material, morfologia, estrutura dendrítica, entre outros. Desta forma, as relações entre os processos e microestrutura do material necessitam de conhecimento detalhado para se obter as formas e geometrias mais próximas do produto final (MARTORANO, 1998).

2.1.1 Ferro fundido

Praticamente todos os tipos de ligas podem ser moldadas através de técnicas de fundição apropriadas, anteriormente haviam exceções quanto os metais reativos e refratários, mas devido a técnicas especiais desenvolvidas estes também podem ser trabalhados. Existem classes que possuem uma maior importância, um exemplo é o ferro fundido que proporcionou o crescimento da indústria de fundição e atualmente possui uma ampla seleção de materiais com propriedades distintas que atendem as mais diversas áreas de aplicação (BEELEY, 2001).

O ferro fundido originou-se na China por volta de 600 anos a.C, sendo muito utilizado em estatuetas. A principal característica deste material chinês era seu alto teor de fósforo e enxofre o que tornava seu ponto de fusão semelhante ao do bronze. A sua produção em massa iniciou-se no século XVIII em Coalbrookdale – Inglaterra. Neste período Abraham Darby aperfeiçoou o processo de fundição do ferro com a utilização de carvão coque ao invés do carvão mineral o que proporcionou uma quantidade suficiente de manganês para reduzir o teor de enxofre, melhorando as propriedades do material (GOODWAY, 1992).

O ferro fundido pode ser definido como uma liga Fe-C que possui um teor de carbono acima de 2%, quantidade esta superior ao que é retido em solução sólida na austenita, o que resulta na presença de carbono parcialmente livre em forma de nódulos ou lamelas. Este pode ser considerado uma liga ternária Fe-C-Si devido a sua composição química e a influência que o silício tem perante ela. O ferro fundido nodular possui a presença de carbono livre em forma de grafita esferoidal proveniente da adição de magnésio ainda em seu estado líquido. Quando o magnésio entra em contato com o metal líquido ocorre uma reação química que ocasiona a sua fervura. A vaporização do Mg diminui o teor de enxofre presente no metal e provoca a formação da grafita esferoidal. Este processo proporciona então, uma boa ductibilidade ao material (CHIAVERINI, 2002).

Carmo (2004) e Chiaverini (1987) definem alguns conceitos referentes aos ferros fundidos a fim de se ter um maior entendimento quanto a sua microestrutura:

- Austenita: Solução de um ou mais elementos no ferro cúbico de face centrada. O soluto desta solução é o carbono estável na faixa de 910°C a 1400°C, a austenita também é conhecida como ferro γ .
- Ferrita: Trata-se de uma solução sólida de um ou mais elementos que possuem uma microestrutura cúbica de corpo centrado, também conhecida como ferro α , para esta o soluto mais comum é o carbono. A ferrita é provida por grafitizadores e taxas de resfriamento baixas. Ao analisar o diagrama de fases encontram-se duas regiões de ferrita separadas pelo campo austenítico, sendo a área superior à de ferrita δ e a inferior da ferrita α .
- Perlita: Agregado lamelar metaestável de ferrita e cementita, resultante da transformação da austenita, caracterizada como uma mistura de duas fases.

Possui maior dureza e resistência à tração do que a ferrita, mas menor ductibilidade. A perlita também está associada a taxas de resfriamento altas.

- Cementita: Composta de ferro e carbono. A sua composição química pode ser alterada pela presença de elementos formadores de carbonetos. Sua formação é favorecida por altas taxas de resfriamento. A cementita também é conhecida como carboneto de ferro Fe_3C ou carboneto eutético.
- Grafita: Constituinte característico dos ferros formados por carbono puro.
- Eutético: Estrutura composta de constituintes sólidos formados na reação eutética, ou seja, uma liga contendo a composição do ponto eutético do diagrama de equilíbrio.

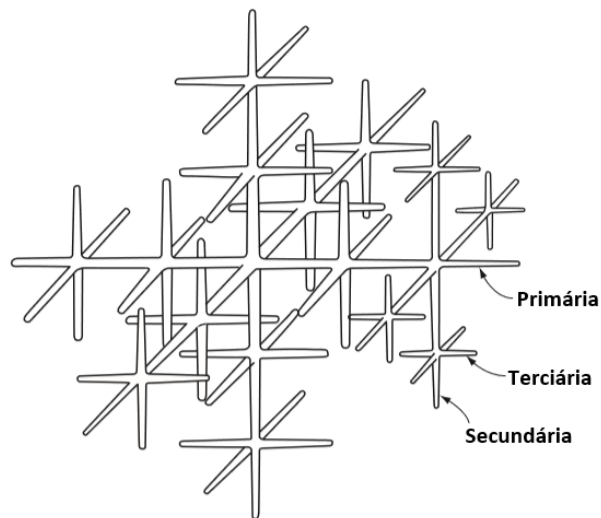
2.1.2 Solidificação

As propriedades finais de um produto são determinadas pela estrutura formada imediatamente após a sua solidificação, já que grande maioria dos aspectos microestruturais dependem das condições desta, desde o início do processo onde o metal ainda se encontra em um estado líquido. Após a determinação da composição química do metal a ser manufaturado o processo de solidificação se encarrega na determinação da microestrutura resultante, onde a temperatura de vazamento é a primeira variável juntamente com a intensidade das correntes convectivas durante o processo de enchimento da cavidade do molde, sendo que o molde atua como um absorvedor de calor, o que garante a transformação do metal de líquido para o estado sólido. A termodinâmica envolvida no processo fará a imposição de diluição ou do soluto ou do solvente dependendo da posição da liga no diagrama de fases. Nesta conjuntura de transferência de calor e massa as condições de determinação da morfologia e arranjo microestrutural são impostas. E por fim a microestrutura resultante irá determinar as características químicas e mecânicas do componente solidificado (GARCIA, 2001). Os fenômenos durante o processo de solidificação de um metal podem ser visualizados no Anexo A.

Durante o processo de solidificação do ferro, ocorre a formação de cristais na medida em que os pontos do mesmo atingem a temperatura de solidificação. Estes cristais também são conhecidos como núcleos ou cristais de solidificação. Os eixos

de cristalização formados durante o processo passam a emitir outros e assim por diante até toda a massa estar em estado sólido. Este fenômeno pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 - Solidificação cristalina



Fonte: Adaptado de Abbaschian, Abbaschian, Reed-hill, 2009.

A Figura 1 representa a formação de um cristal de solidificação, o mesmo se inicia de forma primária, onde durante o decorrer da solidificação ocorre formações secundárias e terciárias. O conjunto entre o eixo principal e suas ramificações denomina-se dendrita. O crescimento de uma dendrita é limitado pelo encontro de seus eixos com os eixos de suas vizinhas.

Ao final da solidificação gera-se um aglomerado de grãos fortemente unidos. Quando as dendritas formadas são grandes, ocorre a formação de grãos maiores, portanto a quantidade de impurezas presentes em torno destes grãos é maior do que se as dendritas fossem menores. Por este motivo, materiais com a granulação mais grosseira são mais quebradiços que os de granulação mais fina. (COLPAERT, 1974).

2.1.3 Diagrama de fases

Uma porção homogênea de características uniformes físicas e químicas de um sistema é denominado fase. Cada fase em um sistema possui características físicas diferentes, mas estas características não precisam ser necessariamente

ligadas a composição, estados da matéria (líquido e sólido) também são diferenciadores das fases de um sistema. Estas fases possuem um grande impacto na microestrutura dos materiais que são definidas através do número de fases presentes, suas proporções e pela sua distribuição, também dependem das concentrações dos elementos de liga presentes (CALLISTER, 2000).

O diagrama de fases se trata de um mapa onde é possível visualizar as estabilidades relativas de várias fases presentes durante a solidificação de um material, sob condições variáveis de temperatura e composição química. Sendo assim, dada a composição de uma liga metálica pode-se determinar as fases que estarão presentes à medida que o material se solidifica. O diagrama também pode ser utilizado para entender o comportamento dos componentes em solução líquida, assim como o do solvente (DARKEN; GURRY, 1953).

Para Carmo (2004) o diagrama de equilíbrio Fe-C, Figura 2, descreve o comportamento de uma liga Fe-C perante uma taxa de resfriamento lenta, este pode ser utilizado para se compreender a combinação de fases em relação a composição química e a temperatura do material. O autor ainda ressalta que nas indústrias, com a presença de vários elementos de liga e variações nas taxas de resfriamento, ocorre a modificação quanto a posição dos limites de fases apresentados pelo diagrama.

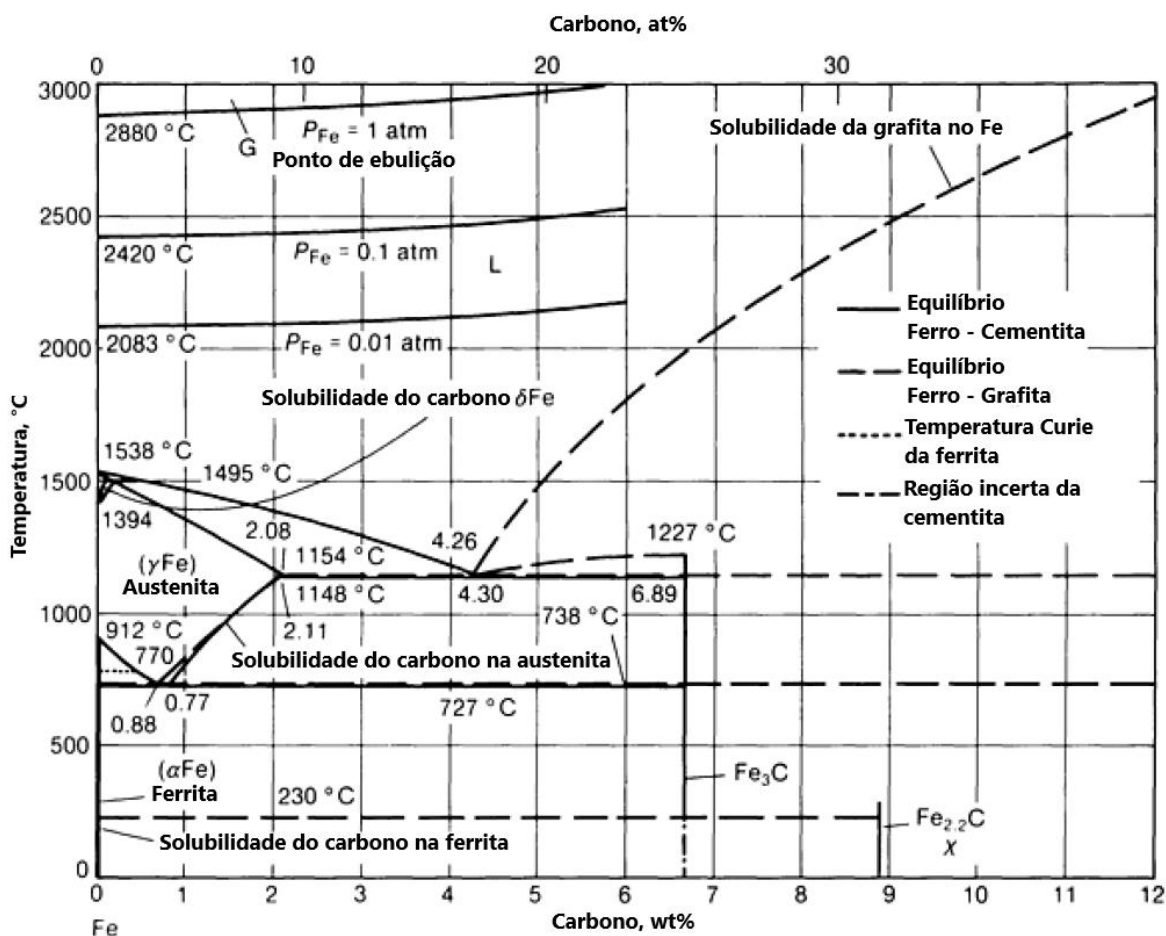
Durante a solidificação, uma fase líquida de metal se transforma em duas fases sólidas, o oposto ocorre quando este metal é aquecido. Este fenômeno é conhecido como reação eutética, o termo eutético significa “que se funde com facilidade”, uma vez que neste ponto a temperatura de fusão é reduzida. Componentes com uma composição pura ao se solidificarem formam apenas uma fase, portanto classificam-se como sistemas eutéticos apenas componentes que formam duas fases durante a solidificação (CALLISTER, 2016).

Garcia (2001) observa que o diagrama Fe-C conduz para uma única composição eutética (4,3%) sendo que esta propriedade apresenta um ponto de fusão menor em relação ao apresentado pelos demais constituintes. Outro aspecto deste ponto, apontado pelo autor, é a completa solubilidade no estado líquido e a solubilidade parcial no estado sólido. As duas linhas de *liquidus* se encontram no ponto eutético enquanto uma linha horizontal faz a ligação entre as soluções sólidas terminais.

Para Benze e Elliot (1961), Stefanescu (1992) e Callister (2016) o diagrama de fases do sistema binário Fe-C, é composto por dois equilíbrios: o estável e o metaestável. No equilíbrio estável as características do sistema não mudam ao longo do tempo (temperatura, composição e pressão), este é formado por austenita e grafita. No metaestável, formado por austenita e cementita o estado de equilíbrio nunca é atingido por completo. Os dois equilíbrios possuem diferenças quanto à temperatura e o percentual de carbono em sua reação eutética, sendo 4,26% e 1154°C no diagrama estável e 4,3% e 1148°C no metaestável.

Quando se pretende realizar a análise de solidificação do ferro fundido nodular utiliza-se o equilíbrio estável e quando se trabalha com os ferros fundidos brancos se faz o uso do equilíbrio metaestável (KARSAY, 1985).

Figura 2 - Diagrama de fases Fe-C



Fonte: Adaptado de Stefanescu, 1992.

Stefanescu (1992) apresenta as seguintes equações que são aplicadas no diagrama de fases a fim de se obter a solubilidade máxima do carbono durante a transformação de fases. Referente a fração de massa líquida do equilíbrio estável:

$$WT\%C_{max} = 1,3 + 2,57 \times 10^{-3}t$$

Onde t representa a temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Usando representações termodinâmicas esta pode ser representada por:

$$\text{Log}X_{C_{max}} = -\frac{12,728}{T} + 0,727\text{Log}T - 3,049$$

Onde $X_{C_{max}}$ se refere a solubilidade máxima de grafite no ferro líquido na fração molar e T representa a temperatura em graus Kelvin. Estas são utilizadas para as temperaturas entre 1152°C e 2000°C . Para a austenita:

$$WT\%C_{max} = -0,435 + 0,355 \times 10^{-3}t + 1,61 \times 10^{-6}t^2$$

Para a ferrita:

$$WT\%C_{max} = 2,46 \times 10^3 \exp\left(-\frac{11460}{T}\right)$$

No sistema metaestável:

$$WT\%C_{max} = 4,34 + 0,1874(t - 1150) - 200 \ln \frac{t}{1150}$$

Para austenita:

$$WT\%C_{max} = -0,628 + 1,222 \times 10^{-3}t + 1,045 \times 10^{-6}t^2$$

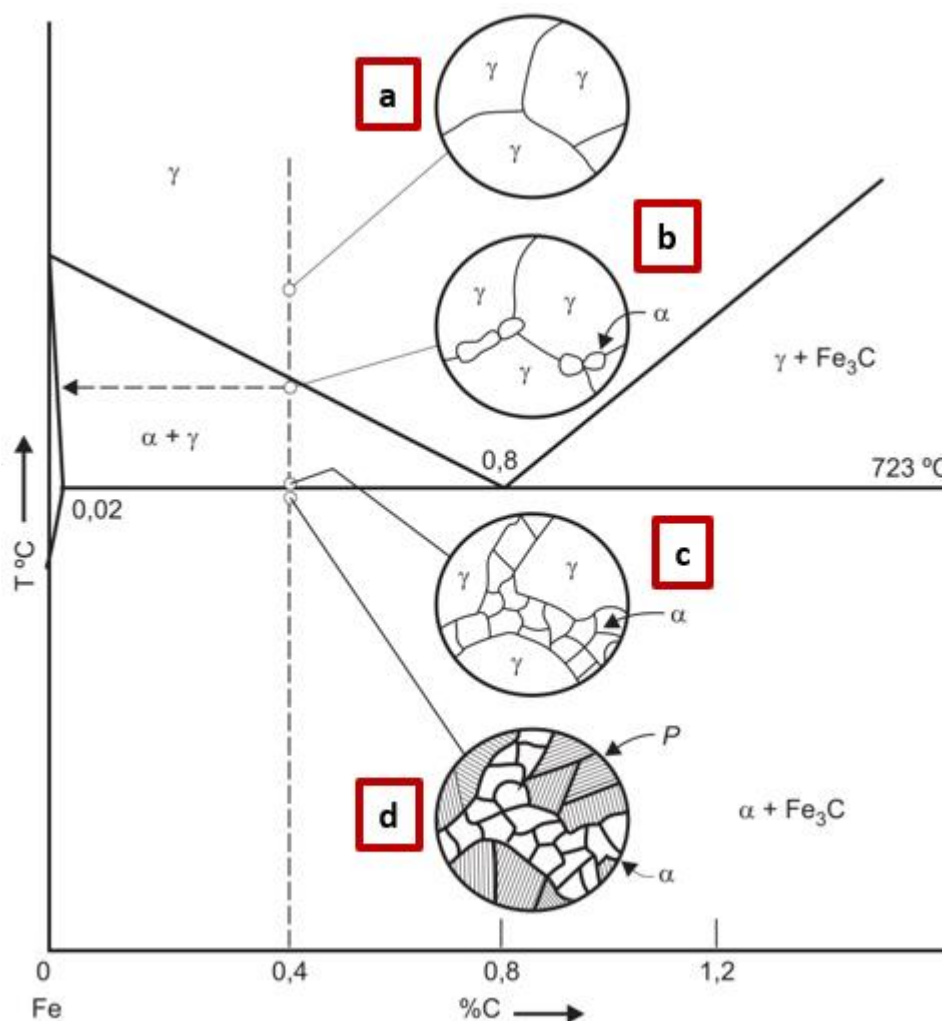
Para ferrita:

$$WT\%C_{max} = 1,8 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{10908}{T}\right)$$

Ainda citando Stefanescu (1992) a estabilidade de uma fase depende da ação de vários elementos. O aumento de atividade do carbono irá proporcionar uma solidificação estável e a redução desta causa uma tendência no aumento de carbonetos presentes no material.

Para um melhor entendimento do diagrama de fases a Figura 3 representa as mudanças microestruturais de uma liga Fe-C com 0,4% de carbono, durante sua solidificação.

Figura 3 - Mudanças microestruturais durante a solidificação de um Fe-C

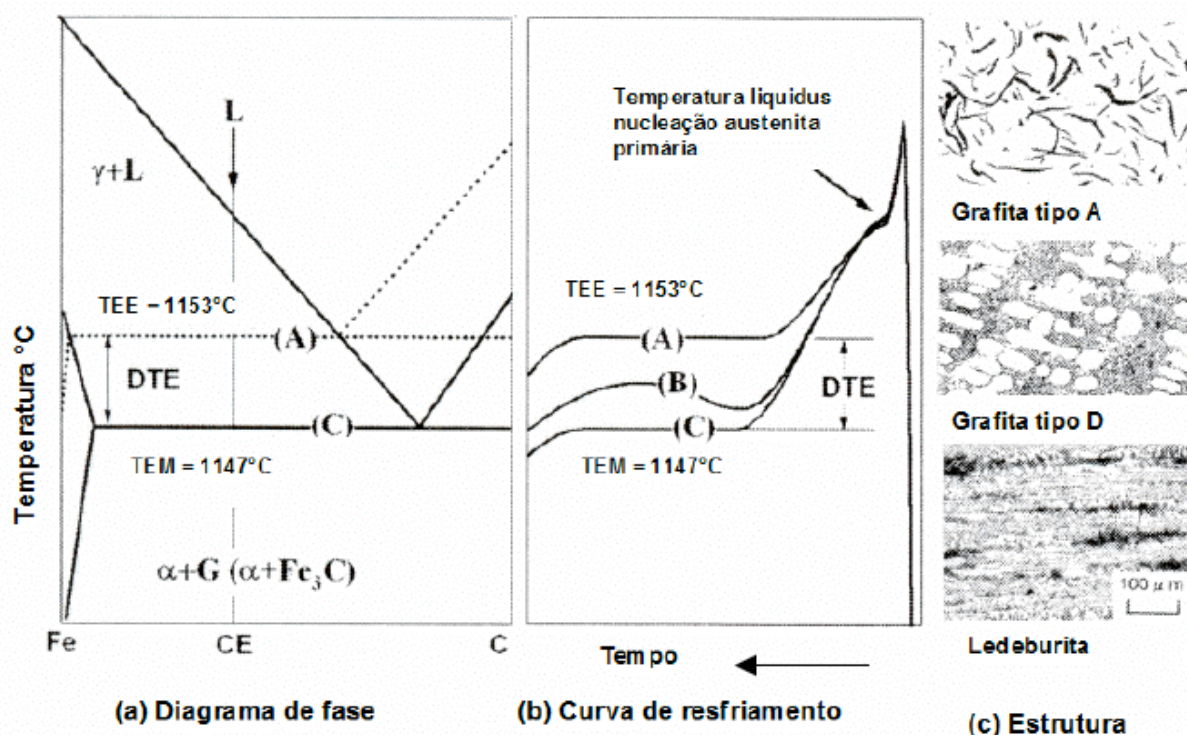


Fonte: Adaptado de Baldam e Vieira, 2014.

De acordo com Baldam e Vieira (2014) no ponto (a) é possível visualizar que a microestrutura é composta por austenita, na medida que o material resfria ocorre a formação de núcleos de ferrita α em torno da austenita γ (b). Na sequência estes núcleos continuam crescendo (c) até uma temperatura de aproximadamente 723°C . Por fim ocorrendo a transformação da austenita remanescente em ferro α e Fe_3C , ou seja, perlita (d).

Nas curvas de resfriamento representadas na Figura 4 é possível identificar que se a solidificação ocorrer acima da TEM² ocorrerá a formação de austenita mais carbono na forma livre (curvas A e B), o que resulta em uma morfologia de grafita do tipo A ou D, dependendo do grau de nucleação do banho e do superresfriamento.

Figura 4 - Curvas de resfriamento e microestrutura



Fonte: Kanno, 2005.

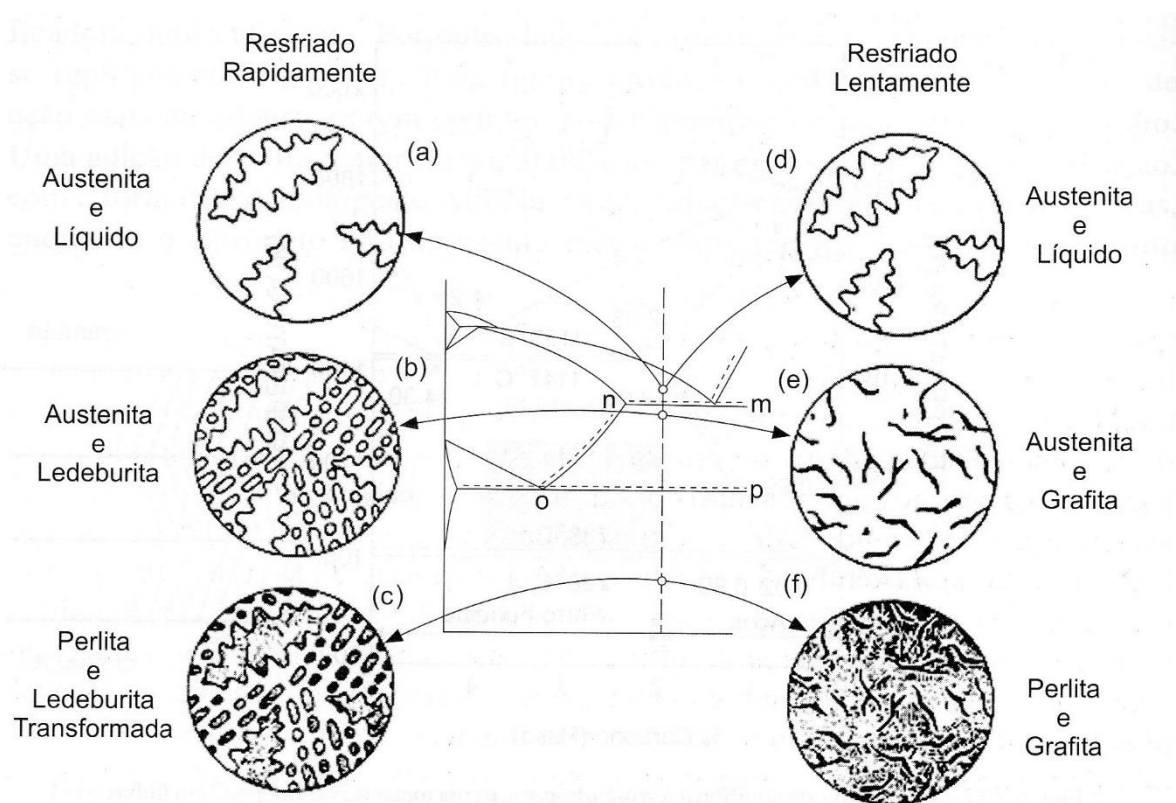
Portanto se a solidificação ocorrer abaixo da temperatura eutética metaestável consequentemente ocorrerá uma maior formação de austenita e cementita ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$), estrutura característica do ferro branco (ledeburita). Nota-se que a variação entre as temperaturas eutética do sistema estável e metaestável é de apenas 6°C (KANNO, 2005).

Adotando como exemplo uma liga hipoeutética, Figura 5, Garcia (2001) reforça que uma liga pode se solidificar em condições de equilíbrio estável, o que por sua vez proporcionaria a formação de Fe-Grafita (austenita + grafita), ou em uma

² TEM: Temperatura eutética metaestável.

condição metaestável, que por sua vez resultaria em Fe-Fe₃C (austenita + cementita).

Figura 5 - Solidificação de um ferro fundido hipoeutético



Fonte: Garcia, 2001.

Nota-se que se a liga solidificar muito abaixo do eutético, resulta na prevalência do crescimento Fe-Fe₃C, conhecida também como ledeburita. É importante salientar que são diversos os fatores que impactam no desenvolvimento da estrutura de um material, sendo o representado na Figura 5, a taxa de resfriamento. Com uma taxa de resfriamento rápida o resfriamento ocorrerá em uma condição metaestável, formando dendritas de austenita e ledeburita, portanto através de uma taxa de resfriamento baixa ocorre uma solidificação em condição estável.

De acordo com Baldam e Vieira (2014) os ferros fundidos são ligas ternárias, ou seja, são compostas de no mínimo três elementos (Fe-C-Si). Com base nesta premissa, não se pode fazer o uso do diagrama Fe-C de maneira direta, porém através de observações ao longo do tempo concluiu-se que existe uma certa relação entre alguns elementos químicos que influenciam o diagrama de fases. Portanto,

para se poder fazer o uso do diagrama de fases Fe-C deve-se trabalhar com um teor de carbono fictício, este teor é conhecido como carbono equivalente (CE) e pode ser definido da seguinte forma:

$$\%CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

O valor obtido para o %CE pode ser utilizado para a previsão do comportamento do ferro fundido durante sua solidificação. Com base nisto, assume-se como ponto eutético, para ligas estáveis, o carbono equivalente igual a 4,26%.

2.1.4 Composição química

Havendo algumas exceções a matéria prima básica utilizada em fundições é a sucata. Tanto em relação a concentração de elementos de liga quanto a presença de materiais importantes, há incerteza em sua composição. Pelo fato de a sucata ser o item com maior percentual no metal fundido, a fusão se torna um aspecto crítico das operações de fundição. Em sua grande maioria empresas de fundição não estão bem providas para trabalhar com grandes indicações de composição e presença de impurezas, portanto deve-se tomar medidas de controle como a utilização de sucata de qualidade, mas apesar de tomar essas precauções ajustes na composição de derretimento normalmente são necessários (KATZ, 1988).

As faixas de composição química dos cinco principais tipos de ferro fundido sem elementos de liga, de acordo com Chiaverini (2002), pode ser visualizada no Quadro 01.

Quadro 1 - Composição química dos ferros sem os elementos de liga

Tipo	Composição química (%)				
	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,80 - 3,60	0,50 - 1,90	0,25 - 0,80	0,06 - 0,20	0,06 - 0,20
Maleável	2,20 - 2,90	0,90 - 1,90	0,150 - 1,20	0,02 - 0,20	0,02 - 0,20
Cinzento	2,50 - 4,00	1,00 - 3,00	0,20 - 1,00	0,020 - 0,25	0,02 - 1,00
Nodular	3,00 - 4,00	1,80 - 2,80	0,10 - 1,00	0,01 - 0,03	0,01 - 0,10

Fonte: Adaptado de Chiaverini, 2002.

Observando o Quadro 1 nota-se que os percentuais apresentados para os ferros fundidos cinzentos e nodulares são semelhantes entre si. Sendo a grafita

esferoidal, característica dos ferros nodulares, obtida através da adição de elementos como o magnésio, cálcio, cério, lítio, sódio ou bário. O elemento mais utilizado é o magnésio, este atua como um inibidor que retarda a formação da grafita, o que provoca a solidificação do ferro cinzento em forma de cementita. Após a ação do magnésio a cementita se decompõe e isto provoca o desenvolvimento da grafita com um formato esférico. O autor ainda apresenta a composição química do ferro base utilizado para a produção de ferros fundidos nodulares, Quadro 2.

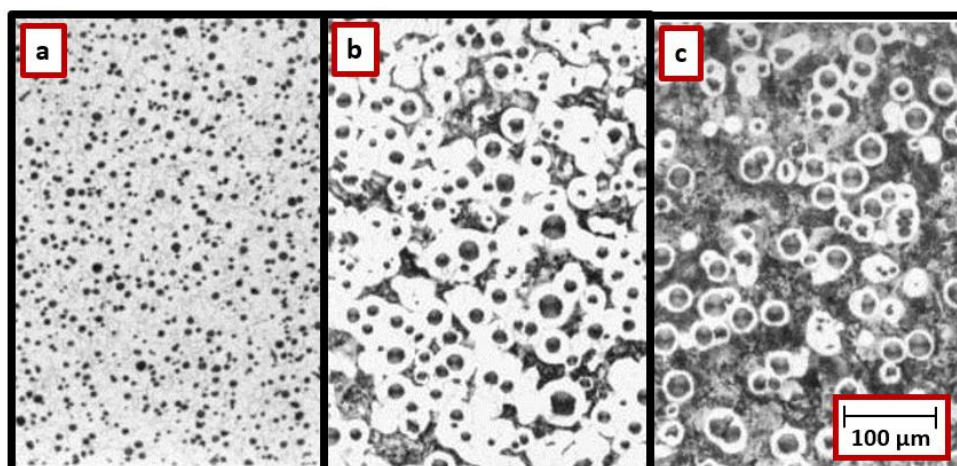
Quadro 2 - Composição base para ferros fundidos nodulares

Tipo	C %	Si %	P %	S %	Ni %	Cu %	Cr %	Mo %	Mn %	Sn %
1	4,0 máx.	1,7 – 2,8	0,10 máx.	0,01 máx.	1,0 – 3,0	1,5	0,3	0,3	0,25 – 0,5	0,10
2	4,0 máx.	1,6 – 2,8	0,10 máx.	0,01 máx.	0,5	0,15	0,1	0,01	0,30	0,02
3	4,0 máx.	2,5 máx.	0,05 máx.	0,01 máx.	0,8	-	-	-	0,20	-
4	4,0 máx.	2,1 máx.	0,03 máx.	0,01 máx.	-	-	-	-	0,10 máx.	-

Fonte: Adaptado de Chiaverini, 2002.

Dependendo das faixas de composição adotadas se obtém diferentes características estruturais nos ferros fundidos. As composições representadas no Quadro 2 resultam nas seguintes estruturas: Tipo 1 - Estrutura perlítica; Tipo 2 – Estrutura ferrítica-perlítica; Tipo 3 - Estrutura ferrítica; Tipo 4 - Estrutura ferrítica. As características de cada uma destas estruturas estão representadas na Figura 6.

Figura 6 - Microestruturas do ferro fundido nodular



Fonte: Adaptado de Radzikowska, 2004.

O item (a) da Figura 6 representa uma estrutura ferrítica com grafitas em forma de nódulos, sendo a ferrita as regiões claras da imagem. Por sua vez o item (b) representa uma estrutura ferrítica-perlítica também com nódulos de grafita, onde a perlita possui um tom escuro e de formato irregular. E por fim, no item (c), é possível visualizar a predominância de uma matriz perlítica, uma vez que o maior percentual da estrutura é formado por perlita. A ação de alguns elementos de liga sobre a estrutura do ferro fundido, podem ser visualizadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Efeitos dos elementos de liga sobre o ferro fundido

Elemento	Efeito durante a solidificação	Efeito durante a reação eutetóide
Alumínio	Forte grafitizante	Promove a formação de ferrita e grafita
Antimônio	Nas quantidades usadas pequeno efeito	Forte estabilizador da perlita
Boro até 0,15%	Forte grafitizante	Promove a formação da grafita
Boro acima de 0,15%	Estabilizado de carboneto	Forte tendência a retenção da perlita
Cromo	Forte ação carbonetante. Forma carbonetos complexos muito estáveis	Forte tendência a formação de perlita
Cobre	Grafitizante fraco	Promove a formação de perlita
Manganês	Fraca tendência carbonetante	Formador de perlita
Molibdênio	Fraca tendência carbonetante	Forte formador de perlita
Níquel	Grafitizante	Fraco promotor de perlita
Silício	Forte grafitizante	Promove a formação de ferrita e grafita
Telúrio	Forte tendência carbonetante, mas não estabilizadora	Muito fraco estabilizador da perlita
Estanho	Pequeno efeito na quantidade usada	Forte tendência na retenção da perlita
Titânio até 0,25%	Grafitizante	Promove a formação da grafita
Vanádio	Forte tendência carbonetante	Forte formador da perlita

Fonte: Adaptado de Chiaverini, 2002.

Os elementos presentes no Quadro 3 que promovem a formação de grafita aumentam a ductibilidade e a tenacidade do material. Estes reduzem a tendência da cementita se unir a ferrita o que resultaria na perlita. Por outro lado, os elementos que promovem a formação de perlita, aumentam a dureza do material, assim como sua resistência a tração e reduzem o seu alongamento.

2.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA NA FUNDIÇÃO DE METAIS

O uso de simulações numéricas no processo de fundição, de acordo com Oliveira e Galhardi (2016), teve suas primeiras tentativas no ano de 1970, nesta época, o método não foi bem recebido pelos profissionais, que alegavam já estar produzindo seus produtos com a maior qualidade possível e não precisarem de computadores para identificar os maiores desafios de um projeto. Contudo, atualmente a simulação numérica passou a ser reconhecida como uma ferramenta de suma importância no processo de fundição, sendo utilizada no desenvolvimento de produtos e na otimização de processos.

Em fundições de ferro o uso de simulações tornou-se um instrumento de grande importância, quanto a previsão da robustez e confiabilidade de processos, a utilização de simulações também permite a quantificação da influência dos elementos de liga, o comportamento da solidificação, previsão das estruturas locais, fases, propriedades mecânicas e tensões residuais. A utilização da tecnologia de simulação do processo de fundição tem sido útil na análise das propriedades dos materiais resultantes de duas maneiras:

- Na compreensão das possíveis causas dos problemas antes mesmo de realizar a fundição do item em desenvolvimento;
- Na compreensão profunda e quantitativa dos impactos físicos, metalúrgicos e químicos do processo.

A evolução das tecnologias CAE³ juntamente com as ferramentas de simulação possibilitam a otimização dos parâmetros de fundição e asseguram a sustentabilidade do negócio, no qual propõe uma vantagem técnica considerável sobre a concorrência. (STURM; BUSCH, 2011).

A simulação de fundição utiliza procedimentos de elementos finitos e dependendo da complexidade do problema fornece uma grande variedade de resultados. Estes se referem ao comportamento completo de um componente fundido durante seu processo de manufatura (RAO, 1992).

Devido à multiplicidade dos fatores que afetam a qualidade de peças fundidas e as interações complexas da física, metalurgia e geometria do item, o conhecimento empírico é a principal fonte sobre a qual a otimização de processos

³ CAE: *Computer Aided Engineering* (Engenharia assistida por computador).

de fundição é baseado. A simulação não diz o quão robusto o projeto em desenvolvimento será, a decisão sobre medidas para melhorar o sistema ou processo pode basear-se nos resultados da simulação, mas essencialmente exigem o entendimento e julgamento de quem está utilizando o *software*. Isto significa que uma melhoria contínua envolve “tentativa e erro” tanto na realidade quanto na simulação. (HAHN; STURM, 2010).

O objetivo final de simulações voltadas para fundição de materiais é se obter os valores que definem as suas propriedades mecânicas. Estas são muito dependentes da microestrutura, que é determinada pela química da liga e pelas condições do processo. A previsão pontual das propriedades mecânicas já pode ser obtida a partir de *softwares* de simulação e isto é essencial para a previsão da resistência e desempenho de componentes. Os resultados de microestrutura unem cálculos termodinâmicos com resultados de distribuição térmica e de fluxo de metal. Quanto a composição química, módulos de cálculos de microestrutura detectam automaticamente as fases que vão se manifestar e o tipo de microestrutura que deve ser calculado. Dependendo da liga metálica resultados como o tamanho do grão, fração eutética, número de nódulos, assim como a fração de perlita e ferrita, podem ser visualizados. Estes cálculos microestruturais são utilizados para prever quais serão as propriedades mecânicas finais tanto do ferro fundido nodular quanto para o cinzento (CAMANHO, 2012).

A introdução da simulação por computador em processos industriais pode economizar custos e tempo, validando o método de fundição pretendido antes que qualquer metal derretido seja realmente derramado (BEELEY, 2001), pois esta proporciona um campo de experimentações virtuais que reduzem a necessidade da utilização do método empírico de “tentativa e erro” que ainda é tradicionalmente aplicado em projetos de fundição, porém é um processo lento e de alto custo, devido às diversas mudanças realizadas em ferramentais (OLIVEIRA; GALHARDI, 2016).

2.2.1 MAGMASOFT®

O MAGMASOFT® é uma ferramenta de simulação numérica desenvolvida pela empresa alemã Magma *Gießereitechnologie*⁴ *GmbH*⁵ que tem como objetivo

⁴ *Gießereitechnologie*: Tecnologia de fundição.

melhorar a qualidade do processo de fundição, além de reduzir custos de produção. Possibilitando a implementação de produtos e processos metódicos através de estudos de correlações entre parâmetros de produção e características qualitativas. Dentre as aplicações do *software* pode-se destacar a previsão do comportamento do metal durante o enchimento do molde, sua solidificação e tendência na ocorrência de defeitos de qualidade, além de permitir a avaliação de tensões residuais e distorções, bem como a microestrutura e a distribuição das propriedades mecânicas da peça. A integração do *software* em ambientes CAE proporciona o conhecimento sistemático de todas as variações e dependências do processo de fabricação, além de possibilitar a avaliação de riscos por meio da validação virtual de acordo com os requisitos do produto antes da aprovação do projeto (MAGMA, 2018b).

Para a realização dos cálculos, o MAGMASOFT[®] faz o uso do método dos volumes finitos, onde, segundo Vaz (2015), as equações aproximadas são obtidas a partir da integração de equações diferenciais em um volume de controle de geometria conhecida, utilizando um conjunto de malhas estruturadas. Estas equações são resolvidas com o objetivo de solucionar balanços de massa, energia e quantidade de movimento em um volume de meio contínuo. “Como em um caldeirão, ciência, tecnologia e experiência de várias áreas convergem na indústria de fundição. MAGMA é uma central ligação entre esses mundos” (MAGMA, 2018a).

2.2.2 Descrição geométrica e discretização

É de grande importância que o fornecimento da geometria tridimensional e suas condições de limite sejam corretamente especificadas antes de ser realizado qualquer tipo de simulação. Portanto ao se tratar de um modelo é necessário definir adequadamente o domínio, equações e regiões de controle, e isto se dá devido a discretização do modelo, que seria a divisão deste em pontos onde as soluções do sistema serão obtidas, este conjunto de pontos definem a malha computacional. As soluções numéricas representativas do sistema resultam em conjuntos de equações algébricas que devido aos limites de controle são modificadas para perto das fronteiras, então juntamente com as condições iniciais predefinidas do sistema é especificado como o problema deve ser tratado. Após esta operação as equações

⁵ *Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH): Sociedade com responsabilidade limitada, equivalente a Ltda.*

são resolvidas e então o usuário pode extrair as informações de seu interesse. A comparação destes resultados com dados experimentais é de grande importância para se realizar o ajuste do modelo matemático até que uma aproximação que reflita os fenômenos físicos do problema seja obtida. (FORTUNA, 2000).

Ainda de acordo com Fortuna (2000) quanto maior for o número de elementos que constituem a malha, mais fiel à realidade será os resultados obtidos, conseqüentemente o custo computacional será maior, ou seja, o tempo necessário para a realização dos cálculos. E no caso de problemas tridimensionais como naqueles que fazem uso de volumes finitos, há um aumento de oito vezes no custo computacional ao se dobrar o número de elementos da malha, além do aumento de custos adicionais como a maior demanda de memória de acesso aleatório (RAM) e o aumento do espaço ocupado no disco rígido (HD).

2.2.3 Princípio de cálculo

O *software* utilizado no desenvolvimento deste trabalho utiliza como princípio de cálculo as equações de Navier-Stokes. De acordo com Hall (2015) as equações descrevem a relação entre temperatura, densidade, pressão e velocidade de um fluido. Derivadas no ano de 1800 por G. G. Stokes e M. Navier formam um conjunto de equações diferenciais complexas em sua resolução. Estas são utilizadas através de diversas técnicas computacionais como por exemplo: diferenças finitas, elementos finitos, métodos espectrais e volumes finitos, sendo este último o método utilizado pelo *software* MAGMASOFT® para descrever a dinâmica de fluidos computacionais (CFD). As mesmas consistem em 5 equações que dependem do tempo, sendo: uma equação de continuidade destinada a conservação de massa, três equações relacionadas a conservação do momento e uma à conservação de energia.

$$\text{Continuidade: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

$$\text{Momento em x: } \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

$$\text{Momento em y: } \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

$$\text{Momento em z: } \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

$$\text{Energia: } \frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{RePr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{\partial x} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{zy} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right]$$

Ainda segundo Hall (2015) as variáveis independentes são: x , y e z que representam as coordenadas espaciais de domínio e t representa o tempo. As variáveis dependentes são: a pressão representada por p , densidade ρ e temperatura T . Também estão presentes três componentes de velocidade vetorial: u na direção x , v na direção y e w na direção z . dentro deste contexto todas as variáveis dependentes são funções dependentes de todas as variáveis independentes. Portanto estas equações se classificam como equações diferenciais parciais. O parâmetro de semelhança que relaciona a escala de inércia do fluxo e as forças viscosas é representado por Re , os componentes de fluxo de calor são descritos pela letra q , Pr é o número de Prandtl que relaciona as tensões viscosas e as tensões térmicas e a variável τ representa a tensão.

Segundo Fortuna (2000) estas equações podem representar o escoamento de fluidos compressíveis, incompressíveis, laminares e turbulentos. Através de conceitos físicos como conservação de massa, segunda lei de Newton onde a resultante das forças que atuam em um fluido é igual a taxa de variação temporal de seu momento, e a primeira lei da termodinâmica, que define que a variação temporal da energia se iguala a soma do fluxo líquido de calor para o fluido através do trabalho realizado sobre o mesmo.

Fortuna (2000) cita que devido um elemento de fluido conter grandes moléculas em quantidades consideráveis para que propriedades individuais de moléculas não afetem as propriedades macroscópicas do mesmo. Estes elementos podem ter o seu escoamento definido por propriedades macroscópicas como: velocidade, densidade, pressão e temperatura, todos em relação a coordenadas temporais. Neste contexto são os valores médios referentes as moléculas do fluido em estudo que são representados durante os cálculos.

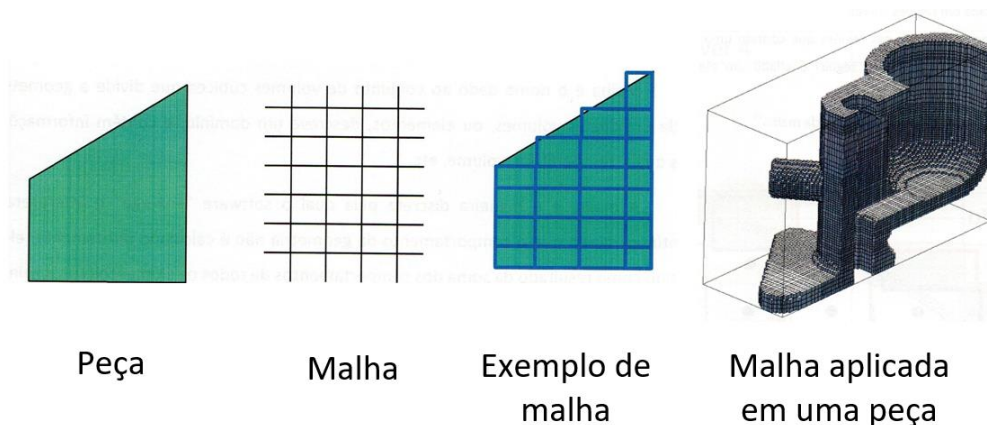
2.2.4 Volumes finitos

O método de volumes finitos está essencialmente ligado a conceitos de fluxo entre regiões, estes fluxos podem ser descritos por grandezas como massa e energia que atravessam uma unidade de área em relação ao tempo. A aplicação

deste método permite escrever equações de diferenças finitas (FORTUNA, 2000). Durante a geração da malha computacional o *software* MAGMASOFT® faz o uso deste método.

Para MAGMA (2015) a malha se trata de um conjunto de volumes cúbicos que divide uma geometria. Sendo que cada um destes volumes, ou elementos, descreve um domínio e contém informações como: temperatura, volume, entre outros. O comportamento da geometria não pode ser calculado de maneira direta, portanto os cálculos são obtidos a partir da somatória dos comportamentos de todos os elementos de malha que constituem tal geometria. Cada volume presente na malha computacional possui uma grandeza de alguns milímetros, levando em consideração que alguns fenômenos de fundição possuem ordem de décimos de milímetros os volumes finitos gerados pelo programa atendem de maneira satisfatória as descrições dos fenômenos decorrentes do processo de fundição. A representação da sobreposição dos elementos de malha em uma geometria, assim como a aplicação da malha em uma peça podem ser visualizadas na Figura 7.

Figura 7 - Sobreposição da malha computacional em uma geometria



Fonte: MAGMA, 2015.

É importante ressaltar que durante a geração de uma malha computacional cada direção da geometria a ser descrita deve possuir ao menos dois elementos, sendo indicado como ideal três elementos. Isto possibilita cálculos mais assertivos e uma melhor descrição da geometria. O procedimento indicado para a geração de uma malha computacional de acordo com MAGMA (2015) está representado em forma de fluxograma no Anexo B.

2.2.5 Verificações em simulações

"Não se deve aceitar cegamente os resultados numéricos fornecidos pelo computador; ao contrário, os mesmos devem ser sempre analisados em relação à física do problema" (FORTUNA, 2000, p. 37). Os resultados fornecidos por *softwares* podem ser visualmente plausíveis, mas fisicamente incompatíveis.

Há duas etapas presentes na avaliação de um simulador, a primeira delas é a verificação que é representada por equações e determina o grau de implementação do modelo em estudo, os valores são comparados a soluções que podem ser analíticas, numéricas ou experimentais. Esta busca estimar a confiabilidade do processo perante a resolução do problema e verifica se o programa e o modelo são consistentes entre si. A segunda trata-se da validação que quantifica o grau de representatividade do modelo quando comparado ao fenômeno real. Mesmo sendo complexo, este processo é mais simples que a verificação já que se trata apenas da identificação do grau de fidelidade que o modelo em uso representa quando comparado a situação real. Através da aplicação destes se garante que a partir de testes realizados com combinações de fenômenos físicos o simulador irá fornecer resultados compatíveis ao que se encontra em uma situação real. Neste sentido o *software* de simulação deve ser considerado uma ferramenta onde a qualidade dos resultados depende da maneira como esta é utilizada. (FORTUNA, 2000 *apud* AIAA,1998).

2.3 ENSAIOS APLICADOS EM FERROS FUNDIDOS.

2.3.1 Metalografia microscópica

A metalografia microscópica foi desenvolvida por Henry Clifton Sorby em Sheffield, Inglaterra no ano de 1863. Nesta época análises químicas já eram praticadas, mas foi Henry C. o primeiro a polir uma superfície metálica para realizar uma análise microscópica. Primeiramente o seu intuito era ajudar em estudos de meteoritos, mas ao longo do tempo o método se tornou muito mais importante no ramo industrial, pois permitiu que fundidores aumentassem o seu conhecimento em análises químicas, o que na época era bastante superficial (SIMPSON, 1948).

De acordo com Colpaert (1974) a micrografia de metais ou metalografia microscópica possui como objetivo o estudo de produtos metalúrgicos através da

utilização de um microscópio, visando determinar os constituintes presentes no material em estudo. De modo geral os metais são constituídos de agregados cristalinos, estes cristais também são conhecidos como grãos. Os mesmos podem ter aspectos diferentes que dependem das particularidades do material e por esse motivo podem ser chamados de nódulos, veios, agulhas, glóbulos, entre outros. O estudo em questão é realizado em corpos de prova previamente polidos e em geral atacados por um reativo adequado. Esta técnica tem como objetivo tornar visível a textura microscópica do material tornando evidente os diversos grãos de que ele é formado. E assim pode-se apreciar a sua natureza, seus percentuais, dimensões, arranjos e formato. A interpretação destes dados é o que constitui de fato o exame micrográfico dos metais.

2.3.2 Ensaio de resistência à tração

O ensaio de resistência a tração é classificado como um ensaio de tensão-deformação, os resultados deste tipo de ensaio podem ser utilizados durante a seleção de materiais destinados a aplicações de engenharia. Propriedades de tração normalmente são verificadas durante o desenvolvimento de novos materiais e processos, assim como na previsão do comportamento de um material quando exposto a diferentes tensões uniaxiais e na obtenção de um valor de tensão máxima que um determinado material pode suportar, este tipo de ensaio também pode fornecer valores relacionados as propriedades elásticas dos materiais (RAVIS, 2004).

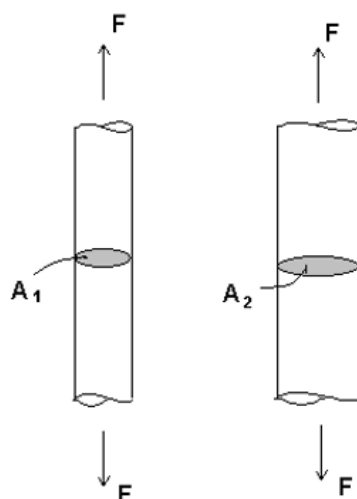
O ensaio de resistência a tração consiste em deformar uma amostra, normalmente até a sua ruptura, através de uma força gradativamente aplicada de maneira uniaxial ao longo de um eixo denominado corpo de prova. A máquina que realiza este ensaio é projetada para alongar o corpo de prova em uma taxa constante e realizar a medição da carga aplicada de maneira simultânea. O resultado deste ensaio é registrado por um computador correlacionando a força e o alongamento gerado no material (CALLISTER, 2000).

De acordo com a NBR 6152 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002) a tensão (σ) equivale a uma força, dividida pela área da seção transversal do corpo de prova no qual é aplicada, Figura 8. A norma também especifica outras definições importantes em ensaios de tração, dentre elas:

- Tensão de escoamento: Caracteriza-se pela deformação plástica que ocorre em um material sem nenhum incremento de força;
- Alongamento: Aumento no comprimento do corpo de prova durante qualquer ponto do ensaio;
- Resistência a tração: Tensão correspondente a maior força que o corpo de prova pode suportar durante o ensaio, após ultrapassar o ponto de escoamento.

Normalmente os corpos de prova utilizados em ensaios de resistência à tração são obtidos pela usinagem de amostras que podem ter sido retiradas do produto, forjadas ou até mesmo fundidas. A seção destes podem ser quadradas, retangulares, anelares, circulares ou possuir algum formato especial.

Figura 8 - Representação esquemática da tensão



Fonte: Bayer, 2013.

A tensão (σ) representada na Figura 8 possui característica axial e é uniformemente distribuída sobre as áreas (A_1 e A_2) pela ação das forças (F). A unidade utilizada em sua representação é o Pascal (Pa).

2.3.3 Ensaio de dureza

As informações fornecidas pelos testes de dureza estão diretamente correlacionadas à resistência a tração e ao desgaste, juntamente com propriedades como a ductibilidade do material entre outras propriedades. Este teste é muito útil no

monitoramento de qualidade e no auxílio da escolha de materiais (ZIPPERIAN, 2011). Os diversos tipos de testes de dureza e suas características podem ser visualizados no Quadro 4.

Quadro 4 - Testes típicos de dureza

Tipo de ensaio	Penetração	Faixa típica de carga (kgf)	Aplicações
Rockwell C	Cone de diamante	150	Testes de produção e peças finalizadas
Rockwell B	Esfera de aço 1/6"	100	Testes de produção e peças finalizadas
Rockwell superficial	Esfera de aço ou cone de diamante	15, 30 e 45	Materiais frágeis e finos
Brinell	Esfera de aço Ø10 mm	500 - 3000	Testes de produção e peças inacabadas
Vickers	Pirâmide de diamante	5 - 100	Análise laboratorial
Microdureza	Pirâmide de diamante	0,01 - 50	Testes microconstituintes em ligas e cerâmica

Fonte: Adaptado de Zipperian, 2011.

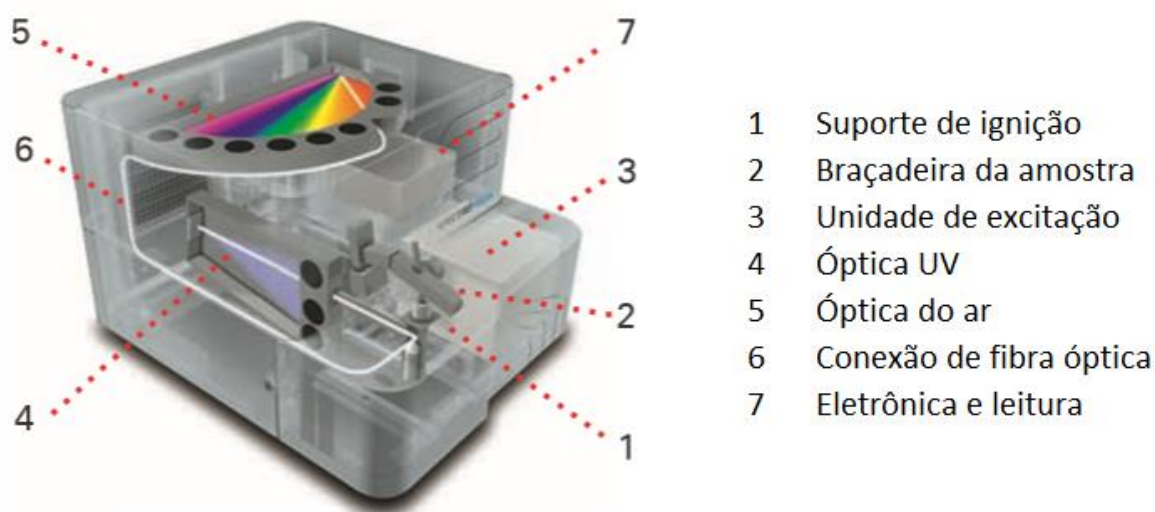
Durante o processo de fundição de ferros fundidos o teste de dureza mais utilizado é o Brinell, devido este ser indicado para peças inacabadas e testes durante a produção. Zipperian (2011) ainda destaca que durante a determinação de uma dureza Brinell é feito o uso de uma esfera de aço com Ø10 mm como penetrador. Esta esfera exerce uma força de aproximadamente 3000 kgf sobre o material em análise, em materiais mais macios esta força é menor, ainda pode-se utilizar uma esfera de carboneto de tungstênio em materiais de maior dureza. A dureza Brinell pode ser convertida em valores que representam a resistência a tração, porém esta prática se baseia apenas em valores empíricos.

2.3.4 Ensaio de espectrometria

O ensaio de espectrometria é realizado com a utilização de um analisador de espectrometria de emissões óticas, também conhecido como espectrômetro, este ensaio é utilizado principalmente para o controle de processos de fundição. Através de um analisador é possível verificar de maneira eficaz todos os componentes presentes em materiais metálicos assim como seus respectivos percentuais (SPECTRO, 2018b).

Durante o ensaio, representado na Figura 16, a amostra do material é submetida a uma descarga elétrica dentro da unidade, Figura 9. Nesse processo, os átomos e íons liberados são excitados e emitem luz. Essa luz é direcionada dentro do sistema óptico e mensurada através de um detector eletrônico sensível que realiza a conversão de luz em cargas elétricas (SPECTRO, 2005).

Figura 9 - Analisador de espectrometria de emissões óticas



Fonte: Adaptado de SPECTRO, 2018a.

Os dados de calibração do analisador são armazenados em sua unidade de memória. Os valores de medida são comparados com esses dados e por fim estes são convertidos em concentrações e então exibidos na tela onde é possível identificar os constituintes e seus respectivos percentuais do material analisado.

3 METODOLOGIA

“A metodologia é a aplicação de procedimentos e técnicas que devem ser observados para construção do conhecimento, com o propósito de comprovar sua validade e utilidade nos diversos âmbitos da sociedade” (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 14).

Do ponto de vista dos objetivos este trabalho se enquadra no método exploratório. Este método tem como foco proporcionar uma familiaridade maior com o problema em estudo e desta maneira o tornar mais explícito. Este tipo de pesquisa possui um planejamento bastante flexível que possibilita a consideração de aspectos variados ao fenômeno em estudo. Em sua grande maioria esta linha de pesquisa está relacionada com estudos de caso e pesquisas bibliográficas (GIL, 2002). De acordo com Prodanov e Freitas (2013) quando este método se encontra em fase preliminar ele possui como finalidade proporcionar maiores informações referente ao assunto que será investigado, possibilitando assim sua melhor definição e delineamento. Para Cervo *et al* (2006) este método visa oferecer informações sobre o objeto em estudo e orientar a formulação de hipóteses.

Devido este estudo fazer o uso de um *software* de simulação e trabalhar com um grande número de dados. A abordagem deste trabalho pode ser caracterizada como quali-quantitativa. Pelo fato de a interpretação dos resultados gerados e a formação de hipóteses serem feitas sem o auxílio deste. “Estudos quanti completados por estudos quali podem fornecer maior potencial de interpretação dos fenômenos, principalmente ao agregar a percepção dos indivíduos no desenho de pesquisa” (KIRSCHBAUM, 2013, p.188).

O método de abordagem desta pesquisa pode ser descrito como hipotético-dedutivo. Este método é utilizado quando as informações disponíveis sobre um determinado tema são insuficientes para a explicação de um fenômeno específico, portanto, são formadas hipóteses e destas se deduz consequências que se confirmarão ou irão se demonstrar falsas. Quando estas hipóteses não se caracterizam como falsas, as mesmas se demonstram válidas, mas isto não descarta a possibilidade de surgir um novo fator que as invalide. (GIL, 2008).

Com base nos procedimentos técnicos este trabalho se caracteriza como estudo de caso. De acordo com Gil (2002) um estudo de caso tem como foco a explicação das causas de um determinado fenômeno e a identificação dos possíveis

fatores que o influenciam ou são influenciados por ele. Prodanov e Freitas (2013, p.60,) complementam afirmando que este procedimento pode ser descrito como “um tipo de pesquisa qualitativa e/ou quantitativa, entendido como uma categoria de investigação que tem como objeto o estudo de uma unidade de forma aprofundada [...]”.

A determinação dos fatores anteriores se justifica pelo fato de que durante o desenvolvimento deste trabalho foram realizados ensaios mecânicos e microestruturais em corpos de prova de ferro fundido nodular. Também foram realizadas simulações numéricas em um *software* voltado para processos de fundição de metais, onde foram alterados os percentuais dos componentes químicos que constituem o material de estudo a fim de visualizar o efeito de cada componente em suas características. Após isto realizou-se a análise dos dados obtidos nos ensaios e nas simulações.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Para a realização do presente trabalho primeiramente foi realizada uma coleta de dados, onde verificou-se a composição química do material de estudo com a utilização de um analisador de espectrometria de emissões óticas. Em seguida, ensaios mecânicos foram realizados a fim de analisar a resistência a tração, resistência ao escoamento e o alongamento do material, e por fim, executada a análise metalográfica do mesmo, buscando relatar suas características microestruturais. Munido das informações necessárias efetuou-se então uma simulação de correlação entre o *software* MAGMASOFT® e as condições fabris do local de estudo. Tendo o *software* ajustado as condições do processo fabril foi possível se ter uma maior segurança quanto os resultados gerados pelo mesmo em futuras simulações. Posteriormente foi feita a verificação dos efeitos causados nas propriedades mecânicas do ferro fundido GGG40 perante a variação percentual dos principais elementos que o constituem. Nos tópicos a seguir, são descritos de maneira mais detalhada todo o procedimento realizado neste trabalho.

3.1.1 Correlação entre o *software* e o ambiente fabril

Para fins de validação do *software* MAGMASOFT® é necessário realizar um procedimento denominado correlação, para que este possa fornecer resultados

coerentes com o que ocorre em condições industriais. A correlação consiste na comparação entre os resultados demonstrados pelo *software* e os resultados obtidos através de ensaios realizados em corpos de prova do material em análise.

Durante a realização deste estudo se fez o uso do *software* de simulação numérica MAGMASOFT[®] versão 5.4 módulo MAGMA *iron*. Este módulo é destinado exclusivamente para processos de fundição de ferro cinzento, vermicular e nodular, sendo estes pertencentes à fundição em coquilha ou areia (*cold box* ou verde).

As variáveis do *software* a serem ajustadas a fim de possibilitar a compatibilidade entre os resultados obtidos nas simulações numéricas e os encontrados na fábrica, quanto as propriedades mecânicas, microestruturais e tendência a falhas (porosidades) são:

- Tratamento do banho metálico (*Melt treatment*): Parâmetro que define o método de inoculação utilizado no banho metálico, no MAGMASOFT[®] este tem característica qualitativa e é subdividido em três níveis: Pobre (*Fair*), bom (*Good*) e muito bom (*Very good*). Estes valores se referem ao efeito da inoculação na microestrutura final do item;
- Rendimento do tratamento (*Treatment Yield*): O rendimento do tratamento se trata de um multiplicador do tratamento do banho metálico, ou seja, o valor atribuído a ele irá aumentar ou reduzir a efetividade da inoculação. Para este parâmetro se utiliza valores percentuais.

Para a realização do procedimento de correlação se faz necessário o fornecimento de dados de entrada (*inputs*), estes são considerados pelo *software* como parâmetros iniciais a serem respeitados. Para o processo de correlação são considerados os seguintes *inputs*:

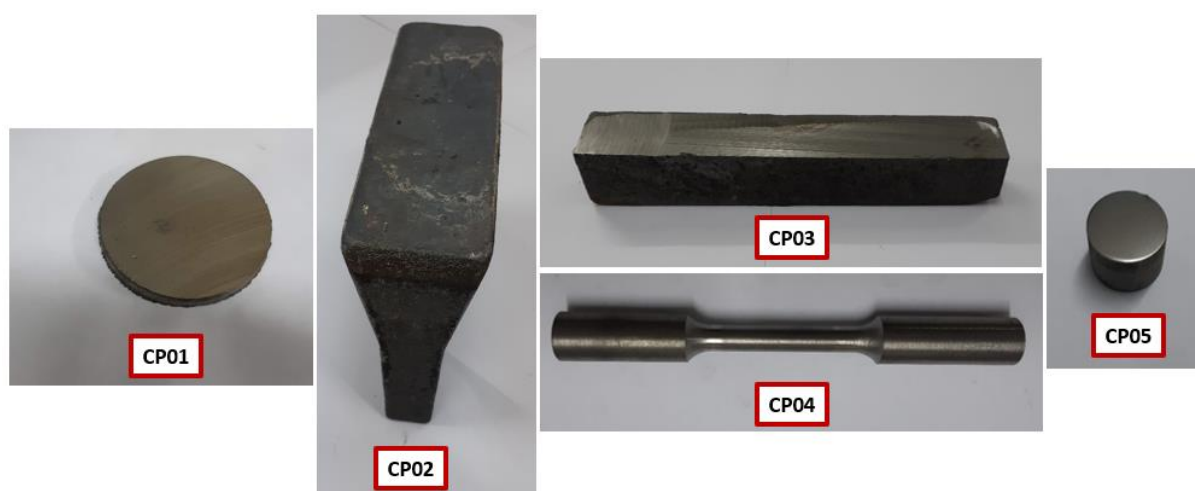
- Temperatura inicial de vazamento;
- Composição química utilizada.

Além dos dados de entrada devem ser fornecidos ao *software* alguns valores objetivos, para que o mesmo consiga identificar as condições fabris como uma situação ideal, os valores objetivos são adquiridos através de ensaios realizados em corpos de prova. Os seguintes valores objetivos foram considerados para a realização da correlação do *software* com as condições industriais:

- Resistência a tração;
- Resistência ao escoamento;
- Alongamento;
- Dureza Brinell;
- Número de nódulos por mm^2 ;
- Percentual de ferrita;
- Percentual de perlita.

Os corpos de prova utilizados para a obtenção dos dados de entrada, podem ser visualizados na Figura 10.

Figura 10 - Denominação dos corpos de prova utilizados



Fonte: O autor, 2018.

O corpo de prova CP01 é utilizado no ensaio de espectrometria e obtido através de uma amostra retirada do forno durante o processo de obtenção do metal base. O corpo de prova CP02 é a matéria prima dos corpos de prova CP03, CP04 e CP05. Este é adquirido através do processo de fusão do metal e seu preenchimento em moldes.

O item CP03 é usado durante a realização de ensaios de dureza, este é adquirido através de um corte longitudinal realizado no corpo de prova CP02. O corpo de prova CP04, obtido pelo processo de usinagem do corpo de prova CP03, destina-se aos ensaios de resistência mecânica. E por fim o corpo de prova CP05, resultante de um corte transversal realizado no corpo de prova CP04, este é utilizado durante o ensaio de metalografia.

3.1.1.1 Obtenção do metal base

Para a obtenção do metal base a ser utilizado na manufatura dos corpos de prova, se fez o uso de um forno de indução Stelltherm (SERV THERM) com capacidade para 2200 kg. Neste foram adicionadas as matérias primas para o ferro fundido nodular GGG40, a relação destas assim como a quantidade utilizada estão representadas no Quadro 5. Para a realização deste procedimento os materiais foram adicionados ao forno de acordo com o processo padrão da empresa onde o estudo foi realizado.

Quadro 5 - Matéria prima para a obtenção do metal base

Matéria prima	Quantidade
Canal de retorno	16% a 61%
Ferro gusa	4% a 10%
Grafite	0% a 5%
Silício	0% a 2%
Sucata de aço	35% a 80%

Fonte: O autor, 2018.

Após todo o metal estar em estado líquido e em uma faixa de temperatura entre 1450°C e 1500°C, adicionou-se escorificante no mesmo, este realiza a aglomeração da escória presente no metal, tornando possível o seu descarte. Mantendo o metal base dentro dos limites estipulados no Quadro 5 é possível garantir as normativas do material, é importante ressaltar que esta faixa de valores sofre alterações de empresa para empresa e de acordo com o processo utilizado por ela.

A próxima etapa consiste no procedimento de nodularização. Para a sua realização, foi adicionado a um recipiente denominado panela de nodularização 1,6% de magnésio sobreposto por respingos de ferro (valores relacionados com a capacidade máxima do recipiente). Após adicionados estes materiais foi derramado o metal líquido (diretamente do forno) para este recipiente. O contato do metal com o magnésio efetiva o processo de nodularização, sendo os respingos utilizados apenas como um meio de retardar a perda do magnésio no decorrer do processo. Durante a transferência do metal da panela de nodularização para as panelas de vazamento, ocorre a inoculação, que consiste na adição de inoculante sobre o jato

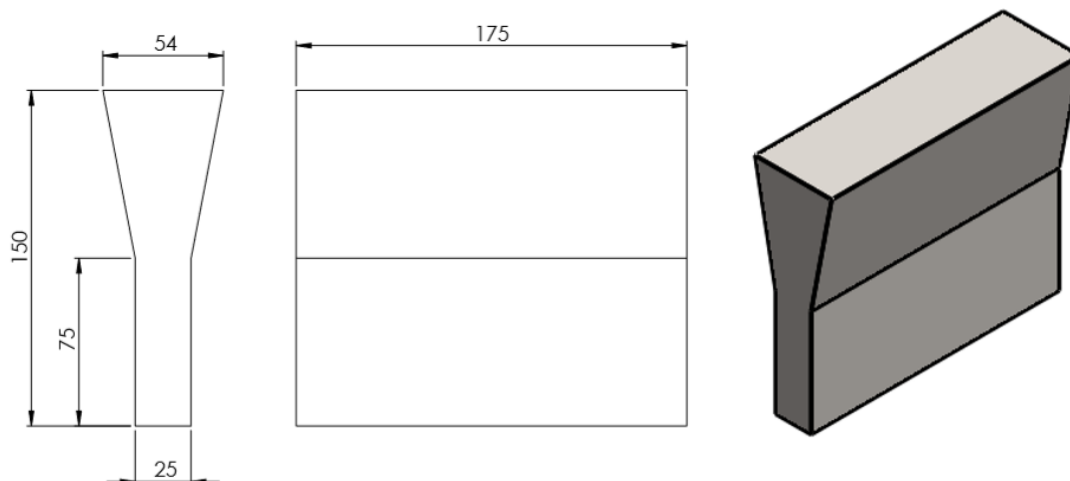
de metal, este tem como objetivo aumentar a nucleação da liga fundida e melhorar suas propriedades mecânicas através do refinamento e dispersão do grafite. Por fim realiza-se a transferência do metal em moldes, onde este permanece até a sua solidificação. O forno de indução assim como os materiais utilizados na obtenção do metal base podem ser visualizados no Apêndice A.

3.1.1.2 Manufatura do corpo de prova CP02

Os corpos de prova adequados para o ferro fundido GGG40, segundo a norma ASTM⁶ A536 (2009), são do tipo “Y”. Suas características geométricas assim como suas medidas em milímetros podem ser observadas na Figura 11.

Este tipo de corpo de prova possui uma região superior que é responsável pela alimentação do mesmo durante o processo de solidificação, ou seja, esta região proporciona a sanidade da área útil do corpo de prova. A partir da região útil, delimitada na Figura 11 com as medidas de 75 mm x 25 mm x 175 mm, são obtidos os corpos de prova subsequentes (CP03, CP04 e CP05) para a realização dos ensaios necessários durante o processo de correlação.

Figura 11 - Corpo de prova para ferros fundidos nodulares – CP02



Fonte: O autor, 2018.

Para a manufatura dos corpos de prova do tipo “Y” (CP02) devem adotadas as mesmas condições usadas durante a produção de peças fundidas. Os moldes

⁶ ASTM: *American Society testing and materials*.

utilizados para a fabricação destes corpos de prova foram confeccionados pelo processo de macharia Flexicore em uma máquina sopradora Vick SPM – Flexicore de 15 litros, Figura 12.

Figura 12 - Máquina Sopradora Flexicore



Fonte: VICK, 2018.

O processo de macharia Flexicore consiste no enchimento de cavidades, presentes em ferramentais com as geometrias do molde desejado. Essas cavidades são preenchidas com uma mistura de resina e areia de granulometria entre 52 AFS⁷ à 62 AFS. Após esse processo um dispositivo denominado gaseificador é acionado, este faz a introdução de catalizador dentro do molde, dando a ele a rigidez necessária. O molde para a manufatura do corpo de prova do tipo “Y” pode ser visualizado na Figura13.

⁷ AFS: Unidade representativa do módulo de finura da areia.

Figura 13 - Molde em areia confeccionado pelo processo Flexicore



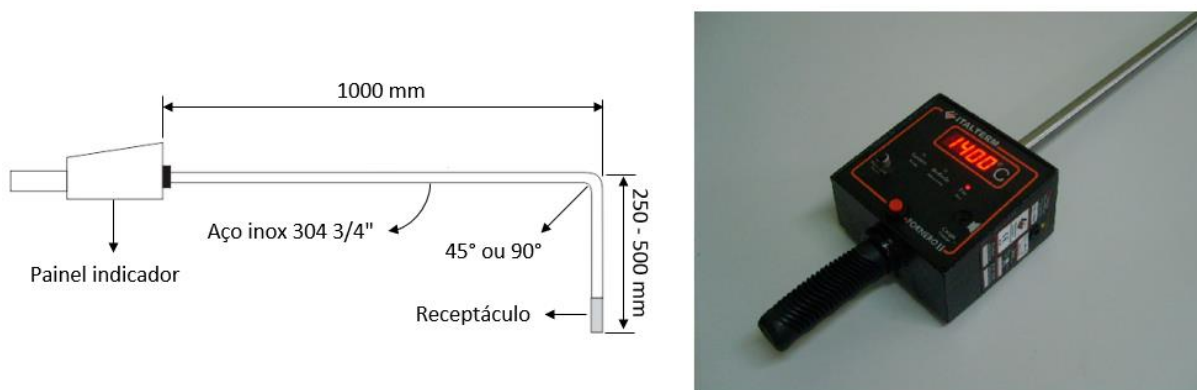
Fonte: O autor, 2018.

A facilidade durante o processo de desmoldagem de moldes do tipo Flexicore é decorrente da degradação do mesmo que é estimulada pelo calor proveniente do contato da resina e o catalisador com o metal em altas temperaturas. Este contato irá queimar os elementos que dão rigidez ao molde, facilitando o processo de desmoldagem.

3.1.1.3 Definição da temperatura inicial de vazamento

Para a obtenção da temperatura inicial de vazamento, realizou-se o acompanhamento do processo de manufatura dos corpos de prova CP02. A medição da temperatura foi realizada com o auxílio de um pirômetro de imersão, Figura 14. Este é composto por um sensor de temperatura e um painel indicador ligados por uma haste em inox. Este tipo de equipamento é muito utilizado em fundições devido a possibilidade de medir temperaturas em qualquer parte do processo.

Figura 14 - Pirômetro de imersão



Fonte: Adaptado de Italterm, 2018.

A fonte de energia utilizada neste equipamento é proveniente de baterias recarregáveis de Ni-MH⁸. A verificação da temperatura do metal é realizada antes do vazamento, diretamente na panela de vazamento, para isto o termopar tipo “S” (receptáculo) localizado na extremidade do pirômetro é imerso no metal líquido e aguarda-se a estabilização da leitura no *display* do painel que leva aproximadamente seis segundos (ITALTERM, 2018).

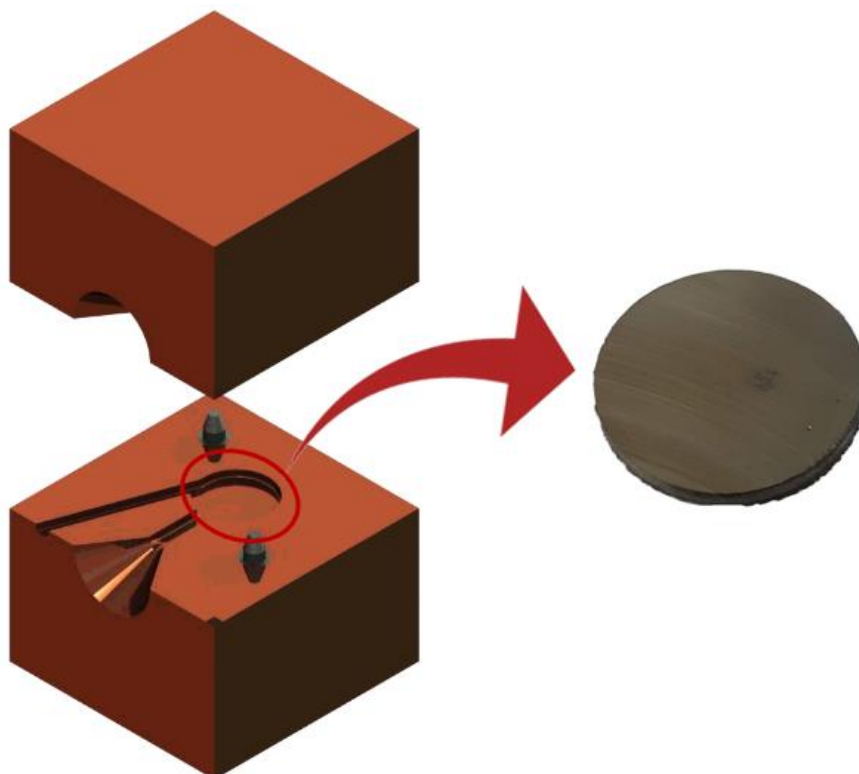
Após a realização das medições foi definida como temperatura inicial de vazamento o valor de 1392°C.

3.1.1.4 Determinação da composição química utilizada

Para a obtenção da composição química a ser utilizada na correlação entre o *software* e as condições fabris. Uma amostra de metal líquido é posta em um dispositivo denominado coquilha. Este dispositivo é manufaturado em cobre eletrolítico, que possui as características necessárias para proporcionar a solidificação do metal em uma alta taxa de resfriamento, gerando o corpo de prova CP01, utilizado para o ensaio de espectrometria, Figura 15. Este corpo de prova possui uma microestrutura coquilhada, característica necessária para a verificação de sua composição química. Após sua obtenção, o mesmo é lixado em uma retífica a fim de dar o acabamento superficial necessário para o ensaio.

⁸ Ni-MH: Níquel hidreto metálico.

Figura 15 - Coquilha e corpo de prova CP01



Fonte: O autor, 2018.

Os corpos de prova destinados ao ensaio de espectrometria devem ser analisados de maneira imediata após o lixamento, justamente para evitar a sua contaminação com fuligem, poeira, oxidações entre outros fatores que podem prejudicar os resultados do ensaio.

Durante a realização do ensaio, Figura 16, o corpo de prova foi acoplado ao espectrômetro SPECTROMAXx, destinado a realização de análises e na identificação de metais. Onde dentro de um intervalo de tempo entre 15 e 30 segundos toda a composição química do material é listada em um relatório. É importante salientar que se deve realizar de duas a três vezes o processo de análise no espectrômetro para fins de verificação da repetibilidade de resultados

Figura 16 - Ensaio de espectrometria



Fonte: O autor, 2018.

A amostra utilizada para a realização do ensaio metalográfico foi coletada após os processos de inoculação e nodularização a fim de se avaliar a composição final da carga. O resultado gerado pelo ensaio de espectrometria pode ser visualizado no Quadro 6.

Quadro 6 - Composição química / ensaio de espectrometria

Carbono	Cério	Cromo	Cobre	Magnésio	Silício
3.520%	0.003%	0.027%	0.048%	0.031%	2.890%
Molibdênio	Níquel	Fósforo	Enxofre	Manganês	Estanho
0.0017%	0.020%	0.022%	0.0052%	0.272%	0.0071%

Fonte: O autor, 2018.

Os valores obtidos através do ensaio de espectrometria são característicos dos ferros nodulares manufaturados na empresa onde o estudo foi realizado.

3.1.1.5 Valores objetivos – Ensaio mecânicos

Para determinar os valores objetivos a serem considerados durante a simulação de correlação foram realizados ensaios mecânicos nos corpos de prova confeccionados. Onde através da utilização do corpo de prova CP03 realizou-se o

ensaio de dureza Brinell, Figura 17, com a utilização de um durômetro Brinell DIGIMESS.

O ensaio deve ser realizado em uma superfície que seja plana, livre de óxidos, substâncias estranhas e particularmente livres de lubrificantes. A peça em análise deve ter um acabamento superficial que permita uma medição exata do diâmetro da impressão gerada durante o ensaio. Através da aplicação de carga, 3000 kgf, sobre o corpo de prova CP03 e a medição da impressão deixada sobre o mesmo definiu-se a dureza Brinell correspondente como: 163 HB⁹.

Figura 17 - Ensaio de dureza Brinell



Fonte: O autor, 2018.

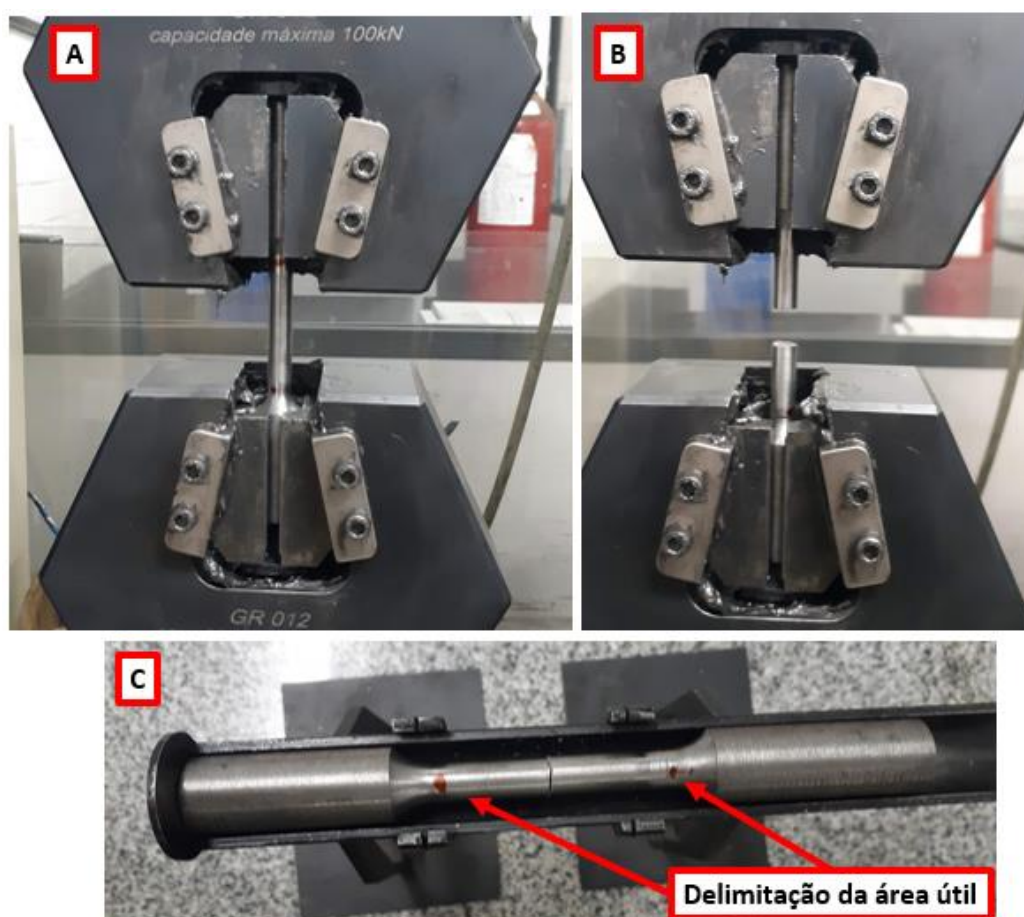
Tendo em mãos os resultados do ensaio de dureza, parte-se para os ensaios de resistência a tração, resistência ao escoamento e alongamento. Estes são realizados de maneira simultânea com a utilização de uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC, Apêndice B. Para a realização destes ensaios, utilizou-se o corpo de prova CP04, gerado a partir do processo de usinagem do corpo de prova CP03 de acordo com a normativa ASTM A536.

⁹ HB: *Brinell Hardness* (Dureza Brinell)

Conforme pode ser visualizado na Figura 18. O corpo de prova CP04 foi fixado na máquina universal de ensaios mecânicos (A), onde este foi submetido a um esforço de tração vertical aumentado gradativamente até o seu rompimento (B). Todo o processo é monitorado por um *software* denominado TESC, este faz a coleta de dados durante o ensaio e gera os resultados de resistência a tração e resistência ao escoamento em MPa. Durante este ensaio os resultados obtidos foram:

- Resistência a tração: 473,21 MPa;
- Resistência ao escoamento: 346,45 MPa.

Figura 18 - Realização dos ensaios mecânicos



Fonte: O autor, 2018.

Para a verificação do alongamento deve-se medir o comprimento da área útil do corpo de prova antes e após o ensaio (C). A medida da área útil do corpo de prova CP04 era de 50 mm antes do ensaio e de 59,1 mm após o ensaio, portanto o alongamento em percentual foi de 18,2%.

3.1.1.6 Valores objetivos – Ensaio metalográfico

Para a realização dos ensaios metalográficos se fez o uso do corpo de prova CP05, gerado a partir de um corte de seção à 20mm de uma das extremidades do corpo de prova CP04. Analisar o mesmo corpo de prova utilizado no ensaio de tração possibilita uma maior assertividade quanto os valores objetivos referentes as propriedades microestruturais do material em análise.

Primeiramente o corpo de prova CP05 foi polido com o auxílio de uma politriz metalográfica onde se fez a utilização das seguintes lixas respectivamente: 220, 400, 600, 1000 e 1200. Este procedimento possibilita minimizar as imperfeições presentes na amostra. Após a lixa 1200 o corpo de prova CP05 foi polido com a utilização de um pano de polimento, acoplado à politriz, juntamente com alumina para polimento metalográfico a fim de possibilitar a visualização do número de nódulos de grafita presentes por mm^2 .

Para a obtenção das imagens micrográficas necessárias, utilizou-se um microscópio óptico ajustado em uma ampliação de 100x e para a análise das imagens geradas contou-se com o auxílio de um *software* computacional denominado Digimet Plus 5 - MIPS. Posteriormente foi aplicado na amostra o reagente químico nital 2% a fim de revelar a microestrutura desta e analisar os percentuais e a distribuição da ferrita e perlita presentes. Os resultados destas análises podem ser visualizados no Apêndice C.

Para fins de correlação, os valores obtidos através dos ensaios metalográficos devem ser ajustados antes de serem impostos como objetivo no *software* MAGMASOFT[®]. Quanto aos resultados referentes aos números de nódulos por mm^2 realiza-se a média dos valores obtidos:

$$\frac{\text{Nódulos}}{\text{mm}^2} = \frac{129 + 144 + 156}{3} = 143$$

Portanto o valor a ser utilizado como objetivo na simulação de correlação, quanto ao número de nódulos por mm^2 é: 143.

Devido ao MAGMASOFT[®] levar em consideração apenas a matriz perlita e ferrita, é necessário um balanceamento entre os valores obtidos no ensaio metalográfico para compensar o percentual da grafita presente no material. Na obtenção destes valores foi realizado o seguinte processo de cálculo.

Primeiramente realizou-se a média dos valores obtidos para a matriz ferrita e perlita:

$$\text{Matriz perlita} = \frac{16 + 15 + 14}{3} = 15\%$$

$$\text{Matriz ferrita} = \frac{75 + 74 + 78}{3} = 75,667\%$$

Logo:

$$15 + 75,667 = 90,667\%$$

$$\text{Matriz ferrita} = \frac{75,667 * 100}{90,667} = 83,46\%$$

$$\text{Matriz perlita} = 100 - 83,46 = 16,54\%$$

Portanto os valores a serem considerados durante a simulação são:

- Perlita: 83,46%;
- Ferrita: 16,54%.

3.1.1.7 Definições da simulação de correlação

Perspectiva de geometria:

Para a realização da simulação de correlação entre as condições fabris e o software. Primeiramente o corpo de prova CP02 e o macho Flexicore foram modelados no *software* CAD Solidworks e importados para o *software* de simulação MAGMASOFT[®], para este processo se fez o uso de arquivos com extensão STEP.

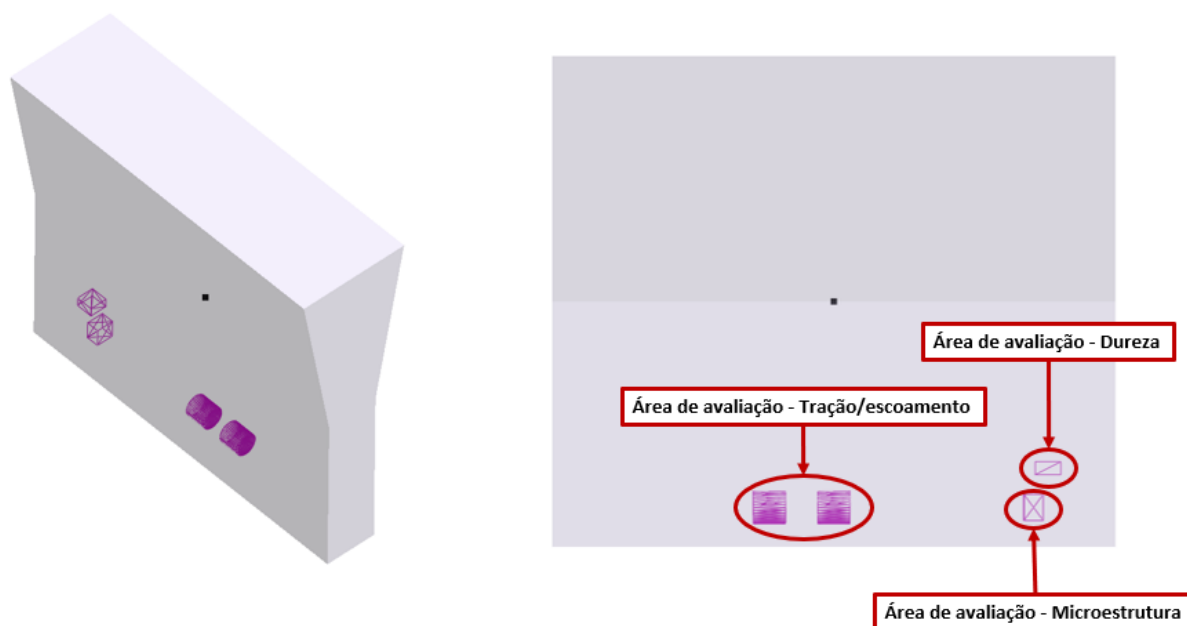
Nesta etapa também é necessário definir a função de cada geometria importada, ou seja, atribuir as identidades de cada arquivo (ID's) do sistema em análise. Por se tratar de um sistema simples, foram identificadas duas ID's: A peça identificada com a ID *Casting* e o molde (macho Flexicore) identificado com a ID *Sand Mold*.

Além destas se fez necessário adicionar a ID *user defined* a qual foi atribuída a característica *EXTBOUNDARY*, que representa o contato do metal diretamente com o ar, situação presente no sistema a ser simulado.

Possuindo todas as geometrias devidamente identificadas parte-se para a definição das regiões de análise a serem consideradas pelo *software*, a definição

destas se justifica pelo fato de ocorrer variações quanto as propriedades mecânicas e microestruturais entre regiões do corpo de prova em análise, da mesma forma que ocorre em peças fundidas de maneira geral. A representação das áreas a serem consideradas durante a simulação pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 19 - Regiões de análise – simulação de correlação



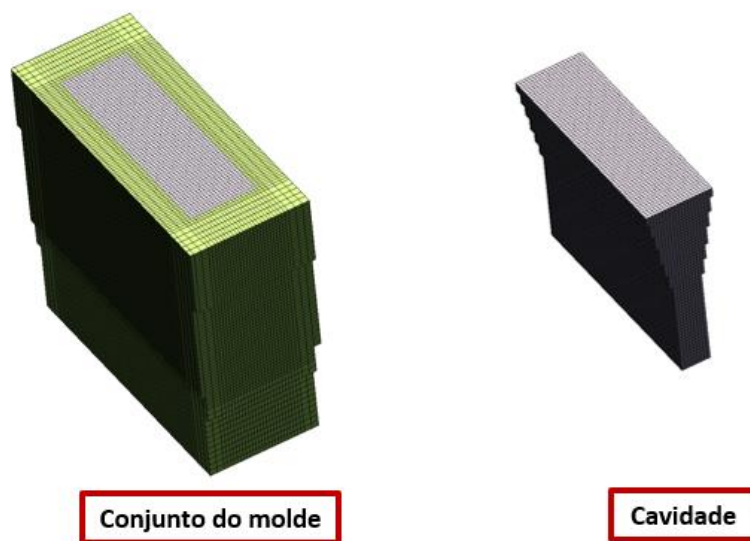
Fonte: O autor, 2018.

Tendo como premissa a necessidade de o *software* analisar as mesmas áreas onde foram realizados os ensaios mecânicos e microestruturais, a definição das áreas de avaliação foi realizada com base na medição dos locais exatos onde foram efetuados os ensaios descritos anteriormente.

Perspectiva de malha

Após a definição de todas as ID's e as áreas de avaliação, deve-se gerar a malha computacional do item a ser simulado, esta está diretamente ligada com a qualidade do resultado final da simulação, pois é a partir da malha que serão realizados todos os cálculos necessários para descrever o comportamento do metal durante todo o processo. A malha em questão apresentou 51240 volumes de controle para a cavidade e 224202 para o conjunto do molde. Conforme pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 - Malha computacional – simulação de correlação



Fonte: O autor, 2018.

É importante ressaltar que se deve manter um equilíbrio quanto ao refinamento da malha computacional, pois quanto mais refinada a malha, mais assertivo será o resultado obtido, mas uma malha muito refinada também aumenta consideravelmente o tempo necessário para a realização dos cálculos. Para o *software* MAGMASOFT® o indicado é que se trabalhe com malhas de até 300000 volumes de controle.

Perspectiva de definições

Nesta etapa devem ser inseridas todas as informações pertinentes ao material a ser simulado (tipo de material a ser fundido, composição química e temperatura inicial), assim como informações referentes ao molde utilizado, coeficientes de transferência de calor entre componentes presentes no sistema, entre outros. Na Figura 21 é possível visualizar onde os valores obtidos através do ensaio de espectrometria e do acompanhamento do processo de vazamento são inseridos. Os valores informados nesta etapa serão utilizados como ponto de partida durante as simulações numéricas.

Figura 21 - Perspectiva de Definições

Material	Database/File name	Initial Temperature (°C)	Iron Composition		
> Cast Alloy	Global/GGG40G	1392.0	C (Carbon)	3.52	%
			Ce (Cerium)	0.003	%
			Cr (Chromium)	0.027	%
			Cu (Copper)	0.048	%
			Mg (Magnesium)	0.031	%
			Mn (Manganese)	0.272	%
			Mo (Molybdenum)	0.0017	%
			N (Nitrogen)	0.0	ppm
			Ni (Nickel)	0.02	%
			P (Phosphorus)	0.022	%
			S (Sulfur)	0.0052	%
			Sb (Antimony)	0.0	%
			Si (Silicon)	2.89	%
			Sn (Tin)	0.0071	%
Material	Database/File name	Initial Temperature (°C)	Sand Permeability (cm ³ /min)	Water Content (wt. %)	
> Sand Mold	MAGMA/Coldbox_silica	30.0	50.0	0.0	
Material	Database/File name	Initial Temperature (°C)			
> User Defined	MAGMA/EXTBOUNDARY	30.0			

Fonte: O autor, 2018.


Os valores inseridos para a composição (*Iron Composition*) são os mesmos representados no Quadro 6, a temperatura inicial (*Initial Temperature*) é a registrada durante o acompanhamento do processo de vazamento (1392°C). Os valores utilizados para o molde (*Sand Mold*) são padrões do *software* e quanto a temperatura ambiente (*MAGMA/EXTBOUNDARY*) adotou-se o valor de 30°C.

Perspectiva de otimização

Para a realização de uma simulação de correlação se faz necessário a utilização do recurso de otimização do *software*, neste é possível definir simulações a serem realizadas de maneira sequencial e automatizada, tendo como base variáveis e valores objetivos pré-estabelecidos. Com a utilização deste recurso é possível encontrar de maneira mais assertiva os valores que melhor condizem com as condições industriais e assim se ter uma maior confiabilidade com os resultados gerados pelo *software* em futuras simulações.

Conforme mencionado anteriormente, foram adotadas como variáveis deste procedimento o tratamento do banho metálico e rendimento do tratamento, Figura 22, estas variáveis se tratam dos graus de liberdade aceitos durante a simulação.

Figura 22 - Variáveis da simulação de correlação



Design Variables

Design Variable	Selection
<input checked="" type="checkbox"/> Melt Treatment - Inoculation Method	Fair Good Very Good

Design Variable	Lower Limit (%)	Upper Limit (%)	Step (%)
<input checked="" type="checkbox"/> Melt Treatment - Treatment Yield	10.0	200.0	10.0

Fonte: O autor, 2018.

É importante observar que os valores para o rendimento do tratamento (*Treatment Yield*) variam em intervalos de 10%, entre os percentuais 10% e 200%. Para gerar os *designs* de simulação o *software* combina estes valores, com os valores estipulados para o tratamento do banho metálico (*Inoculation Method*) respeitando os intervalos preestabelecidos.

Para os valores objetivos se fez o uso de todos os resultados obtidos através dos ensaios mecânicos e microestruturais realizados anteriormente. Na Figura 23 é possível visualizar que os valores objetivos estão distribuídos em suas respectivas áreas de avaliação.

Figura 23 - Definição dos objetivos – simulação de correlação



Objectives

	Name	Type	Value	Expression
<input checked="" type="checkbox"/>	Nódulos	Approach To	143.0	{Solidification & Cooling/Nodule Count/Avg/Cast Alloy Class, Evaluation Area Microestrutura}
<input checked="" type="checkbox"/>	Ferrita	Approach To	83.46	{Solidification & Cooling/Fraction of Ferrite/Avg/Cast Alloy Class, Evaluation Area Microestrutura}
<input checked="" type="checkbox"/>	Perlita	Approach To	16.54	{Solidification & Cooling/Fraction of Pearlite/Avg/Cast Alloy Class, Evaluation Area Microestrutura}
<input checked="" type="checkbox"/>	Dureza	Approach To	163.0	{Solidification & Cooling/Hardness/Avg/Cast Alloy Class, Evaluation Area Dureza}
<input checked="" type="checkbox"/>	Escoamento	Approach To	346.45	{Solidification & Cooling/Mean Yield Strength/Avg/Cast Alloy Class, Evaluation Area Tracao_Centro}
<input checked="" type="checkbox"/>	Escoamento B	Approach To	346.46	{Solidification & Cooling/Mean Yield Strength/Avg/Cast Alloy Class, Evaluation Area Tracao_Deslocada}
<input checked="" type="checkbox"/>	Tração	Approach To	473.21	{Solidification & Cooling/Minimum Tensile Strength/Min/Cast Alloy Class, Evaluation Area Tracao_Centro}
<input checked="" type="checkbox"/>	Tração B	Approach To	473.21	{Solidification & Cooling/Minimum Tensile Strength/Min/Cast Alloy Class, Evaluation Area Tracao_Deslocada}
<input checked="" type="checkbox"/>	Alongamento	Approach To	18.2	{Solidification & Cooling/Maximum Elongation/Max/Cast Alloy Class, Evaluation Area Tracao_Centro}
<input checked="" type="checkbox"/>	Alongamento B	Approach To	18.2	{Solidification & Cooling/Maximum Elongation/Max/Cast Alloy Class, Evaluation Area Tracao_Deslocada}

Fonte: O autor, 2018.

Estes valores são considerados como ideais pelo *software*, portanto o ranqueamento das simulações tem como ponto de partida os *designs* que mais se

aproximaram dos valores objetivos estipulados. Após o *setup* concluído o *software* determina qual será a sequência utilizada para a realização das simulações, esta pode ser visualizada no Quadro 7.

Quadro 7 - Sequência de *designs* – Simulação de correlação

<i>Design Melt Treatment</i>	<i>Inoculation Method Melt Treatment</i>	<i>Treatment Yield (%)</i>	<i>Design Melt Treatment</i>	<i>Inoculation Method Melt Treatment</i>	<i>Treatment Yield (%)</i>	<i>Design Melt Treatment</i>	<i>Inoculation Method Melt Treatment</i>	<i>Treatment Yield (%)</i>
<i>Design 1</i>	<i>Fair</i>	10	<i>Design 21</i>	<i>Very Good</i>	70	<i>Design 41</i>	<i>Good</i>	140
<i>Design 2</i>	<i>Good</i>	10	<i>Design 22</i>	<i>Fair</i>	80	<i>Design 42</i>	<i>Very Good</i>	140
<i>Design 3</i>	<i>Very Good</i>	10	<i>Design 23</i>	<i>Good</i>	80	<i>Design 43</i>	<i>Fair</i>	150
<i>Design 4</i>	<i>Fair</i>	20	<i>Design 24</i>	<i>Very Good</i>	80	<i>Design 44</i>	<i>Good</i>	150
<i>Design 5</i>	<i>Good</i>	20	<i>Design 25</i>	<i>Fair</i>	90	<i>Design 45</i>	<i>Very Good</i>	150
<i>Design 6</i>	<i>Very Good</i>	20	<i>Design 26</i>	<i>Good</i>	90	<i>Design 46</i>	<i>Fair</i>	160
<i>Design 7</i>	<i>Fair</i>	30	<i>Design 27</i>	<i>Very Good</i>	90	<i>Design 47</i>	<i>Good</i>	160
<i>Design 8</i>	<i>Good</i>	30	<i>Design 28</i>	<i>Fair</i>	100	<i>Design 48</i>	<i>Very Good</i>	160
<i>Design 9</i>	<i>Very Good</i>	30	<i>Design 29</i>	<i>Good</i>	100	<i>Design 49</i>	<i>Fair</i>	170
<i>Design 10</i>	<i>Fair</i>	40	<i>Design 30</i>	<i>Very Good</i>	100	<i>Design 50</i>	<i>Good</i>	170
<i>Design 11</i>	<i>Good</i>	40	<i>Design 31</i>	<i>Fair</i>	110	<i>Design 51</i>	<i>Very Good</i>	170
<i>Design 12</i>	<i>Very Good</i>	40	<i>Design 32</i>	<i>Good</i>	110	<i>Design 52</i>	<i>Fair</i>	180
<i>Design 13</i>	<i>Fair</i>	50	<i>Design 33</i>	<i>Very Good</i>	110	<i>Design 53</i>	<i>Good</i>	180
<i>Design 14</i>	<i>Good</i>	50	<i>Design 34</i>	<i>Fair</i>	120	<i>Design 54</i>	<i>Very Good</i>	180
<i>Design 15</i>	<i>Very Good</i>	50	<i>Design 35</i>	<i>Good</i>	120	<i>Design 55</i>	<i>Fair</i>	190
<i>Design 16</i>	<i>Fair</i>	60	<i>Design 36</i>	<i>Very Good</i>	120	<i>Design 56</i>	<i>Good</i>	190
<i>Design 17</i>	<i>Good</i>	60	<i>Design 37</i>	<i>Fair</i>	130	<i>Design 57</i>	<i>Very Good</i>	190
<i>Design 18</i>	<i>Very Good</i>	60	<i>Design 38</i>	<i>Good</i>	130	<i>Design 58</i>	<i>Fair</i>	200
<i>Design 19</i>	<i>Fair</i>	70	<i>Design 39</i>	<i>Very Good</i>	130	<i>Design 59</i>	<i>Good</i>	200
<i>Design 20</i>	<i>Good</i>	70	<i>Design 40</i>	<i>Fair</i>	140	<i>Design 60</i>	<i>Very Good</i>	200

Fonte: O autor, 2018.

Para o processo de correlação em questão foram gerados um total de 60 *designs*. Uma vez determinada a sequência de *designs*, o *software* é capaz de executá-la de maneira automática. A simulação em questão consiste na execução de uma sequência de simulações respeitando a ordem e as configurações de cada *design* demonstrado no Quadro 7.

Perspectiva de avaliação

Devido a simulação de otimização ter gerado 60 *designs*, seria inviável analisá-los individualmente, portanto se fez o uso da perspectiva de avaliação disponibilizada pelo *software*, nela é possível avaliar simulações do tipo DOE¹⁰ de maneira mais dinâmica, com o auxílio de tabelas, diagramas e gráficos. Através da utilização destas ferramentas é possível se ter uma maior compreensão das relações entre as variáveis e os objetivos e isto proporciona uma análise mais correta dos resultados obtidos. Os resultados pertinentes aos 60 *designs* podem ser visualizados no Apêndice D.

Com o auxílio do diagrama gerado pelo *software* e os valores obtidos nos ensaios práticos é possível realizar um ajuste mais fino e reduzir consideravelmente o número de *designs* a serem analisados. O Apêndice E demonstra a redução para quatro o número de *designs* a serem analisados de maneira mais detalhada. Este ajuste foi realizado através da aproximação dos resultados obtidos de cada variável aos valores encontrados durante os ensaios.

No Apêndice F podem ser visualizados de maneira mais detalha os valores obtidos em cada um dos quatro últimos *designs* a serem analisados. Neste também pode ser identificado o percentual de variação entre os valores obtidos na simulação quando comparados aos valores encontrados na prática. Para a simulação em questão os parâmetros que melhor descrevem as condições fabris para corpos de prova de ferro fundido nodular são pertencentes ao *design* 29, portanto as configurações a serem adotadas para as variáveis estipuladas são:

- Tratamento do banho metálico: Bom (*Good*);
- Rendimento do tratamento: 100%.

Ao se analisar o Apêndice F nota-se que o resultado de dureza ficou com uma variação maior entre a prática e os resultados obtidos com a simulação de correlação. Por este motivo realizou-se mais oito simulações de correlação com oito amostras do material GGG40 fundidas em dias diferentes. Estas simulações demonstraram a mesma variação percentual de dureza entre o *software* e a prática, portanto se adotou um fator de correção de 0,88 para os resultados de dureza. Com este ajuste é possível aproximar os valores das simulações com os resultados

¹⁰ DOE: *Design of experiments* (planejamento de experimentos).

obtidos na prática. Os resultados obtidos podem ser visualizados no Quadro 8. Vale ressaltar que este fator de correção só pode ser aplicado uma vez que os demais resultados estão de acordo com os dados obtidos na prática.

Quadro 8 - Determinação do fator de correção para resultados de dureza

N° Amostra	Dureza (HB)			
	Amostra	Simulação de correlação	FC 0,88	Variação (%)
01	163	184,85	162,67	-0,20
02	163	186,75	164,34	0,82
03	156	170,50	150,04	-3,82
04	163	187,40	164,91	1,17
05	163	184,35	162,23	-0,47
06	163	184,82	162,64	-0,22
07	156	173,84	152,98	-1,94
08	163	185,35	163,11	0,07

Fonte: O Autor, 2018.

Com a aplicação de um fator de correção (FC) de 0,88 foi possível aproximar os valores para a dureza do material de maneira satisfatória, mantendo um percentual de variação máxima entre os valores das amostras e a simulação de 3,82%. Este fator é considerado durante todas as simulações posteriores.

Através dos parâmetros descritos é possível manter um bom índice de assertividade quanto aos resultados de futuras simulações e assim realizar a averiguação dos efeitos quanto a alteração dos elementos de liga nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular GGG40.

3.1.2 Definição de parâmetros para as variações de composição

Conforme comentado anteriormente as variações percentuais dos elementos químicos que constituem o ferro GGG40, terão como base os valores usuais da empresa onde o estudo foi realizado. Estes valores estão representados no Quadro 9. A empresa possui três classificações para o material: GGG40 F, GGG40 G e GGG40 E. Estes são utilizados de acordo com a espessura dos itens a serem fundidos.

Quadro 9 - Composição química usual da empresa em estudo

Elemento (%)	GGG40F		GGG40G		GGG40E		Geral	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
C	3,450	3,700	3,400	3,700	3,400	3,500	3,400	3,700
Si	2,700	3,100	2,600	2,900	2,000	2,300	2,000	3,100
Mn	0,200	0,400	0,200	0,400	0,200	0,400	0,200	0,400
Cr	0,000	0,155	0,000	0,155	0,000	0,155	0,000	0,155
P	0,000	0,080	0,000	0,080	0,000	0,080	0,000	0,080
S	0,000	0,015	0,000	0,015	0,000	0,015	0,000	0,015
Cu	0,000	0,155	0,000	0,155	0,000	0,155	0,000	0,155
Ni	0,000	0,100	0,000	0,100	0,000	0,100	0,000	0,100
Mg	0,026	0,035	0,025	0,050	0,025	0,050	0,025	0,050
Al	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000	0,020
Mo	0,000	0,050	0,000	0,050	0,000	0,050	0,000	0,050
Sn	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000	0,020
V	0,000	0,010	0,000	0,010	0,000	0,010	0,000	0,010
Ti	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000	0,020	0,000	0,020
Pb	0,000	0,030	0,000	0,030	0,000	0,030	0,000	0,030

Fonte: O autor, 2018.

As definições destes valores foram realizadas a partir de testes práticos que fizeram o uso do método de tentativa e erro, juntamente com a experiência dos colaboradores, onde ao longo dos anos foi se ajustando os valores máximos e mínimos de acordo com a necessidade dos itens manufaturados. A coluna Geral do Quadro 9 representa os valores mínimos e máximos em relação as três classificações do material. Os valores utilizados nas simulações que possuem como objetivo a verificação do impacto da variação no teor de elementos químicos perante as propriedades mecânicas do material em estudo, podem ser visualizados no Quadro 10.

Quadro 10 - Limites percentuais de cada elemento analisado

Elemento	Limites percentuais	
	Mínimo	Máximo
C	2,720	4,4400
Si	1,600	3,7200
Mn	0,160	0,4800
Cr	0,000	0,1860
S	0,000	0,0185
Cu	0,000	0,1860
Mg	0,020	0,0600

Fonte: O autor, 2018.

Os elementos P, Al, Ni, Mo, Sn, V, Ti, Pb possuem característica residual, ou seja, eles não são adicionados ao forno durante o processo de obtenção do metal base, portanto não são considerados nas simulações realizadas neste estudo. Tendo como ponto de partida os limites mínimo e máximo da composição rotineira da empresa, acrescentou-se um percentual de 20% para mais e para menos em cada elemento a ser analisado. Este acréscimo percentual possui como objetivo alcançar melhores resultados e se ter uma janela de análise mais ampla, o que possibilita um melhor entendimento quanto ao comportamento do material.

3.1.3 Definição das simulações DOE.

Com o objetivo de se ter um melhor entendimento quanto ao impacto de cada elemento predeterminado nas propriedades do material, as simulações que contemplam a variação destes foram executadas de maneira individual. O que por sua vez totalizou sete simulações do tipo DOE, este tipo de simulação testa inúmeras possibilidades a partir de parâmetros preestabelecidos.

Para este processo se realizou a parametrização das variáveis, definindo os limites mínimos e máximos assim como o intervalo entre cada passo dentro dos intervalos preestabelecidos, representados no Quadro 10. Durante este procedimento optou-se pelo número de 50 *designs* por elemento químico, conforme pode ser visualizado no Quadro 11.

Quadro 11 - Parametrização de variáveis para a simulação DOE

Elemento	Passo (%)	Número de <i>designs</i>
C	0,035	50
Si	0,043	50
Mn	0,0065	50
Cr	0,0038	50
S	0,00037	50
Cu	0,0038	50
Mg	0,00081	50

Fonte: O autor, 2018.

Com base nos resultados destas simulações é possível se ter um melhor entendimento do efeito de cada elemento químico analisado perante as características do material em estudo.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para a realização deste trabalho foram necessários os suprimentos e equipamentos listados abaixo:

Obtenção do metal base:

- Forno de indução Servtherm;
- Ferro gusa;
- Sucata de aço;
- Canal de retorno ferro nodular;
- Grafite;
- Silício;
- Escorificante;
- Cápsula para análise Térmica ITALCARB (Destinada à verificação do percentual de carbono presente na liga);
- Pirômetro portátil;

- Sensor de imersão descartável para medição de temperatura em metal líquido ITALTEMP “S”;
- Concha para coleta de amostra;
- Balança eletrônica 150 kg;
- Balança eletrônica de gancho suspensa 10 ton.;
- Ponte rolante 2 ton.;
- Painel de transferência;
- Painel de vazamento.

Obtenção do corpo de prova CP04:

- Torno convencional Diplomat 3001 Nodus;
- Ferramentas de usinagem intercambiáveis;
- Broca de centro 12,5 mm x 5 mm;
- Paquímetro.

Ensaio mecânicos:

- Máquina universal para ensaios mecânicos EMIC – 100 kN.;
- *Software* de automação de ensaios Tesc;
- Durômetro de bancada Digimes;
- Lupa graduada para medição de dureza Brinell.

Ensaio metalográficos:

- Máquina de corte metalográfico;
- Disco de corte 230 mm x 1,5 mm x 19 mm – 230 rpm;
- Politriz metalográfica;
- Lixa nº220;
- Lixa nº 400;
- Lixa nº 600;
- Lixa nº 1000;

- Lixa nº 1200;
- Alumina para polimento 1 μ ;
- Pano de polimento metalográfico;
- Álcool etílico 96°C;
- Nital 2% (2% Ácido nítrico + 98% Álcool Etílico);
- Microscópio metalográfico Topcom;
- *Software* para metalografia quantitativa digital Digimet Plus 5 – MIPS.

Simulações numéricas:

- Computador *Desktop*: Processador Intel ® Xeon ® CPU E5-1620 0 @ 3.60GHz 3.60 GHz, Memória RAM: 32GB, Placa de vídeo: NVIDIA® Quadro® M2000 – 4GB GDDR5;
- *Software* de modelamento CAD Solidworks;
- *Software* MAGMASOFT® versão 5.4 módulo MAGMA *iron*.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES GERAIS

A verificação prática do efeito da variação de cada elemento químico em estudo se torna inviável devido ao elevado custo, pois seria necessário a fusão de no mínimo 1000 kg de ferro para a realização dos testes, sendo que com as variações percentuais provavelmente o metal não poderia ser aproveitado no processo. Vale ressaltar que durante os testes seriam necessárias realizações de correções nas cargas e durante estas correções o metal perderia a nucleação o que influenciaria nas propriedades mecânicas resultantes. Outro ponto a ser analisado, é que, com a permanência do metal no forno por muito tempo, o mesmo acaba oxidando, o que por sua vez também traria impactos nos resultados finais. Levando em consideração que seria necessário a realização dos ensaios mecânicos e metalúrgicos para cada configuração obtida, a demanda de tempo necessária seria muito elevada. Por estes motivos optou-se neste trabalho a verificação destes efeitos a partir do *software* MAGMASOFT[®]. Onde uma vez alinhado com as condições industriais seus resultados são confiáveis. A partir desta metodologia pode-se verificar os efeitos de cada elemento em um campo experimental de característica virtual. Tendo um resultado satisfatório, com menor custo e um maior controle das variáveis do processo durante a análise.

4.2 CORRELAÇÃO ENTRE O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO E O AMBIENTE FABRIL

Os resultados obtidos para se atender o objetivo específico (a), que se trata da realização de simulações numéricas e a correlação destas com as condições industriais através de ensaios mecânicos e microestruturais em corpos de prova. Podem ser visualizados no Quadro 12.

Quadro 12 - Resultados do processo de correlação

Propriedade analisada	Resultados dos ensaios	Resultados da simulação numérica	Variação (%)
Alongamento (%)	18,2	18,31	0,60
Alongamento B (%)	18,2	18,27	0,38
Dureza (HB)	163	184,97	13,48
Dureza (HB) FC 0,88	163	162,77	-0,14
Escoamento (MPa)	346,45	372,96	7,65
Escoamento B (MPa)	346,45	373,51	7,81
Ferrita (%)	83,46	83,76	0,36
Nódulos / mm ²	143	144,92	1,34
Perlita (%)	16,54	16,24	-1,81
Tração (MPa)	473,21	495,1	4,63
Tração B (MPa)	473,21	495,5	4,71
Configuração resultante			
Tratamento do banho metálico	<i>Good</i>		
Rendimento do tratamento	100 %		

Fonte: O autor, 2018.

Os resultados apresentados no Quadro 12 foram caracterizados como aceitáveis para se dar sequência ao estudo, uma vez que as variações percentuais presentes no processo da empresa onde o estudo foi realizado são, em sua grande maioria, superiores as obtidas no procedimento de correlação. Estas variações estão evidenciadas no Quadro 13, onde foram comparadas as propriedades mecânicas entre oito amostras do material GGG40 de diferentes cargas.

Quadro 13 - Ensaio realizados em amostras do material GGG40.

Amostra	Dureza (HB)	Tração (MPa)	Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Nódulos / mm ²	Ferrita (%)	Perlita (%)
01	163	473,21	346,45	18,20	143	75,67	15,00
02	163	479,11	343,72	17,20	152	75,67	15,00
03	156	482,79	345,12	18,00	167	61,67	27,67
04	163	465,07	324,19	18,60	205	68,00	15,67
05	163	482,45	345,02	18,20	153	65,67	18,00
06	163	450,29	330,18	20,20	242	83,00	14,33
07	156	470,96	337,91	19,00	189	78,00	11,00
08	163	470,83	349,33	22,80	203	81,33	7,00
Varição Máxima (%)	4,29	6,73	7,20	24,56	30,24	25,70	74,70

Fonte: O autor, 2018.

Ao se analisar o Quadro 13 é possível identificar que as variações encontradas na prática são de maneira geral maiores que as encontradas na simulação de correlação. Isto torna evidente que o processo possui certa instabilidade perante as propriedades mecânicas obtidas nas peças processadas e justifica como válida as configurações resultantes, representadas no Quadro 12, para a realização do presente estudo.

4.3 IMPACTO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO FERRO FUNDIDO GGG40.

Os resultados obtidos com as simulações realizadas a fim de se atender ao objetivo específico (b) podem ser verificados nos Apêndices listados no Quadro 14. Para fim de manter um melhor entendimento aborda-se de maneira individual o efeito de cada elemento de liga perante as propriedades do material em estudo.

Quadro 14 - Especificações de resultados das simulações

Elemento	Composição	Apêndices					
		Alongamento	Dureza	Escoamento	Tração	Perlita	Ferrita
C	Hipoeutética	G	H	I	J	K	L
	Hipereutética	M	N	O	P	Q	R
Si	Hipoeutética	S	T	U	V	W	X
	Hipereutética	Y	Z	AA	AB	AC	AD
Mn	Hipoeutética	AE	AF	AG	AH	AI	AJ
	Hipereutética						
Cr	Hipoeutética	AK	AL	AM	AN	AO	AP
	Hipereutética						
S	Hipoeutética	AQ	AR	AS	AT	AU	AV
	Hipereutética						
Cu	Hipoeutética	AW	AX	AY	AZ	BA	BB
	Hipereutética						
Mg	Hipoeutética	BC	BD	BE	BF	BG	BH
	Hipereutética						

Fonte: O autor, 2018.

Para uma melhor apresentação dos resultados, as simulações dos elementos silício e carbono foram divididas de acordo com o ponto eutético do material. Esta separação foi adotada devido a mudança brusca de comportamento evidenciada entre as composições hipereutetóide e hipoeutetóide. Os resultados adquiridos na primeira simulação destes elementos, considerando toda a faixa representada no Quadro 10, não tiveram uma boa apresentação, portanto foram divididos de acordo com o ponto eutético.

4.3.1 Carbono

Este elemento é responsável pela determinação da quantidade de grafita que estará presente na microestrutura do metal, o mesmo possui característica ferritizante, como pode ser visualizado no Apêndice R. O carbono é um elemento que possui ligação direta com ponto eutético do material, portanto realizou-se as simulações em duas etapas, analisando o seu efeito em uma composição hipoeutética e hipereutética separadamente.

Considerando um carbono equivalente abaixo do ponto eutético, o comportamento perante a adição de carbono no ferro fundido nodular se deu da

seguinte maneira: Um baixo percentual de carbono na liga proporciona a formação de ferrita α , conforme Figura 2, onde na medida em que se adiciona o soluto o percentual desta ferrita reduz até chegar no ponto eutético, Apêndice L.

Dieter (1981) ressalta que em certos percentuais atômicos de soluto, o aumento da resistência mecânica varia de maneira inversa ao limite de solubilidade. Este comportamento foi evidenciado durante as simulações realizadas para a adição de carbono no equilíbrio hipoeutético do diagrama Fe-C, conforme pode ser visualizado no Apêndice J, que representa o impacto da adição de carbono na resistência a tração do material. Nota-se que nesta condição na medida em que se aumenta o teor de carbono a resistência à tração é reduzida.

Passado o ponto eutético do diagrama Fe-C o mecanismo de solidificação se comporta de maneira diferente perante a adição de carbono na liga. Nesta condição mesmo com a aproximação do limite de solubilidade do carbono, que proporcionaria o aumento de perlita na liga, é possível visualizar o aumento percentual de ferrita, devido a característica ferritizante do carbono, conforme pode ser visualizado nos Apêndices Q e R. De acordo com Garcia (2001) este comportamento ocorre pelo fato das dendritas de ferrita terem uma taxa de crescimento maior após o ponto eutético, sendo isto potencializado pela adição de carbono no solvente.

Entretanto, na medida em que se eleva o teor de carbono ocorre a elevação da dureza do material (Apêndice N), mesmo com um teor de ferrita crescente. Isto se dá devido a aproximação do limite de solubilidade do carbono, o que torna evidente a predominância do mecanismo de endurecimento por solução sólida.

De acordo com Dieter (1981) este mecanismo de endurecimento se caracteriza pela ocupação intersticial do soluto no solvente, portanto, com a adição de soluto ocorre o aumento da tensão de escoamento bem como o nível da curva tensão deformação como um todo. Isto leva a conclusão que o soluto possui forte influência no aumento da resistência de atrito na rede cristalina do material.

Para ambos os casos a dureza e resistência ao escoamento se comportam de maneira proporcional a resistência à tração, enquanto o alongamento possui um comportamento inversamente proporcional aos demais.

4.3.2 Silício

Como o carbono, o silício está ligado diretamente ao ponto eutético do material perante seu impacto no carbono equivalente, portanto, se adotou a mesma sistemática para as simulações deste elemento.

Durante a adição de silício em uma composição hipoeutética é possível evidenciar o seu efeito ferritizante à medida em que se adiciona este elemento na liga. Aumentando o teor de silício em uma composição hipoeutética ocorre o aumento de alongamento suportado pelo material e conseqüentemente a redução das demais propriedades (dureza, resistência à tração e escoamento).

Em uma liga que tenha sua composição com característica hipereutética a adição de silício causa um impacto inverso quando comparado a uma composição hipoeutética. Na medida em que se aproxima do limite de solubilidade do diagrama Fe-C ocorre o aumento da dureza do material, resistência a tração e resistência ao escoamento, assim como a redução de seu alongamento. Este comportamento ocorre devido a difusão decorrente do processo de solidificação e endurecimento por solução sólida. Os efeitos da adição de silício no ferro fundido nodular estão apresentados nos apêndices listados no Quadro 14.

Segundo Garcia (2001) o silício é um agente nucleante eficiente, portanto é adicionado ao material a fim de promover a formação de uma estrutura grafítica, isto é evidenciado pelos Apêndices X e AD onde nota-se o forte impacto do silício quanto o aumento de ferrita no material. O elemento atua tanto na nucleação da grafita quanto no aumento das distâncias entre os patamares eutéticos estável e metaestável para até 35°C.

4.3.3 Manganês

Ao se observar os Apêndices AE ao AJ identifica-se que com o aumento do teor de manganês no ferro fundido ocorre o aumento da dureza, resistência à tração e escoamento, e conseqüentemente a redução do alongamento no material. De acordo com Santos (2000) este elemento age como agente perlitizante, ou seja, aumentando o seu teor no ferro fundido nodular aumenta-se o percentual de perlita presente na estrutura do metal, este efeito pode ser identificado no Apêndice AI. É possível evidenciar que este elemento é um forte perlitizante pelo fato de o mesmo

praticamente dobrar o percentual de perlita presente no material durante as simulações realizadas.

4.3.4 Cromo

Os resultados obtidos a partir das simulações demonstraram que com o aumento do teor deste elemento em ligas de ferro fundido nodular GGG40 ocorre a redução no percentual de alongamento juntamente com o aumento da dureza, resistência à tração e escoamento. Isto se dá pelo ao fato deste elemento promover a formação de perlita durante a solidificação de ferros fundidos nodulares, conforme pode ser visualizado no Apêndice AO.

É importante ressaltar que na faixa analisada este elemento não possui grande influência perante as características do material, isto pode ser evidenciado ao se analisar o eixo das ordenadas dos Apêndices AK, AL, AM e AN estes demonstram que a variação em todas as características do material é pequena. Por outro lado, ao se elevar a faixa percentual deste elemento ocorre um aumento na tendência de formação de carbonetos o que não é desejável para o ferro fundido nodular, os carbonetos elevam a dureza do material de maneira significativa, característica dos ferros fundidos brancos. Outro motivo para não se trabalhar com este material em teores mais elevados é o seu alto custo.

4.3.5 Enxofre

Devido a faixa percentual considerada nas simulações ser baixa este elemento não demonstrou grandes impactos nas propriedades mecânicas do material (Apêndices AQ, AR, AS e AT). Segundo Chiaverini (1986) o enxofre em condições normais não possui efeito significativo no ferro fundido nodular.

O enxofre é indesejável na composição do ferro pois o mesmo é considerado uma impureza, este é adicionado apenas para melhorar as condições de usinabilidade do material. A sua combinação com o manganês proporciona um efeito lubrificante que causa a redução do atrito das ferramentas de usinagem com o material a ser usinado, devido a geração de sulfeto de manganês, o que por sua vez pode aumentar a durabilidade destas ferramentas em até 150% (DIAS, 2011 *apud* ERICKON, 1976).

4.3.6 Cobre

O cobre demonstrou um maior impacto nas características do material em níveis superiores à 0,11%. Este elemento auxilia na estabilização da perlita durante a solidificação, conforme Apêndice BA. Portanto se justifica o aumento da dureza, resistência à tração e escoamento, assim como a redução do alongamento na medida que se eleva o teor de cobre presente no material (Apêndices AW, AX, AY e AZ). Nota-se que o efeito nas propriedades do ferro fundido perante o aumento do teor deste elemento é bastante considerável.

4.3.7 Magnésio

Os impactos causados pelo magnésio durante a realização das simulações foram baixos em todas as propriedades analisadas, isto se dá devido uma limitação do *software* de simulação numérica utilizado. O programa é até o momento, incapaz de prever o efeito deste elemento no material. Atualmente o magnésio é utilizado pelo *software* apenas como referência para a definição do tipo de material que está sendo trabalhado, conforme apresentado no Quadro 15.

Quadro 15 - Percentuais de utilização do Mg no *software* MAGMASOFT®

Percentual de magnésio	Classificação do material
0,0% a 0,005%	Ferro fundido cinzento
0,005% a 0,03%	Ferro fundido vermicular
>0,03%	Ferro fundido nodular

Fonte: Adaptado de MAGMA, 2015.

De acordo com Baldam e Vieira (2014) o magnésio proporciona a obtenção de grafita esferoidal de maneira mais segura e econômica, sendo as grafitas obtidas com este elemento bastante regulares.

4.4 IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS COM MAIOR IMPACTO PERANTE AS PROPRIEDADES DOS FERRO FUNDIDO NODULAR

Para atender o objetivo específico (c) realizou-se uma análise de quais os elementos químicos predeterminados possuem um maior impacto quanto alterações nas propriedades do material. Segundo os dados obtidos nas simulações e

consultas bibliográficas, os elementos químicos que possuem um maior impacto nas características do material são: Carbono, silício, magnésio, manganês e cobre.

O elemento carbono possui influência na formação e no aumento do número de nódulos, conseqüentemente a resistência do material também é alterada com a variação de seu percentual, este comportamento pode ser visualizado nos Apêndices G, H, I, J, M, N, O, e P. Esta influência ocorre devido o elemento se diluir no metal de maneira intersticial, onde quanto maior a sua presença maior será o número de nódulos por mm^2 , conforme representado no Apêndice BI. O carbono também auxilia na formação de nódulos mais esféricos, Chiaverini (2002) menciona que nódulos mais esféricos causam uma melhora na ductibilidade e tenacidade do material. Conforme comentado anteriormente o seu comportamento é inverso em ligas hipoeutéticas e hipereutéticas.

Em ligas hipereutéticas, a mais usual na fabricação de peças fundidas, na medida em que se aumenta o teor de carbono, ocorre a elevação da resistência mecânica de maneira geral, portanto pode ser adotada sempre que se busca materiais mais resistentes a elevação do teor de carbono. Vale ressaltar que em contrapartida o excesso de carbono causa dureza elevada e alguns defeitos como a grafita explodida (defeito causado pela utilização de um carbono equivalente alto), de acordo com HUGHES (1992) a flotação de carbono também ocorre por este motivo. Teores muito baixos ou muito altos proporcionam o aumento da ocorrência de rechupes, devido ao impacto no processo de expansão da grafita durante a solidificação.

Torres (1975) explica que para se obter matrizes perlíticas deve-se reduzir o percentual de carbono, esta afirmação é reforçada pelo Apêndice Q, onde ocorre o aumento de perlita na medida em que se reduz a participação do carbono. Este elemento eleva a porcentagem de grafite, porém com esta redução as peças se tornam muito duras, quebradiças, difíceis de usinar e as chances de se atingir uma fundição branca aumentam. O autor também comenta que o aumento de espessura das peças favorece a formação de uma matriz ferrítica.

O silício por sua vez atua como um auxiliar do carbono durante a precipitação da grafita. Por ser um elemento ferritizante, Apêndices X e AD, favorece a decomposição de carbonetos. Este elemento proporciona uma maior fluidez do metal, portanto pode ser utilizado em peças finas com o objetivo de melhorar o

processo de vazamento, o mesmo também retarda a ocorrência de coquilhamento decorrente de altas taxas de resfriamento.

Quando utilizado em excesso causa dureza elevada, deixando o material quebradiço, e pelo fato de possuir relação com o carbono equivalente, o silício também é determinante na formação de grafita explosiva. É importante que os elementos silício e carbono tenham seus teores alterados em conjunto e de maneira inversa, ou seja, aumentando o teor de um deve-se reduzir o teor de outro. Este procedimento visa manter um carbono equivalente estável.

O magnésio é um forte influente na formação de nódulos, sendo o um dos principais elementos utilizados durante o processo de nodularização. Porém teores elevados causam a formação de carbonetos (aumento de cementita), elevando a dureza do material. Teores altos de magnésio também causam a deformação dos nódulos, em peças finas seu teor deve ser reduzido a fim de se diminuir o coquilhamento.

O manganês atua no material aumentando a sua dureza e resistência à esforços. Torres (1975) explica que este comportamento ocorre quando o elemento se combina com o carbono e forma carbureto de manganês, este fator também causa o aumento da taxa de resfriamento do material e sua contração volumétrica.

Este elemento possui ação perlitizante, conforme Apêndice AI, por este motivo o seu teor deve ser elevado a fim de se obter matrizes com predominância perlítica, como é o caso dos ferros nodulares GGG60 e GGG70. O manganês também contrabalança o efeito do silício.

O comportamento do cobre é semelhante ao do manganês, porém o impacto com o aumento de seu percentual é maior. Em peças finas deve-se buscar reduzir o percentual de cobre e de manganês, a mesma sistemática deve ser utilizada para se obter uma matriz com predominância ferrítica.

Por ordem de maior impacto nas propriedades do material, recomenda-se que as alterações nos teores dos elementos sejam realizadas na ordem descrita acima. Devido causarem impactos diferentes no material, é preciso analisar o que se busca antes de realizar alterações na composição química. Variações na taxa de resfriamento também é um fator determinante nas características mecânicas de peças fundidas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Buscou-se durante o desenvolvimento deste trabalho entender os efeitos perante a alteração no teor dos elementos químicos quanto as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. Tendo como justificativa a importância deste conhecimento durante a preparação de cargas no processo de fusão de metais, pelo fato das características do material fundido serem resultantes de sua composição química.

Com o término desta pesquisa o objetivo de se entender os efeitos causados nas propriedades mecânicas de materiais fundidos foi alcançado, uma vez que com a correlação entre um *software* de simulação numérica e as condições industriais onde a pesquisa foi realizada, evidenciou-se quais são os impactos dos principais elementos que constituem o ferro fundido nodular GGG40 em relação as suas propriedades mecânicas, respondendo à pergunta levantada durante a apresentação do problema de pesquisa. Obteve-se a definição de um parâmetro relevante no suporte de tomada de decisões para o segmento de fundição, a ser utilizado durante a preparação de cargas de acordo com as características estipuladas para as peças a serem fundidas. Identificou-se também que os elementos que possuem uma maior influência nas propriedades do material são: carbono, silício, magnésio, manganês e cobre.

Durante o presente estudo manufaturou-se corpos de prova e posteriormente efetuou-se ensaios mecânicos e metalográficos nos mesmos. Também se fez uso de simulações numéricas realizadas em um *software* voltado para o ramo de fundição. A utilização desta metodologia tornou possível o estudo em um grande número de configurações, se tratando de composições químicas, e consequentemente o alcance dos objetivos definidos.

Em função do custo e tempo de resposta não se alcançou uma validação por meio de testes práticos e ensaios laboratoriais. Para estes seria necessário um longo prazo devido a necessidade de se realizar a fusão do metal com diversas composições e posteriormente se analisar as propriedades metalúrgicas e mecânicas obtidas com a variação no teor dos elementos químicos do material. Lembrando que certas configurações não poderiam ser aproveitadas para a fabricação de peças sem grandes correções.

Com base nos resultados alcançados e nas dificuldades encontradas sugere-se a continuidade deste trabalho através de uma maior coleta de dados e realização dos ensaios práticos, comportando a variação dos elementos químicos e seus efeitos nas características mecânicas do ferro fundido nodular.

REFERÊNCIAS

- ABBASCHIAN. R.; ABACHIAN. L. REED-HILL. R. E. **Physical metallurgy principles**. 4. ed. United States: Cengage Learning, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6152: Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2002.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A536: Standard specification for ductile iron castings**. [S.l.], 2009.
- BALDAM, R. L.; VIEIRA, E.A. **Fundição: Processos e Tecnologias Correlatas**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2014.
- BAWA, H. S. **Manufacturing processes – II**. Mechanical engineering series. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2006.
- BAYER. P, S. **Ensaio dos materiais**. Joinville: Instituto Federal Santa Catarina, 2013.
- BEELEY, P. **Foundry Technology**. 2. ed. Massachusetts: Butterworth Heinemann, 2001.
- BENZ, M. G.; ELLIOT, J. F. The austenite solidus and revised Iron-Carbon diagram. **Transactions of the Metallurgical Society of AIME**, V.221, p. 323-330, 1961.
- BOLJANOVIC, V. **Metal shaping processes: Casting and molding; Particulate processing; Deformation processes; and metal removal**. New York: Industrial Press, 2009.
- CALLISTER, W, D. **Materials Science and engineering: An introduction**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2000.
- CALLISTER, W, D; RETHWISCH, D, G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 9. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CAMANHO, A. Previsão automática de propriedades de material para simulação de processos de fundição e sua influência nos resultados obtidos, **Revista da ABIFA - fundição e matérias primas**, São Paulo, ano XVI, 151 ed, p. 90-95, 2012. Edição especial.
- CARMO. D. J. **Tratamentos térmicos de aços e ferros fundidos**. Itaúna: SENAI-DR.MG, 2004.
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia científica**. 6. ed. [S.l]: Pearson Prentice Hal,2006.
- COLPAERT. H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1974.
- CHIAVERINI. V. **Tecnologia mecânica – materiais de construção mecânica**. 2. ed. São Paulo, McGraw-Hill, 1986.
- _____. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1987.
- _____. **Aços e ferros fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.
- DARKEN, L. S.; GURRY, R. W. **Physical chemistry of metals**. New York: McGraw-Hill, 1953.

DIAS, L. R. M. **A Influência do teor relativo perlita/ferrita na usinabilidade do ferro fundido cinzento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica / Materiais e processos de fabricação) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2011.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: Conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: Editora da universidade de São Paulo, 2000.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e aplicações**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

_____. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6.ed. São Paulo: 2008.

GOODWAY, M. History of casting. In: STEFANESCU D. M. (Org.). **ASM Handbook: Casting**. v. 15. 9. ed. Ohio: ASM International, 1992. p. 13-55.

HAHN, I; STURM, J. C. **Autonomous optimization of casting processes and designs**. World Foundry Congress, 2010.

Hall, N. **Navier-Stokes equations**. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/nseqs.html>>. Acesso em: 05 mar 2018.

HUGHES, I. C. H. Control of the composition of ductile iron. In: STEFANESCU D. M. (Org.). **ASM Handbook: Casting**. v. 15. 9. ed. Ohio: ASM International, 1992. p. 1407-1410.

ITALTERM. **Fornero II**. Disponível em: <<http://www.italterm.com/item.php?prod=5>>. Acesso em: 09 jun, 2018.

KANNO, T. et al. Effect of alloying elements on eutectic temperatures in cast iron. **AFS Transactions**. V. 13, p. 1-9, 2005.

KARSAY, S. I. **Ductile iron – Production and practice**. USA: American Foundry Society, 1985.

KATZ, S.; LANDEFELD, G. F. **Foundry Processes: Their Chemistry and Physics**. New York: Plenum Press, 1988.

KIRSCHBAUM, C. Decisões entre pesquisas quali e quanti sob perspectiva de mecanismos causais. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, [S.l.], v. 28, n. 82, p 179-257, jun. 2013.

MAGMA. **Kompetenzen und Entwicklungible**. Disponível em: <<https://www.magma-soft.de/de/unternehmen/kompetenzen-und-entwicklung/>>. Acesso em: 3 mar. 2018a.

_____. **Reliable Castings and Robust Quality for Designers and Supply Chain Experts**. Disponível em: <<https://www.magma-soft.de/en/engineering/castingbuyer/>>. Acesso em: 3 mar. 2018b.

_____. **Treinamento Módulo standard**. São Paulo: MAGMA Brasil, 2015.

MARTORANO, M. A. **Efeitos de algumas variáveis de processo na microsegregação da liga Cu-8%Sn**. 1998. Tese (Doutorado em engenharia / Metalurgia) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, R. J.; GALHARDI, A. C. **Simulação numérica e a fundição de metais do Brasil**. São Paulo: Centro Paula Souza, 2016.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013.

RADZIKOWSKA, J. M. Metallography and microstructures of cast iron. In: VOORT G. F. V. (Org.). **ASM Handbook: Metallography and microstructures**. v. 9. Ohio: ASM International, 2004. p. 565-587.

RAO, P. N.; **Manufacturing Technology: Foundry, Forming and Welding**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1992.

RAVIS. J, R. **Tensile Testing**. 2. ed. Ohio: ASM international, 2004.

SANTOS, A. B. S. **Efeitos da composição química na produção de ferro fundido nodulares**. In: 55° Congresso anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Rio de Janeiro, 2000.

SIMPSON. B.L. **Development of the metal casting industry**. Chicago: American foundrymen's Association, 1948.

SPECTRO. **Introducing SPECTROMAXx LMX07 - ARC/SPARK OES Analyser**. Disponível em : < https://www.spectro.com/-/media/ametekspectro/documents/brochure/spectromaxx_foundry_en.pdf>. Acesso em 30 jul, 2018a.

_____. **SPECTROMAXx**. Disponível em: < <https://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy/spectromaxx-metal-analyzer>>. Acesso em 30 jul, 2018b.

_____. **SPECTROMAXx User Manual version 1.0**. AMETEK materials analysis division. 2005.

STEFANESCU, D. M. Thermodynamic Properties of iron-Base Alloys. In: STEFANESCU D. M. (Org.). **ASM Handbook: Casting**. v. 15. 9. ed. Ohio: ASM International, 1992. p. 119-123.

STURM, J. C.; BUSCH, G. **Cast iron - a predictable material**. In: 69th world foundry congress, Hangzhou, 2011.

TORRES, J. **Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão**. São Paulo: HEMUS, 1975.

VAZ JÚNIOR, M. **Introdução ao método de volumes finitos**. 5. ed. Joinville: LAMEC, 2015.

VICK. **SPM (15 à 35 Lts.)**. Disponível em: <<http://vickmaquinas.com.br/spm-flexicore-15-a-35lts/>>. Acesso em: 09 jun, 2018.

ZIPPERIAN. D. C. **Metallographic Handbook**. Tucson: PACE Technologies, 2011.

APÊNDICE A - FORNO DE INDUÇÃO E MATÉRIA PRIMA DO FERRO FUNDIDO NODULAR GGG40



APÊNDICE B - MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS MECÂNICOS



Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE C - ENSAIO METALOGRÁFICO DE CORRELAÇÃO

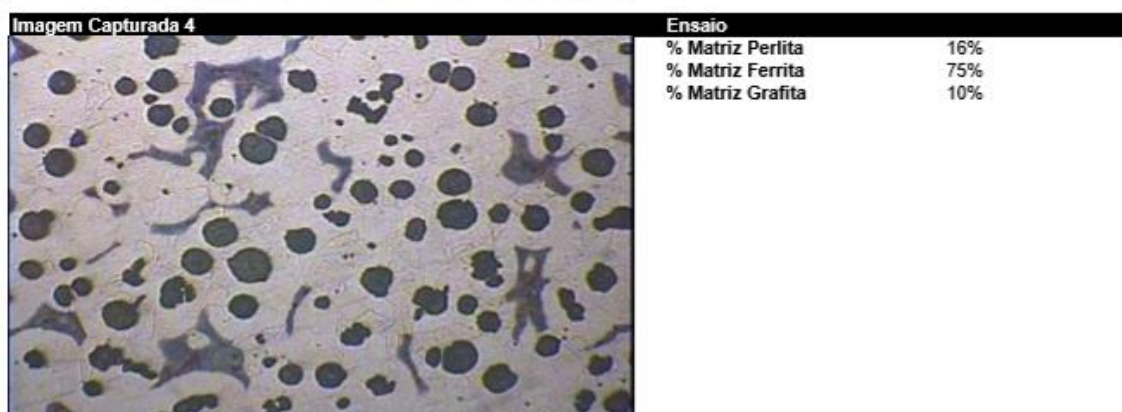
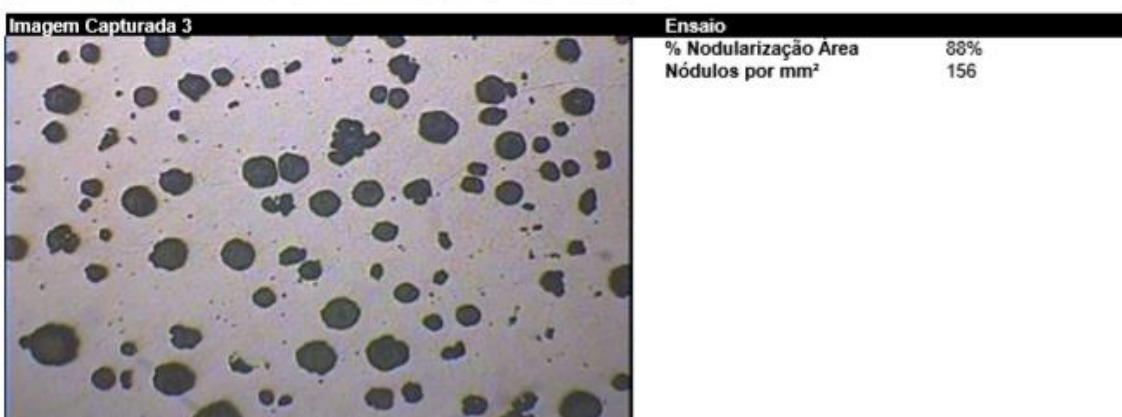
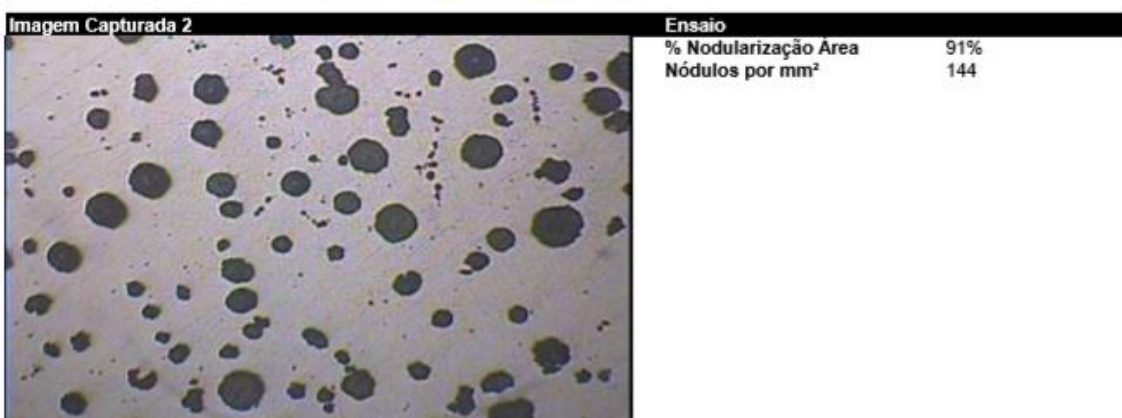
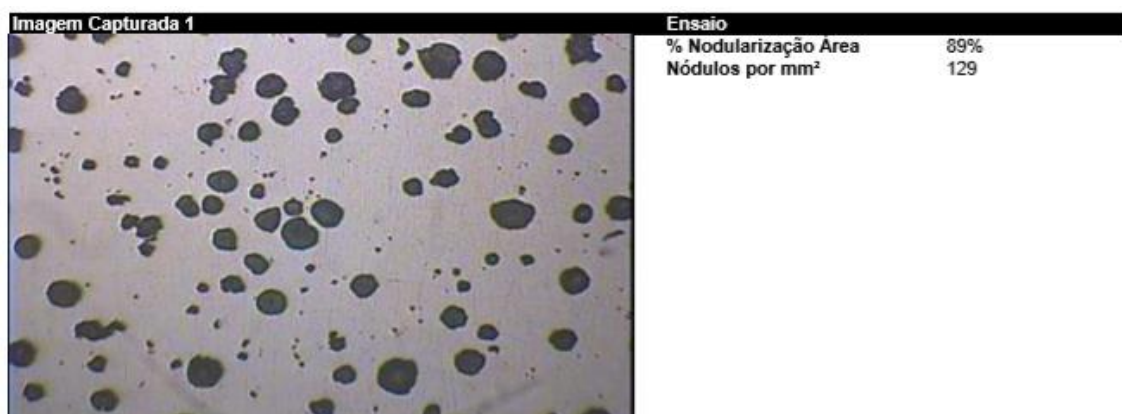


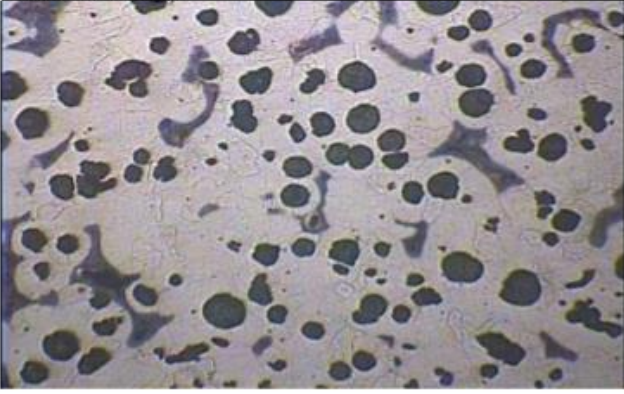
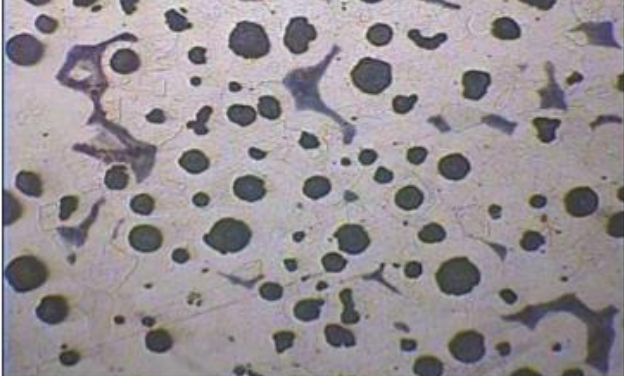
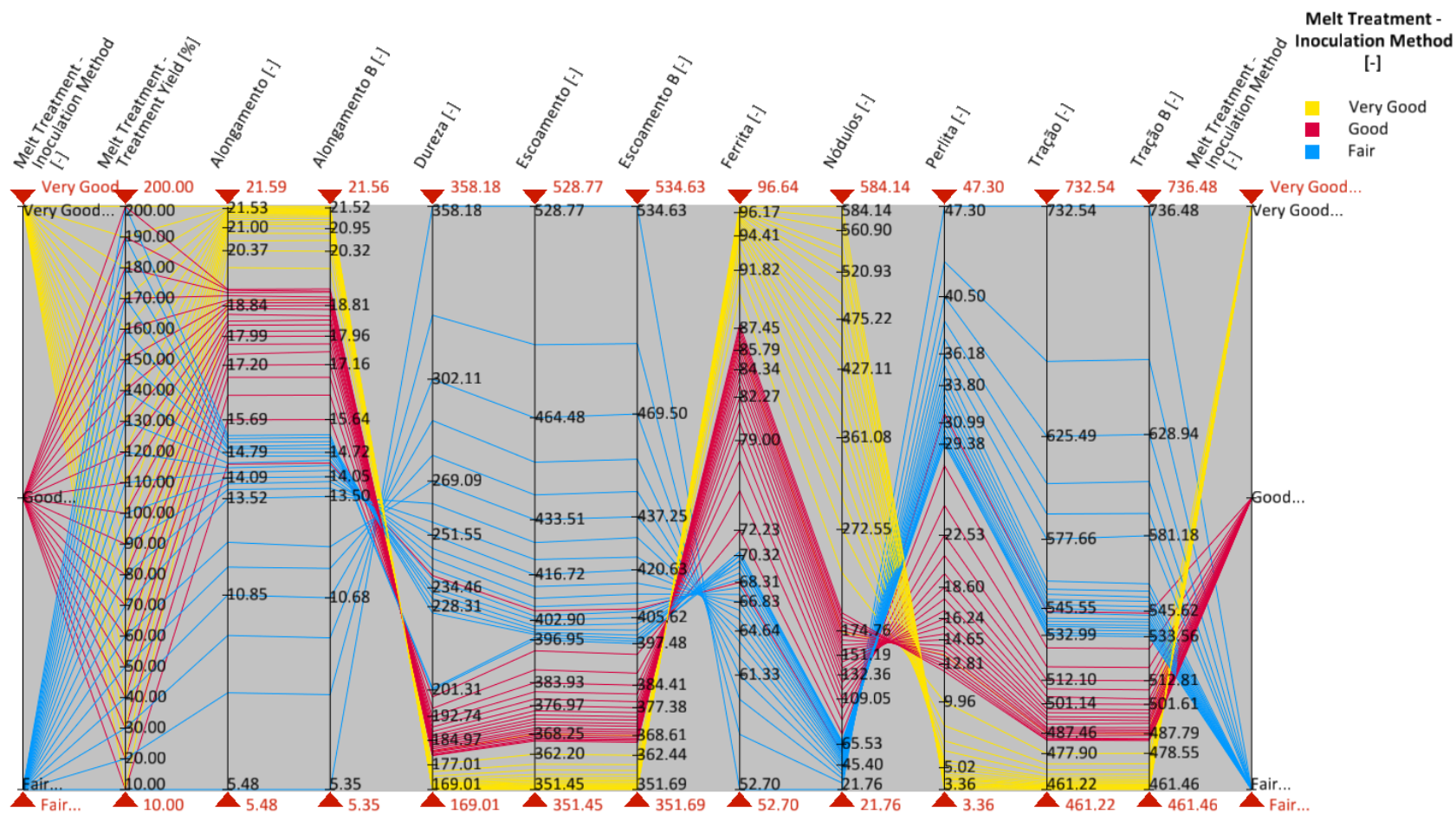
Imagem Capturada 5	Ensaio	
	% Matriz Perlita	15%
	% Matriz Ferrita	74%
	% Matriz Grafita	11%

Imagem Capturada 6	Ensaio	
	% Matriz Perlita	14%
	% Matriz Ferrita	78%
	% Matriz Grafita	8%

Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE D - INTERFACE DE RESULTADOS DOE



Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE E - ANÁLISE DE RESULTADOS DOE



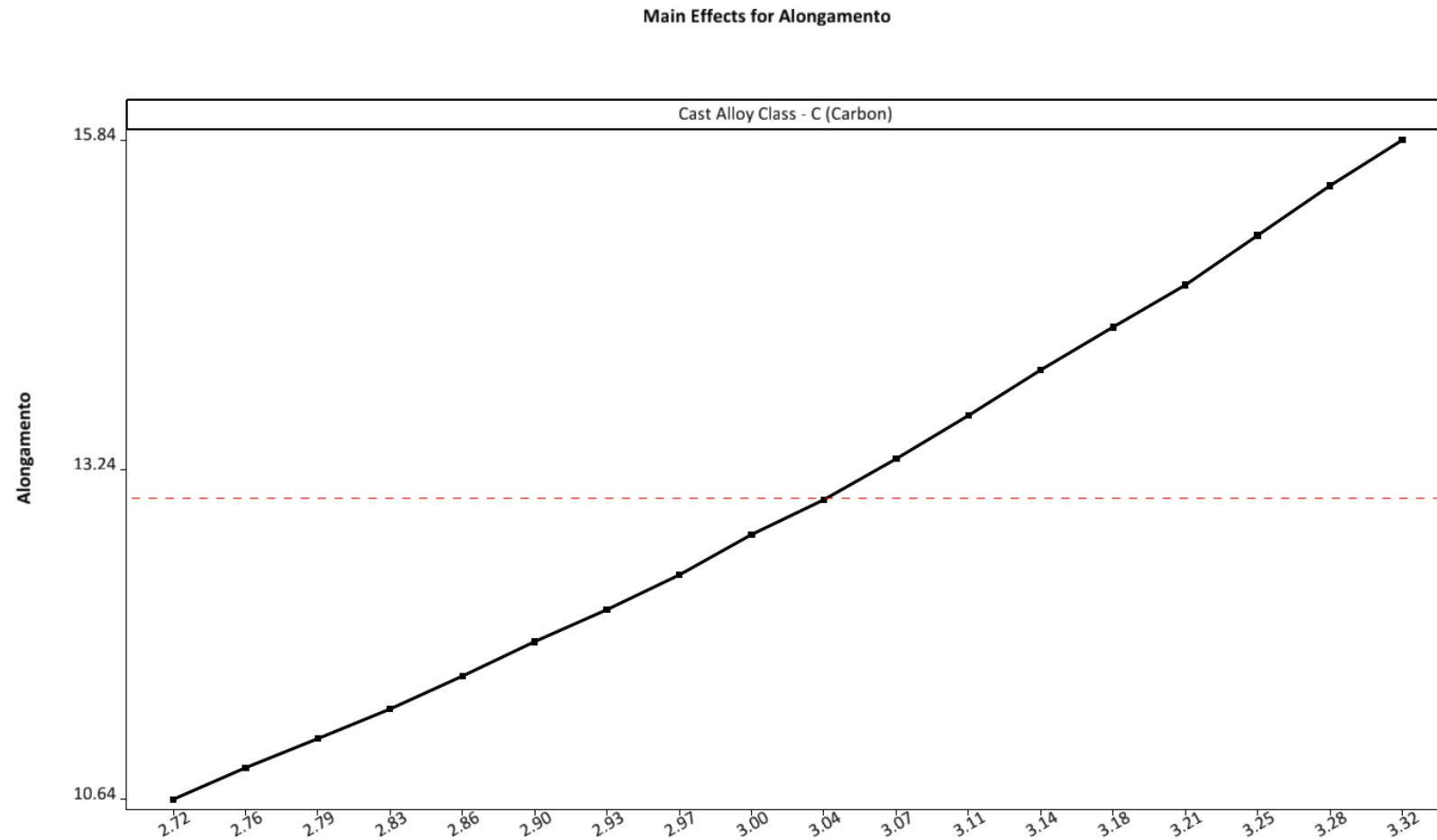
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE F - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE CORRELAÇÃO

	Resultados dos ensaios	Desing 28		Desing 29		Desing 32		Desing 35	
		Resultado	Variação (%)	Resultado	Variação (%)	Resultado	Variação (%)	Resultado	Variação (%)
Alongamento (%)	18,2	18,14	0,33	18,31	0,60	18,42	1,21	18,61	2,25
Alongamento B (%)	18,2	18,1	0,55	18,27	0,38	18,41	1,15	18,52	1,76
Dureza (HB)	163	185,85	-12,29	184,97	13,48	184,21	13,01	183,61	12,64
Escoamento (MPa)	346,45	374,14	-7,40	372,96	7,65	372,05	7,39	371,13	7,12
Escoamento B (MPa)	346,45	374,53	-7,50	373,51	7,81	372,36	7,48	371,52	7,24
Ferrita (%)	83,46	83,15	0,37	83,76	0,36	84,34	1,05	84,91	1,74
Nódulos (%)	143	138,84	3,00	144,92	1,34	151,19	5,73	156,56	9,48
Perlita (%)	16,54	16,85	-1,84	16,24	-1,81	15,66	-5,32	15,09	-8,77
Tração (MPa)	473,21	497	-4,79	495,1	4,63	493,82	4,36	491,74	3,92
Tração B (MPa)	473,21	497,4	-4,86	495,5	4,71	493,98	4,39	492,68	4,11
Tratamento do banho metálico	-	Good		Good		Good		Good	
Rendimento do tratamento (%)	-	90		100		110		120	

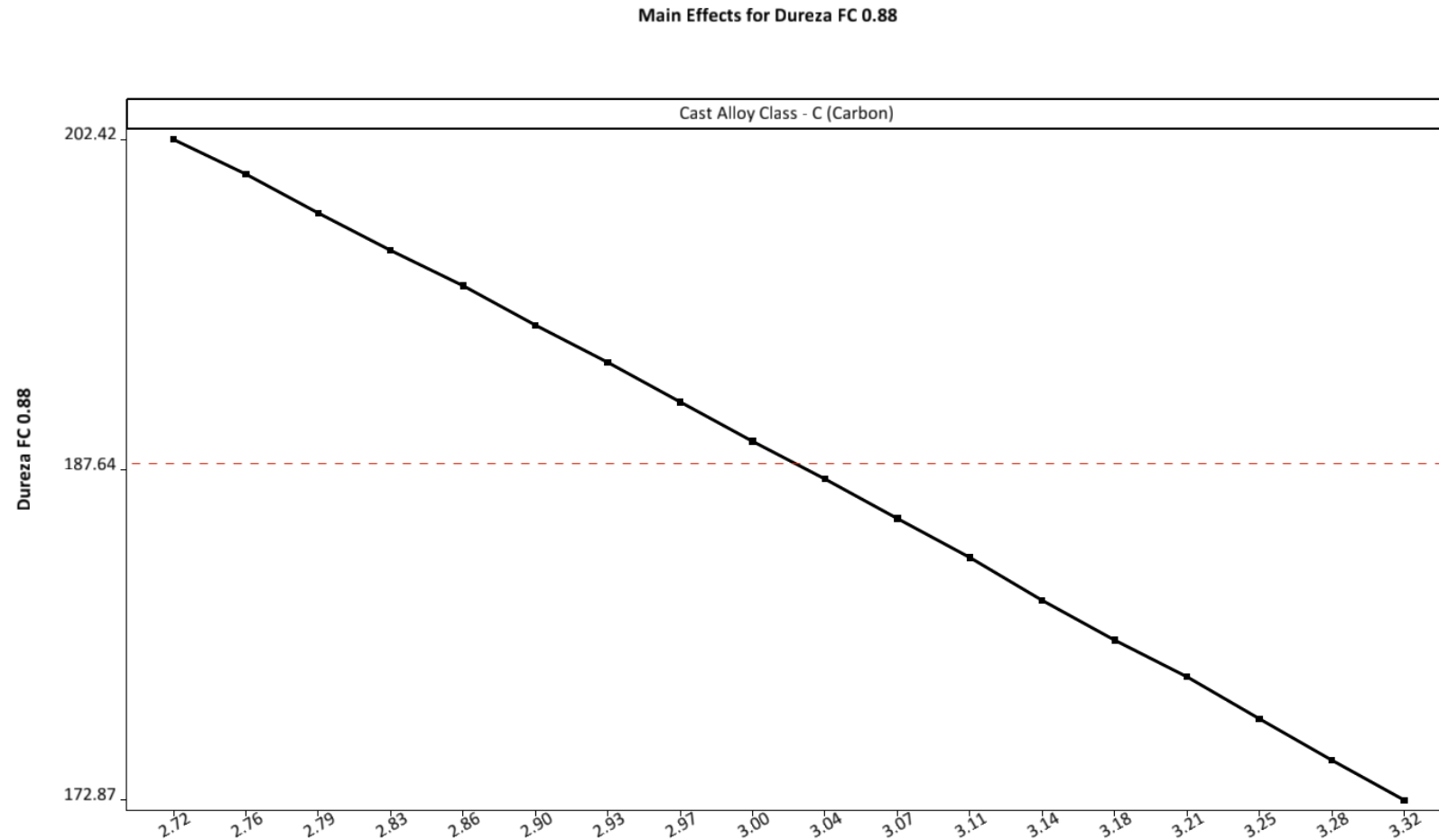
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE G - CARBONO / ALONGAMENTO (HIPOEUTÉTICO)



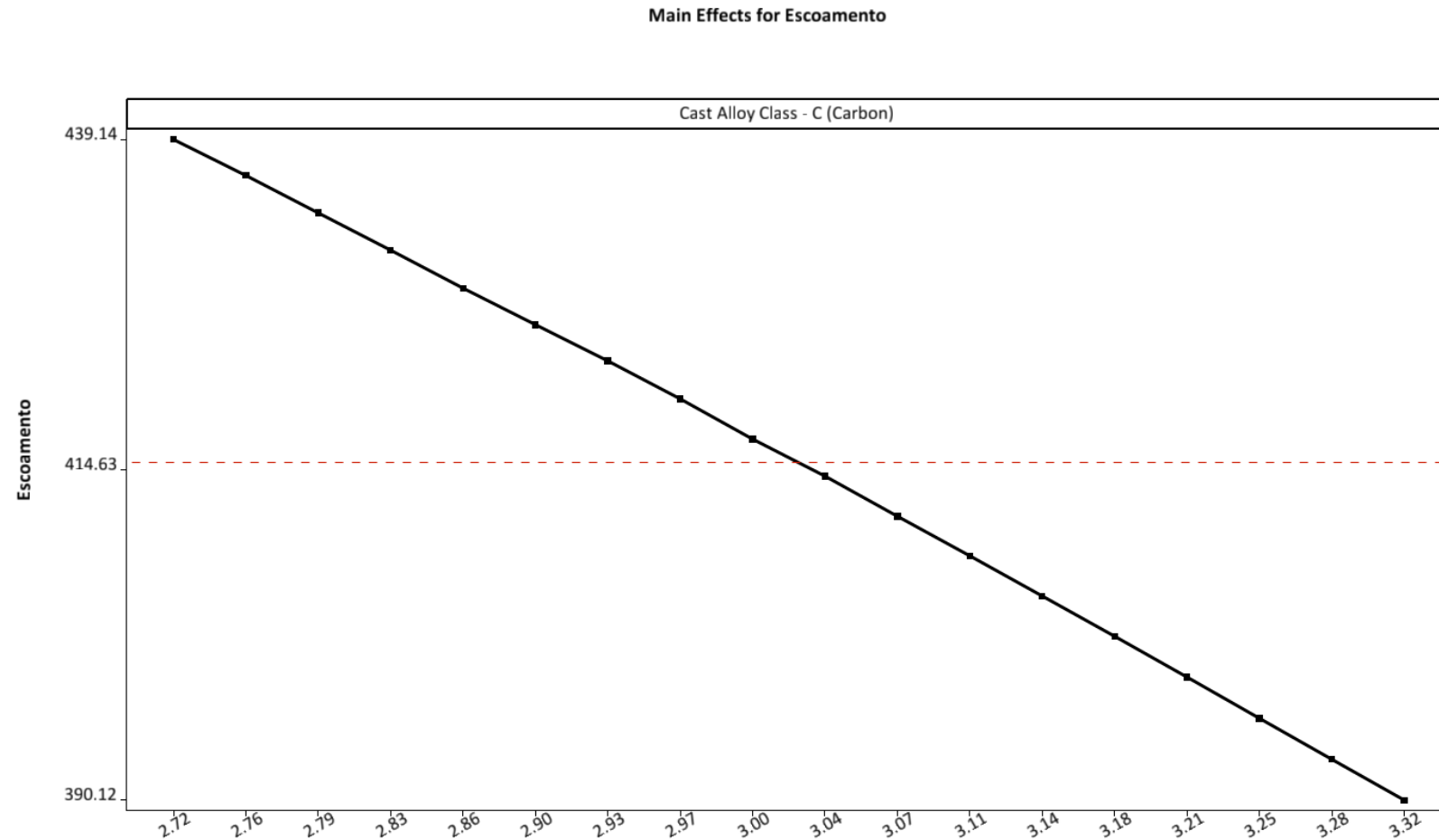
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE H - CARBONO / DUREZA (HIPOEUTÉTICO)



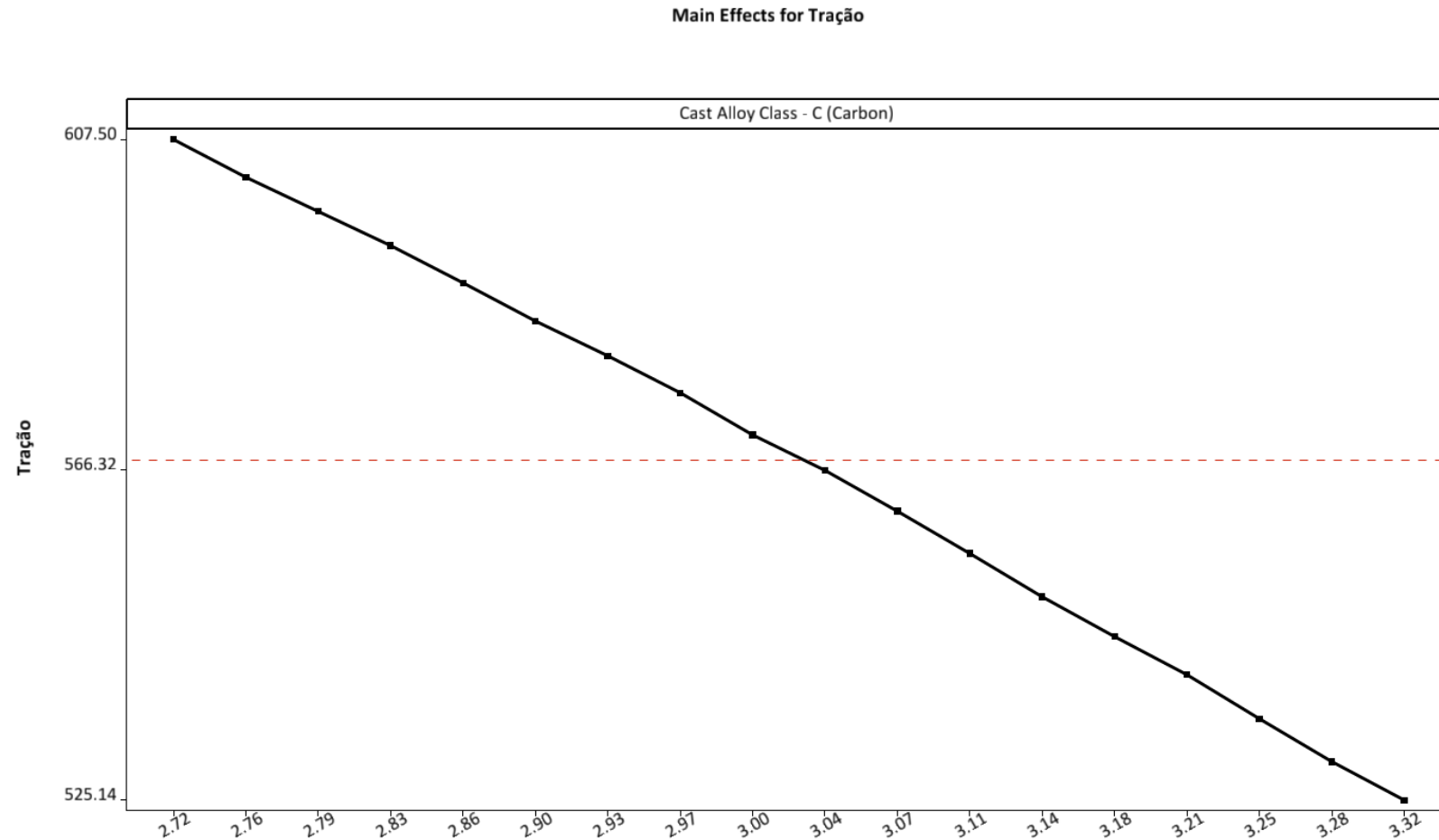
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE I - CARBONO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (HIPOEUTÉTICO)



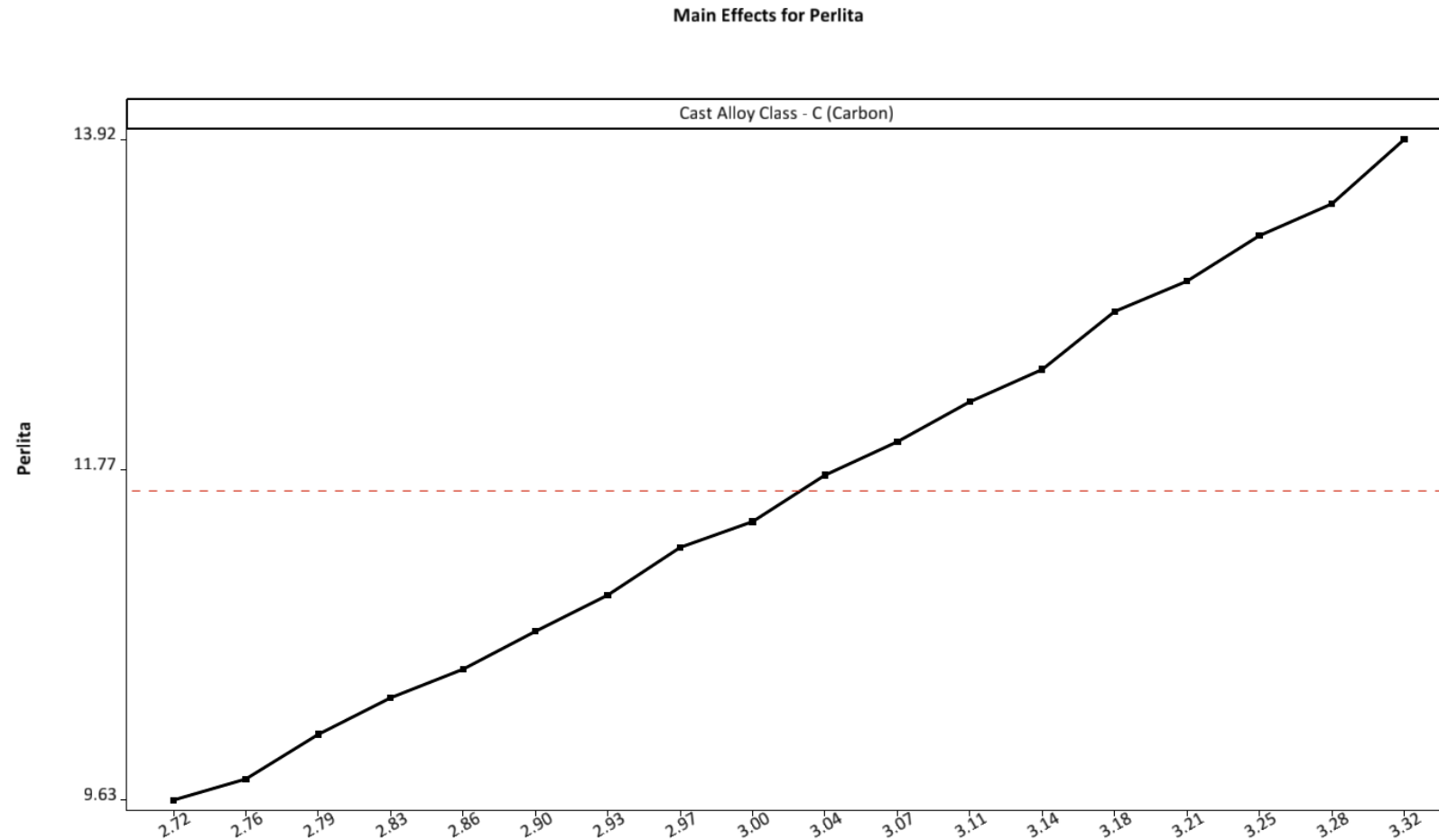
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE J - CARBONO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (HIPOEUTÉTICO)



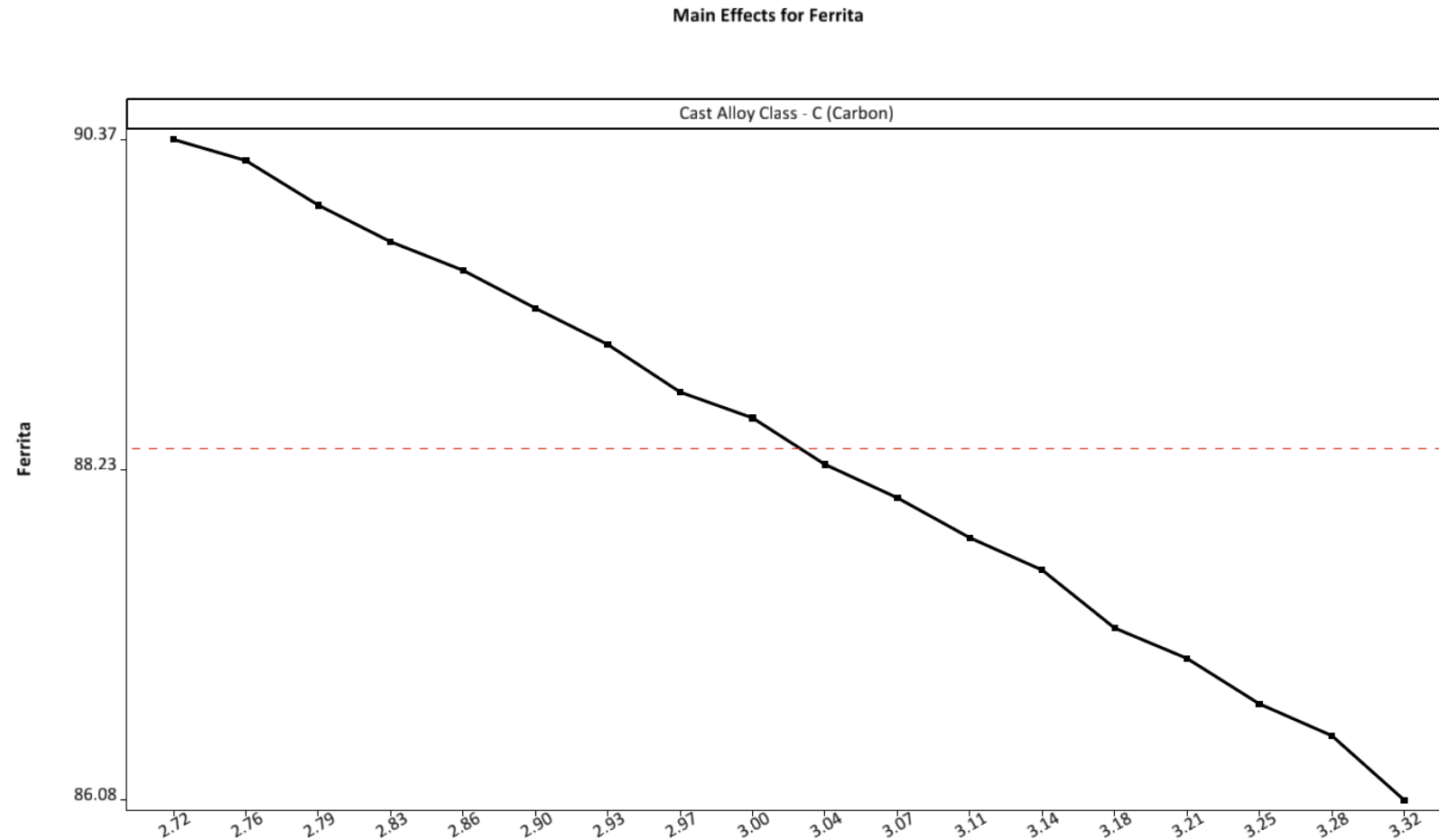
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE K - CARBONO / FORMAÇÃO DE PERLITA (HIPOEUTÉTICO)



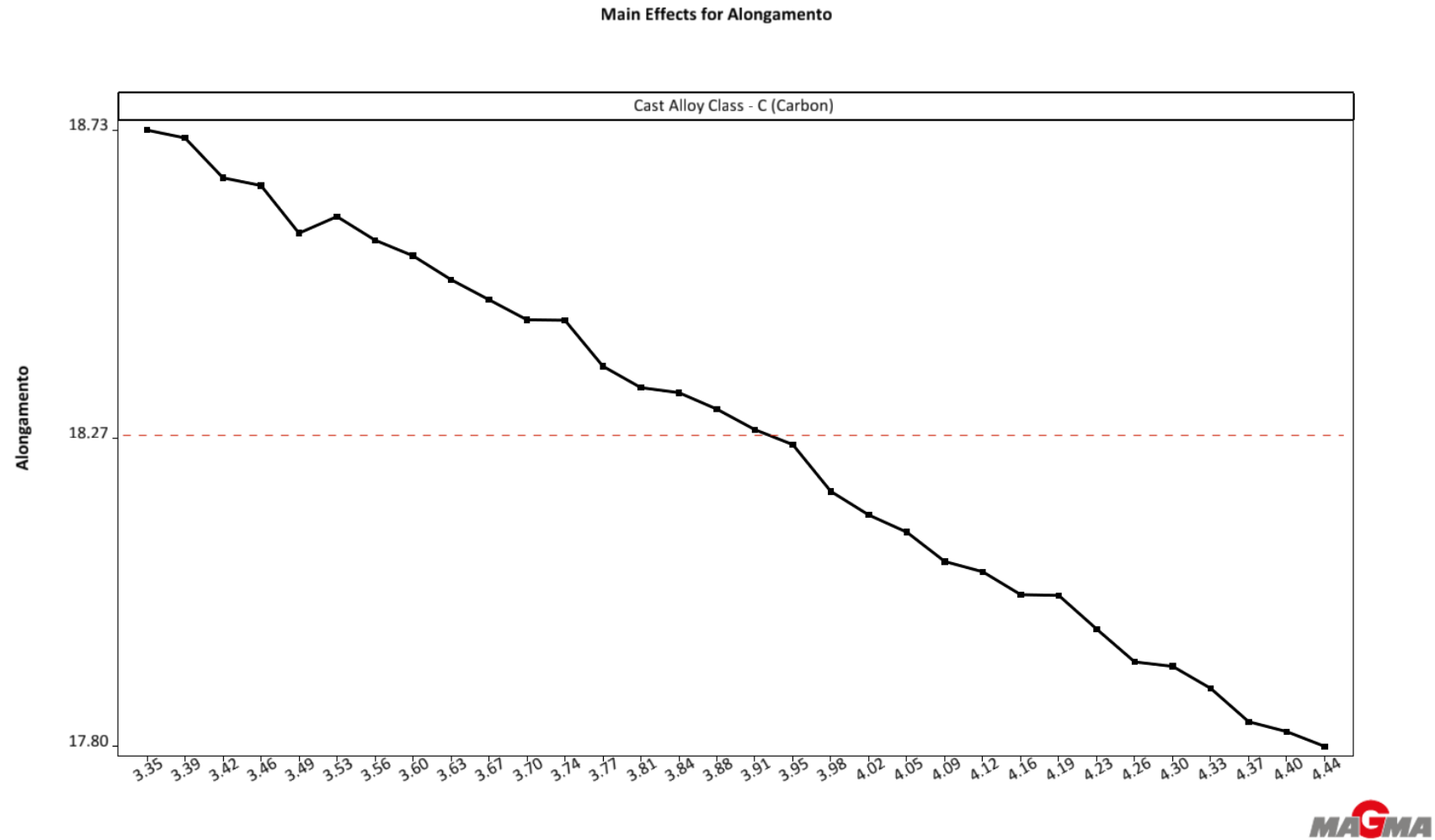
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE L - CARBONO / FORMAÇÃO DE FERRITA (HIPOEUTÉTICO)

**MAGMA**

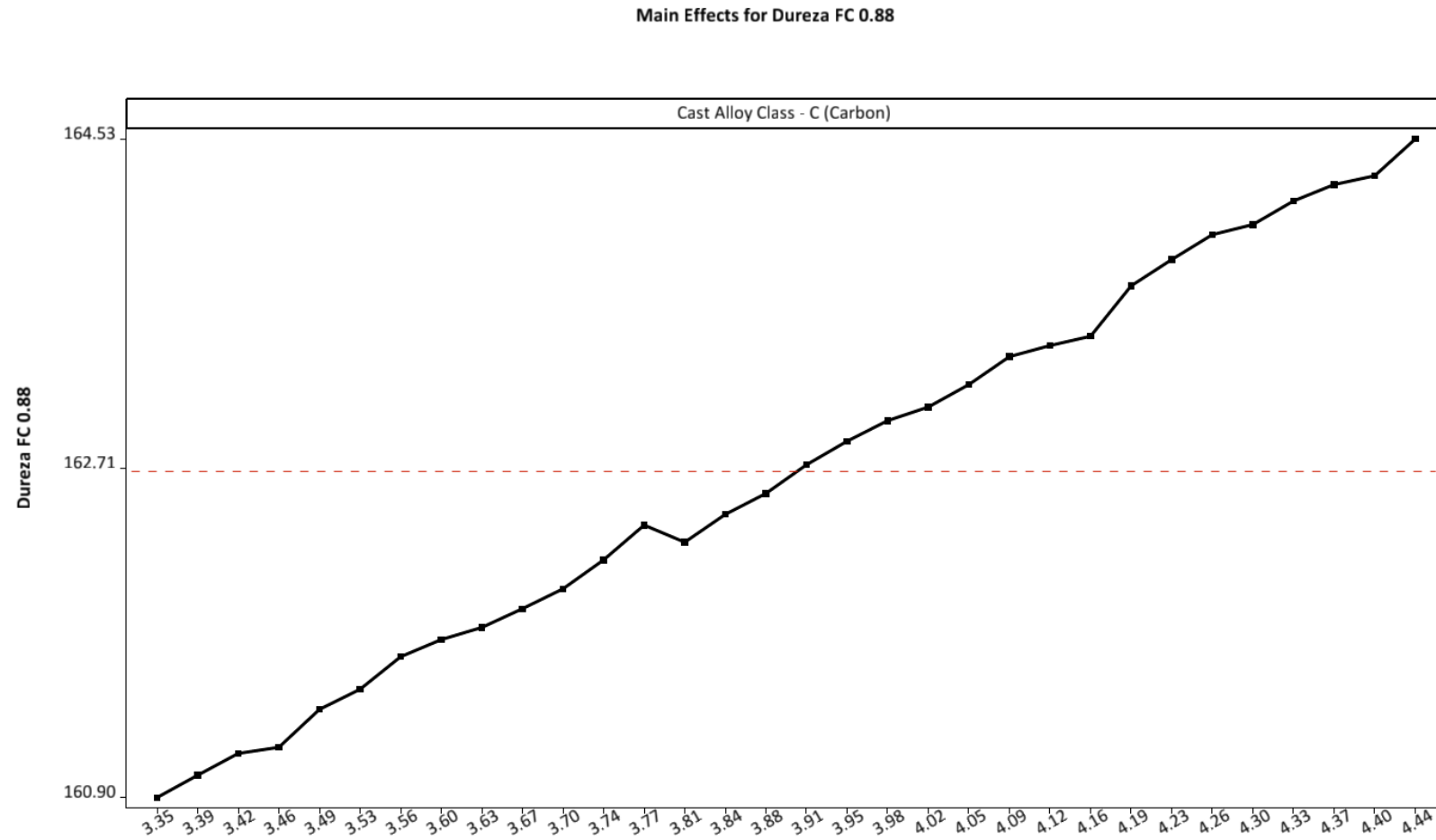
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE M - CARBONO / ALONGAMENTO (HIPEREUTÉTICO)

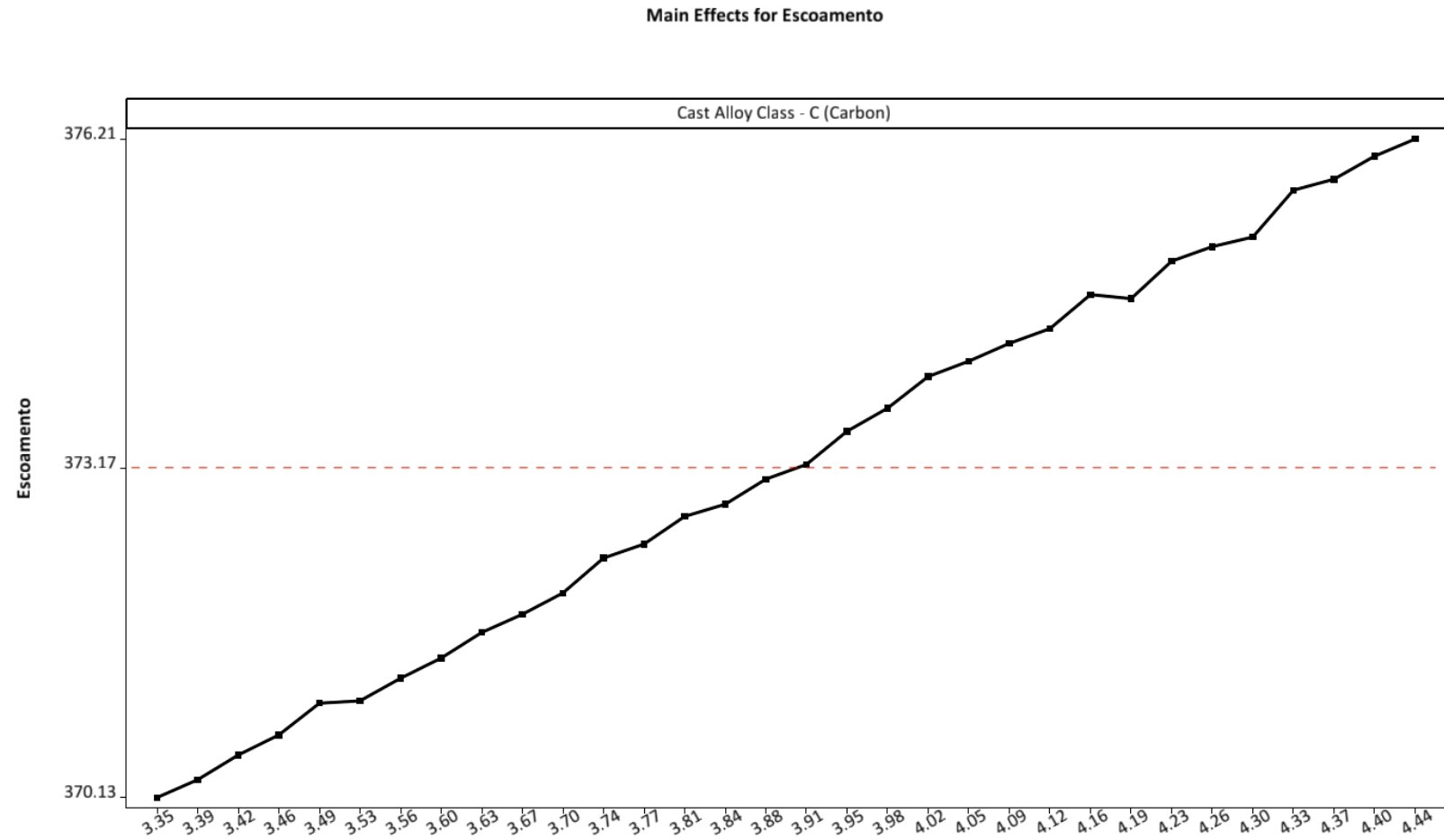


Fonte: O autor, 2018.

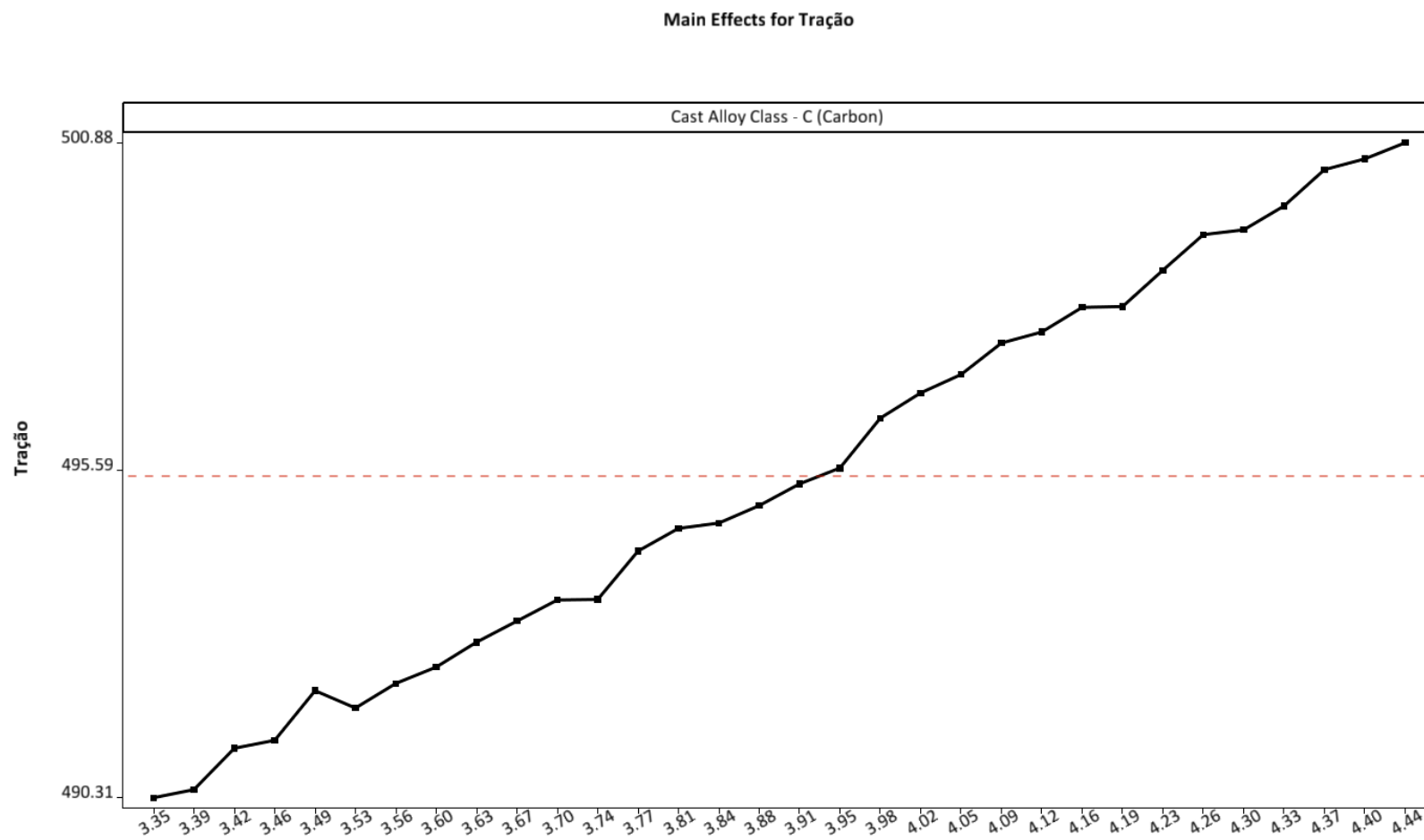
APÊNDICE N - CARBONO / DUREZA (HIPEREUTÉTICO)



APÊNDICE O - CARBONO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (HIPEREUTÉTICO)

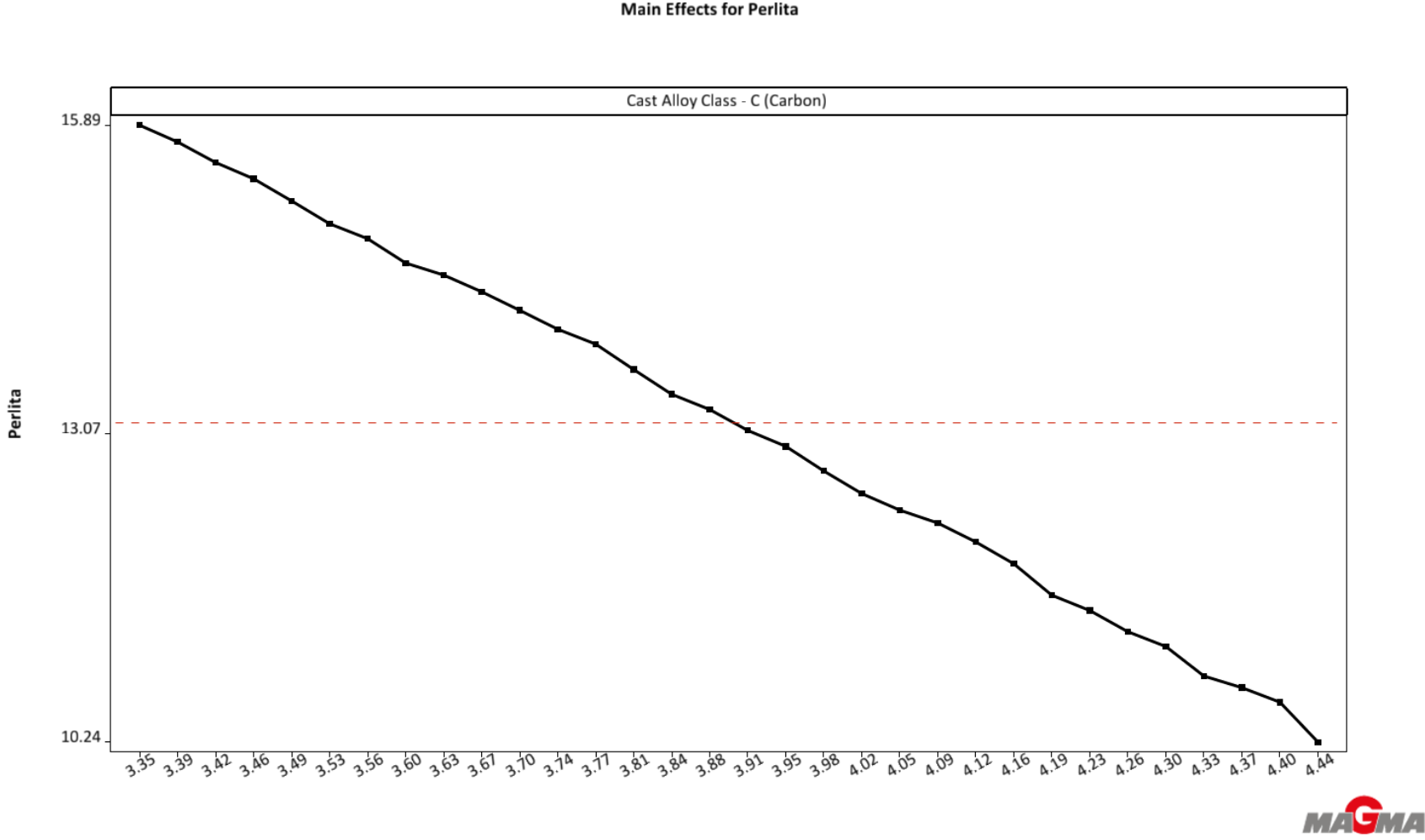


APÊNDICE P - CARBONO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (HIPEREUTÉTICO)



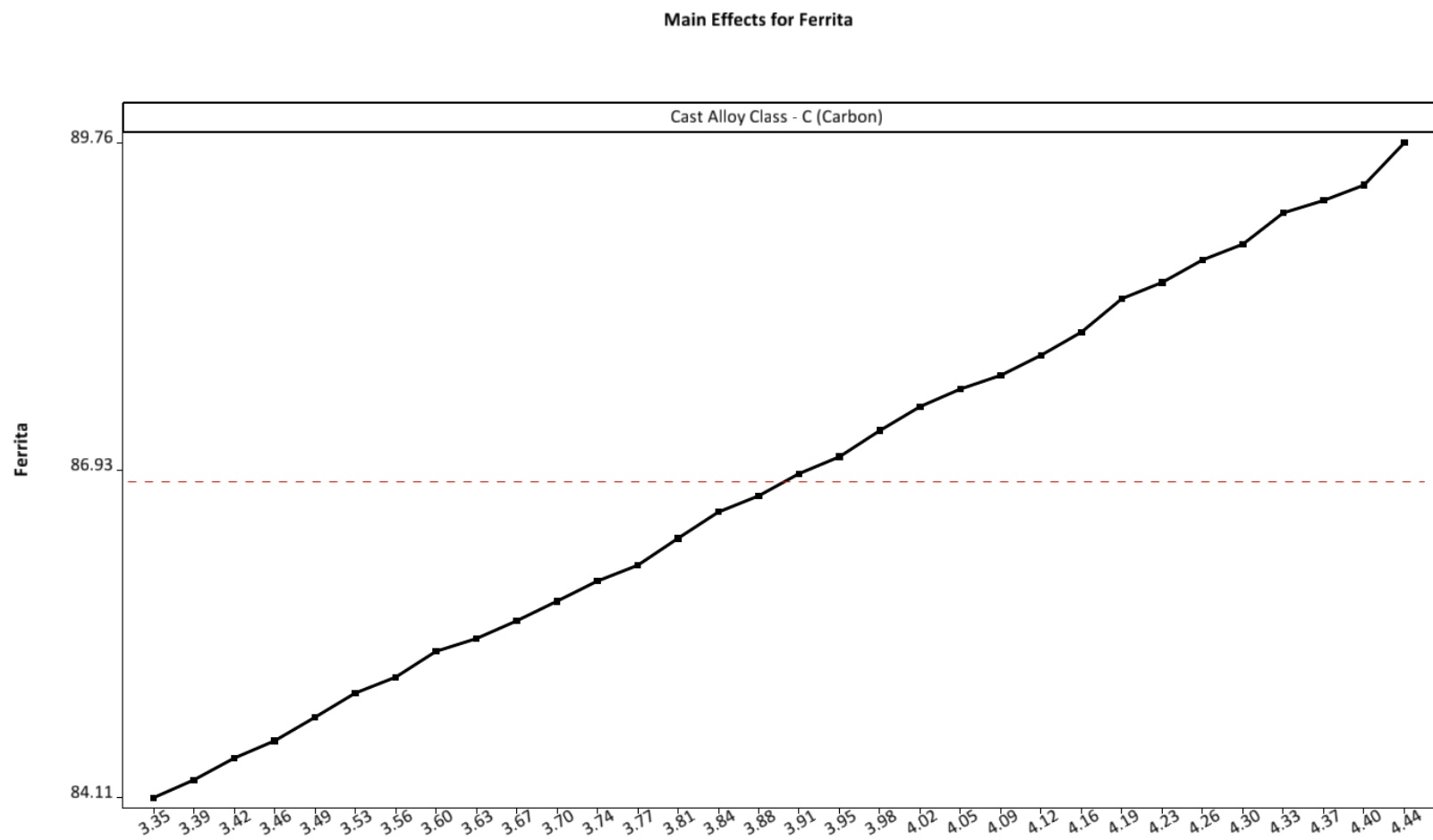
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE Q - CARBONO / FORMAÇÃO DE PERLITA (HIPEREUTÉTICO)

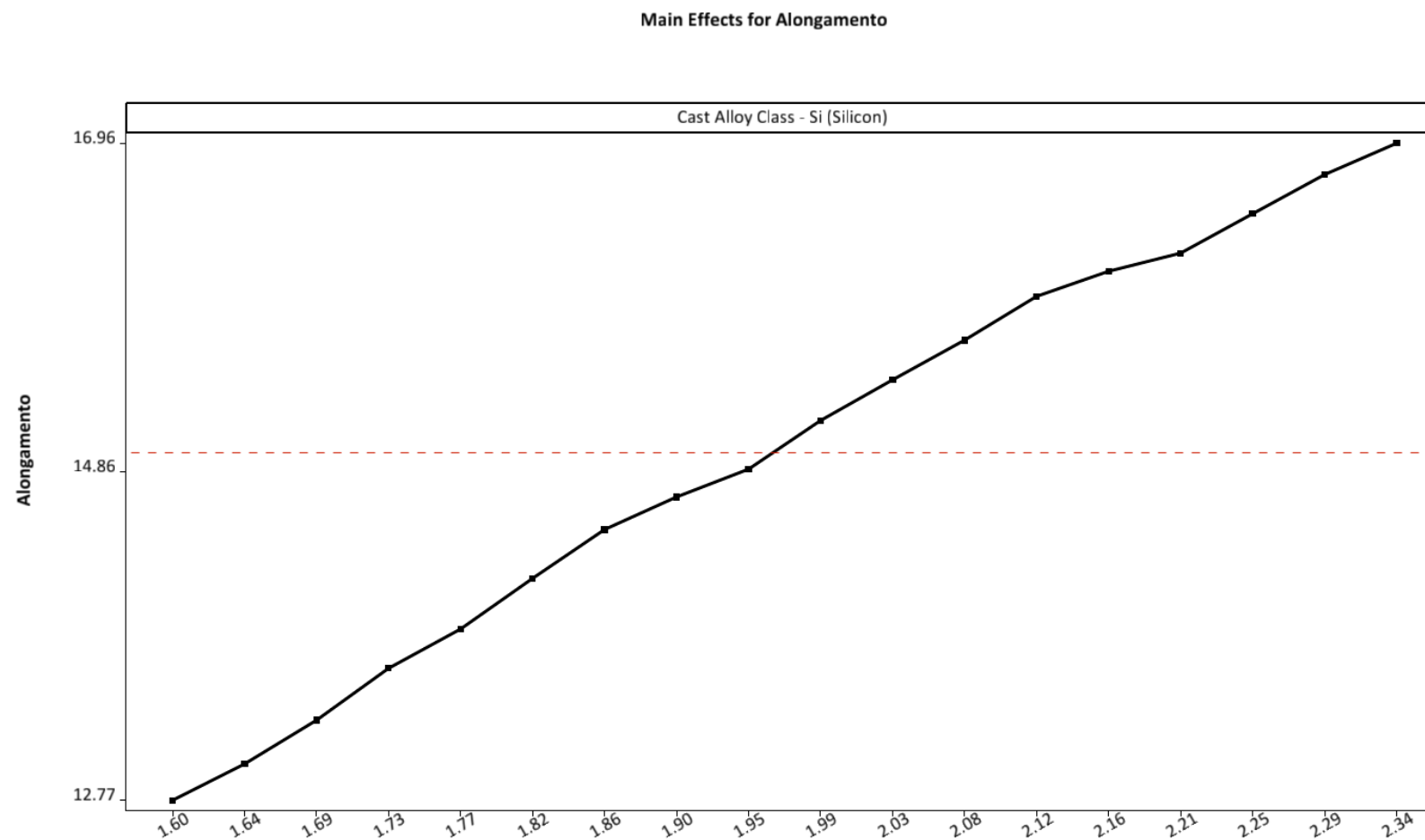


Fonte: O autor, 2018.

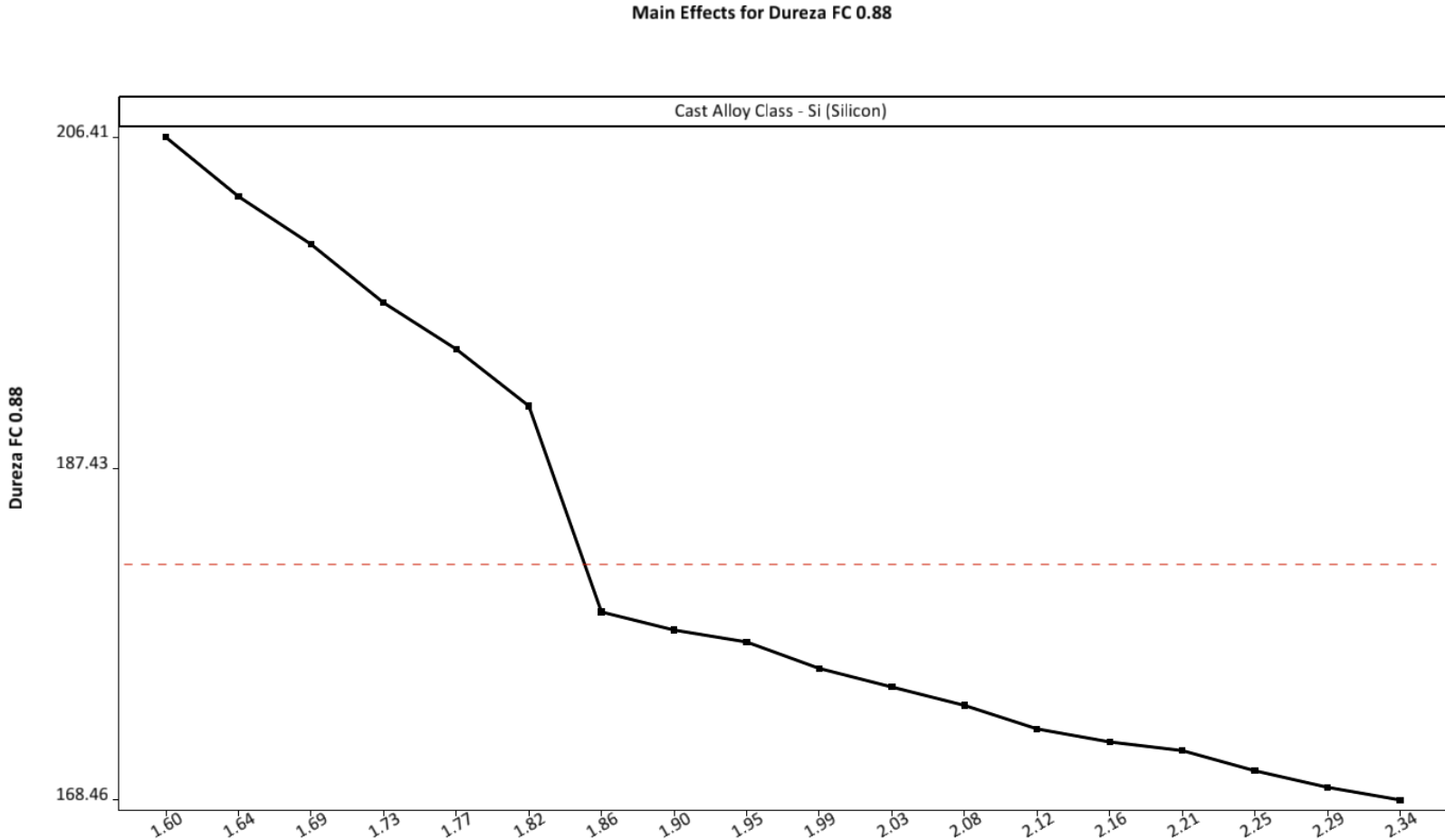
APÊNDICE R - CARBONO / FORMAÇÃO DE FERRITA (HIPEREUTÉTICO)



APÊNDICE S - SILÍCIO / ALONGAMENTO (HIPOEUTÉTICO)

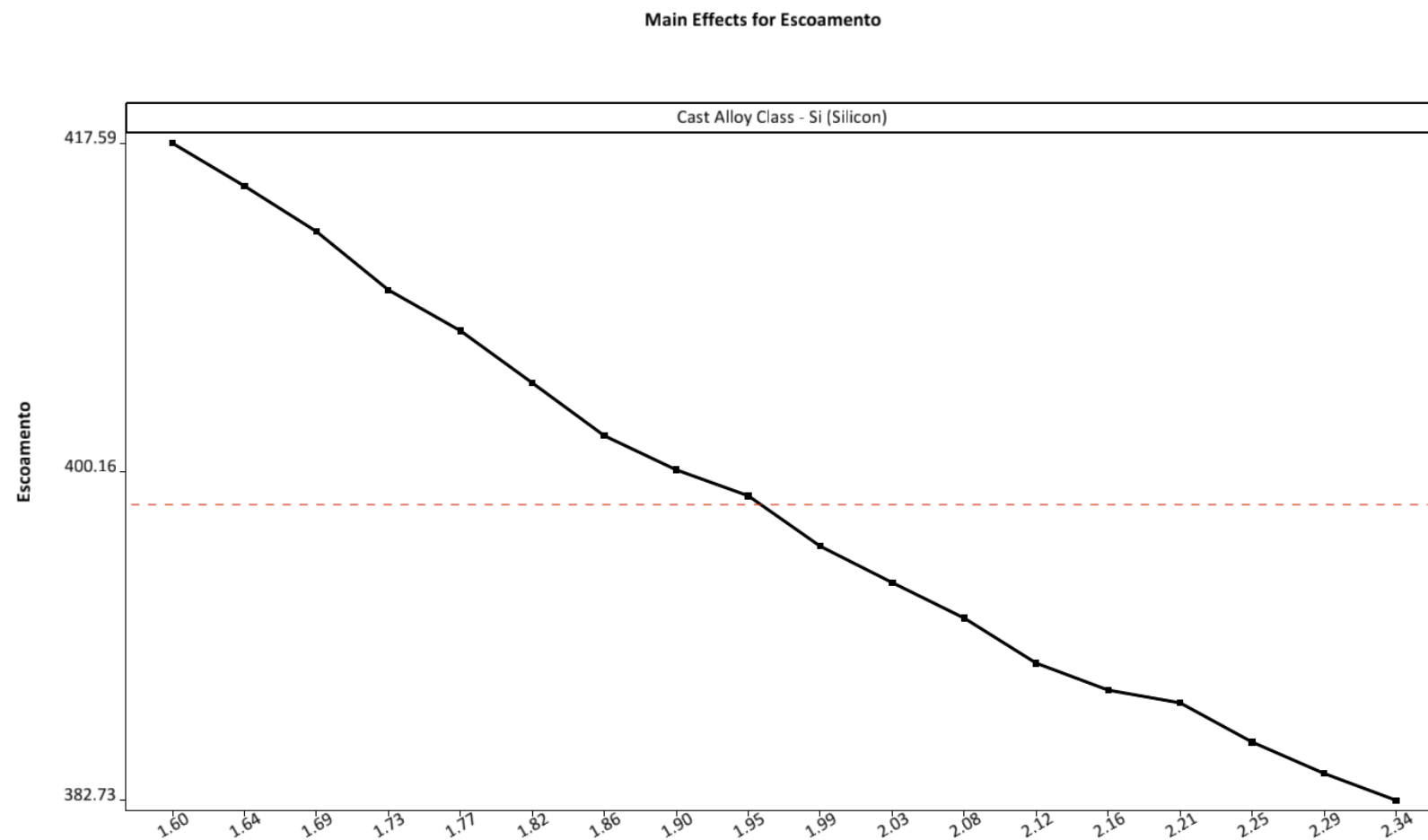


APÊNDICE T - SILÍCIO / DUREZA (HIPOEUTÉTICO)

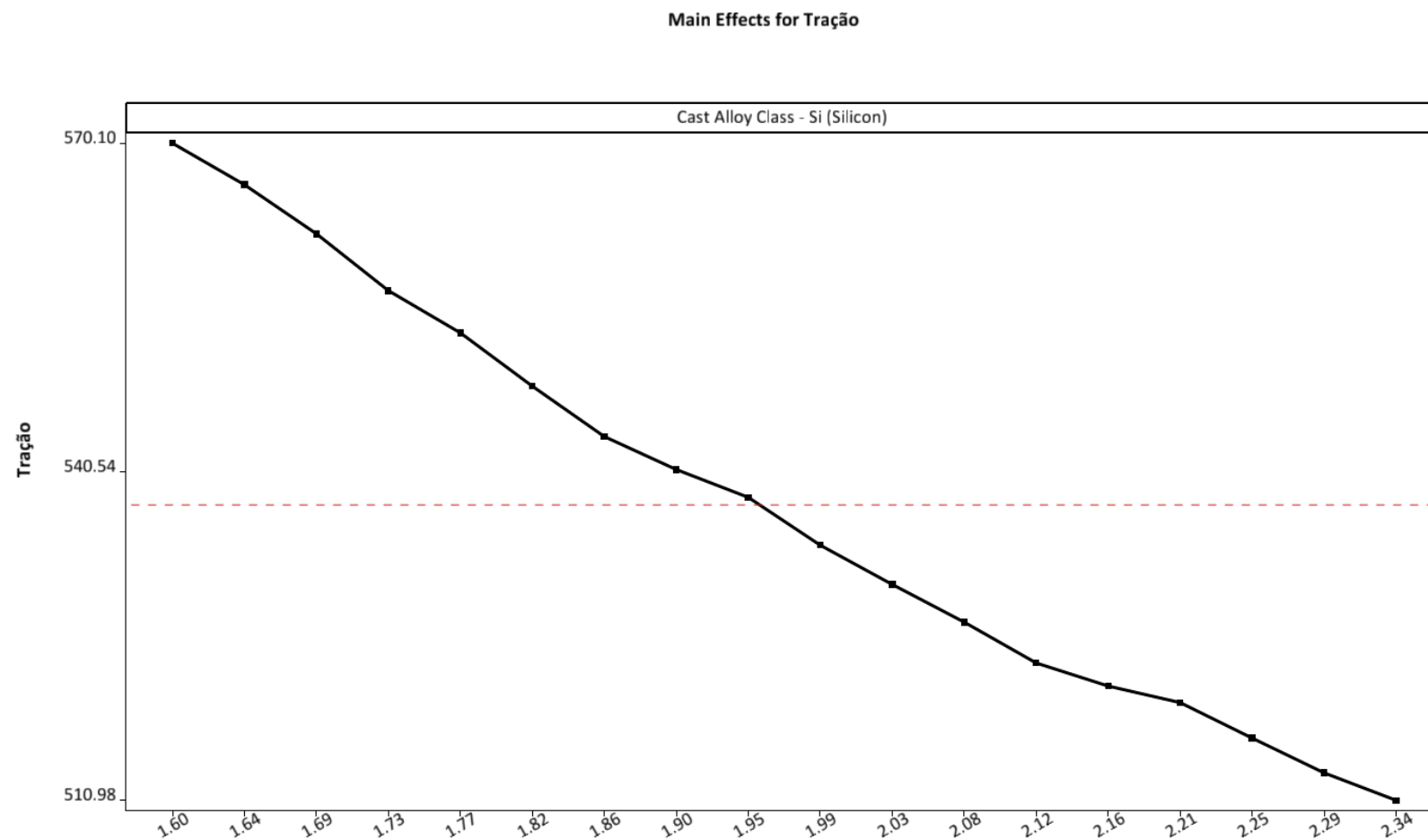


Fonte: O autor, 2018.

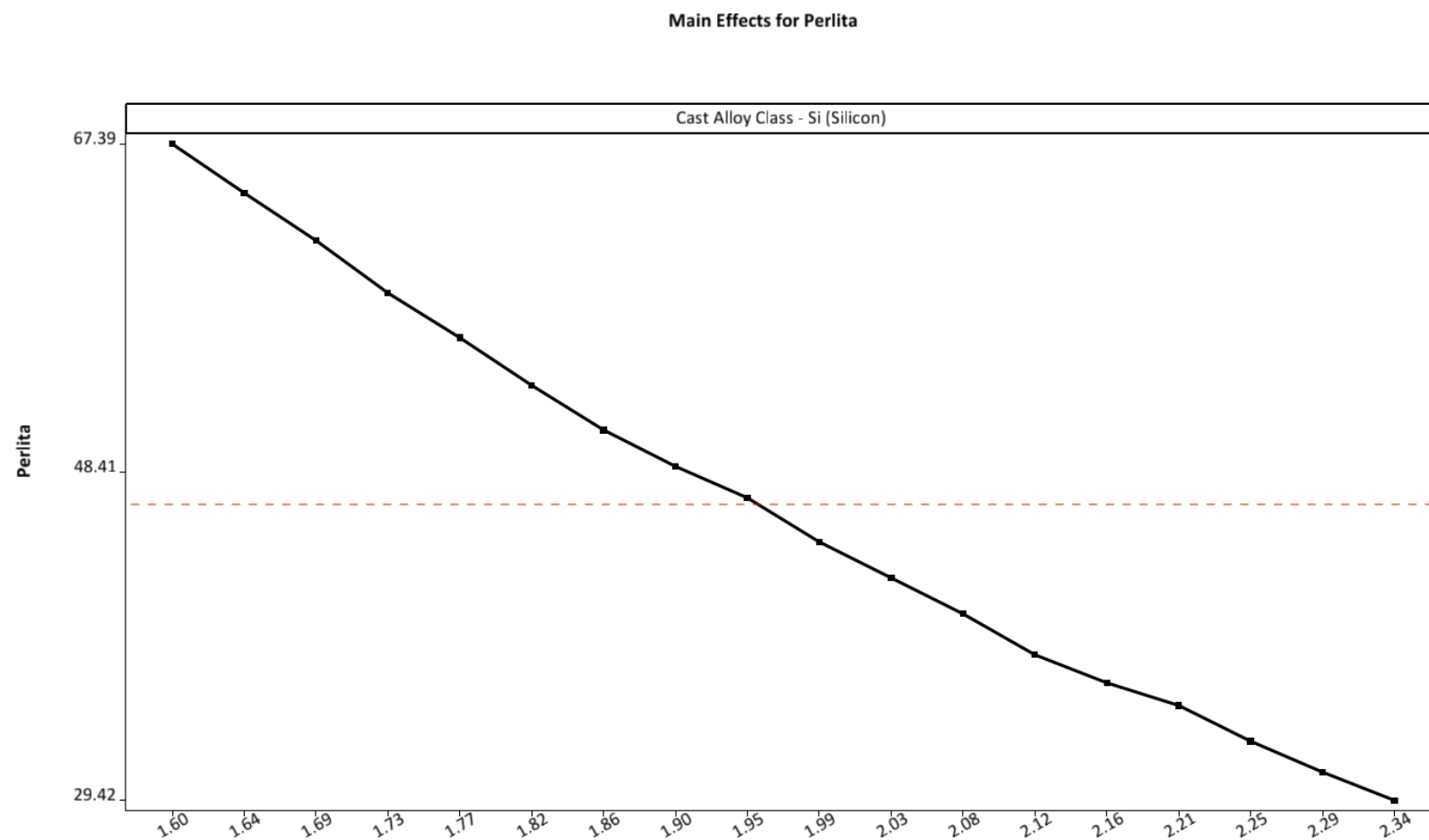
APÊNDICE U - SILÍCIO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (HIPOEUTÉTICO)



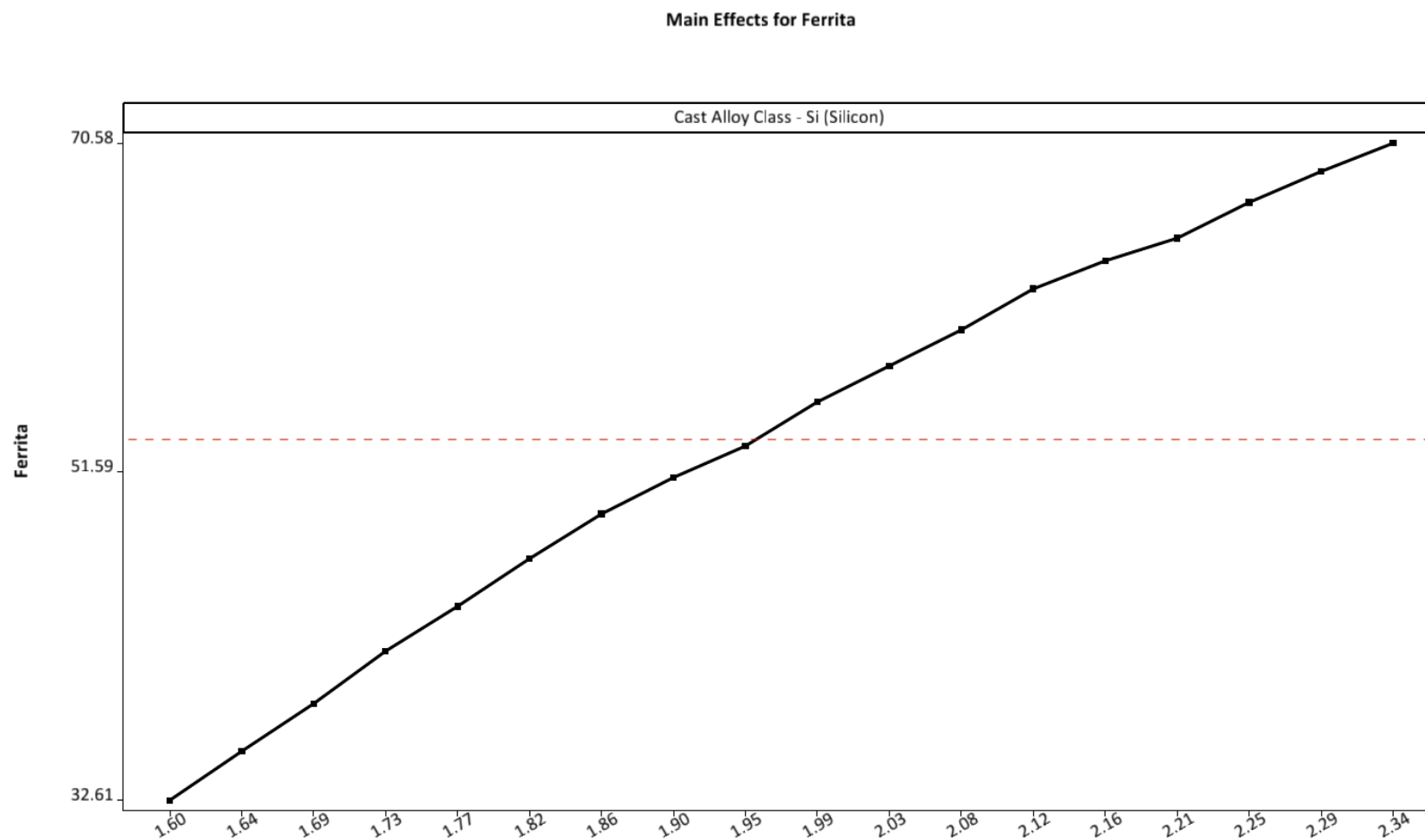
APÊNDICE V - SILÍCIO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (HIPOEUTÉTICO)



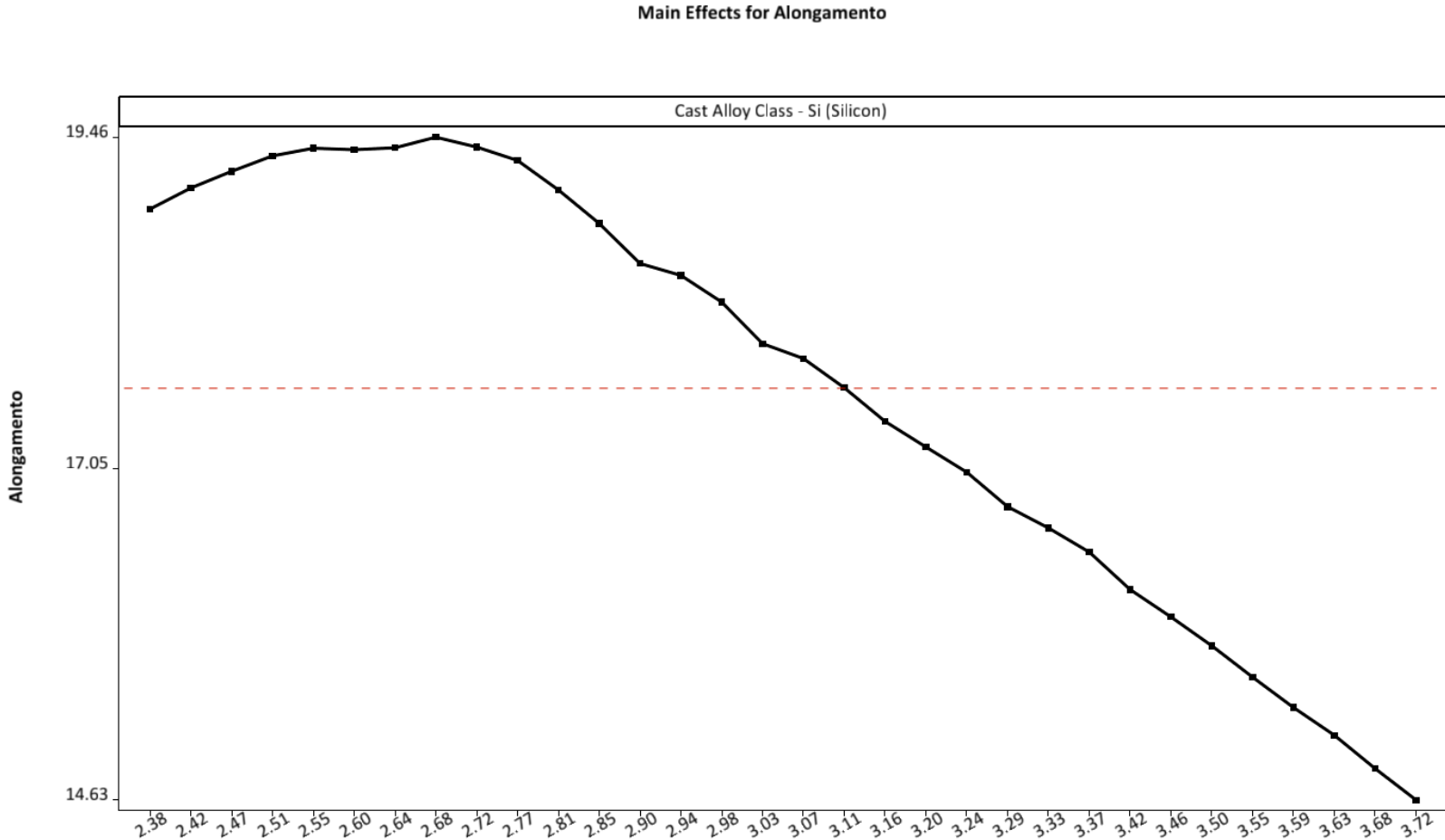
APÊNDICE W - SILÍCIO / FORMAÇÃO DE PERLITA (HIPOEUTÉTICO)



APÊNDICE X - SILÍCIO / FORMAÇÃO DE FERRITA (HIPOEUTÉTICO)

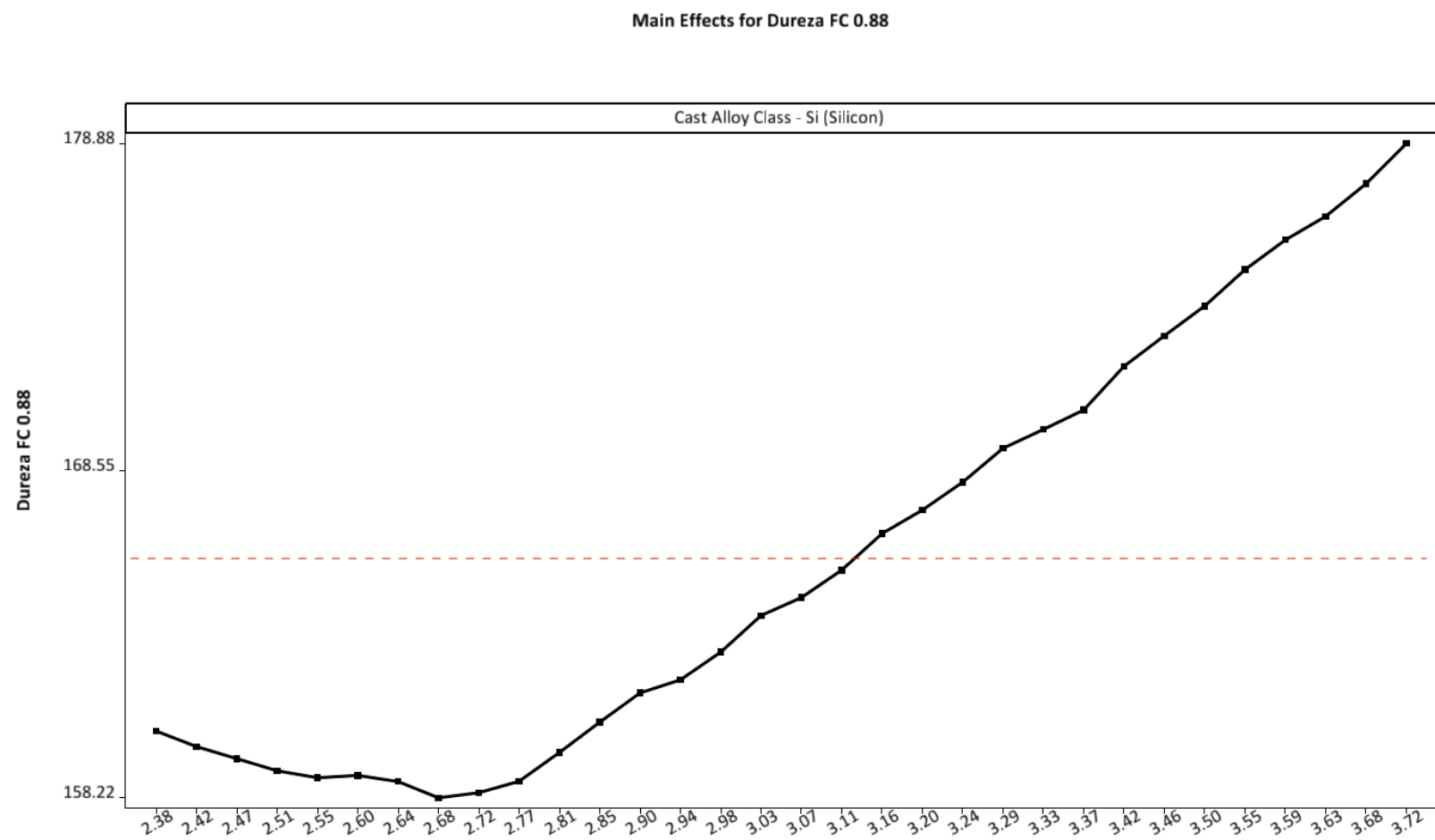


APÊNDICE Y - SILÍCIO / ALONGAMENTO (HIPEREUTÉTICO)



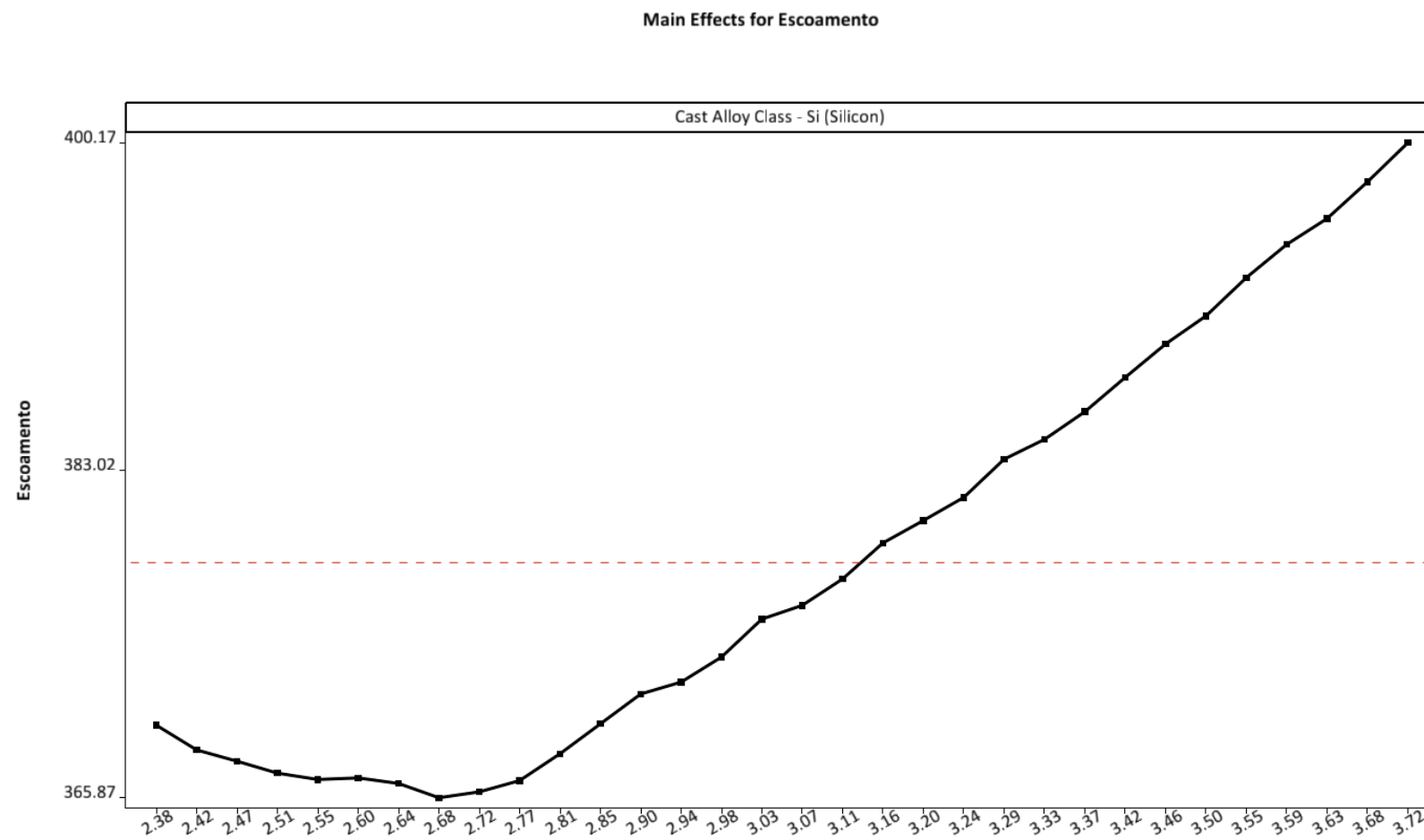
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE Z - SILÍCIO / DUREZA (HIPEREUTÉTICO)

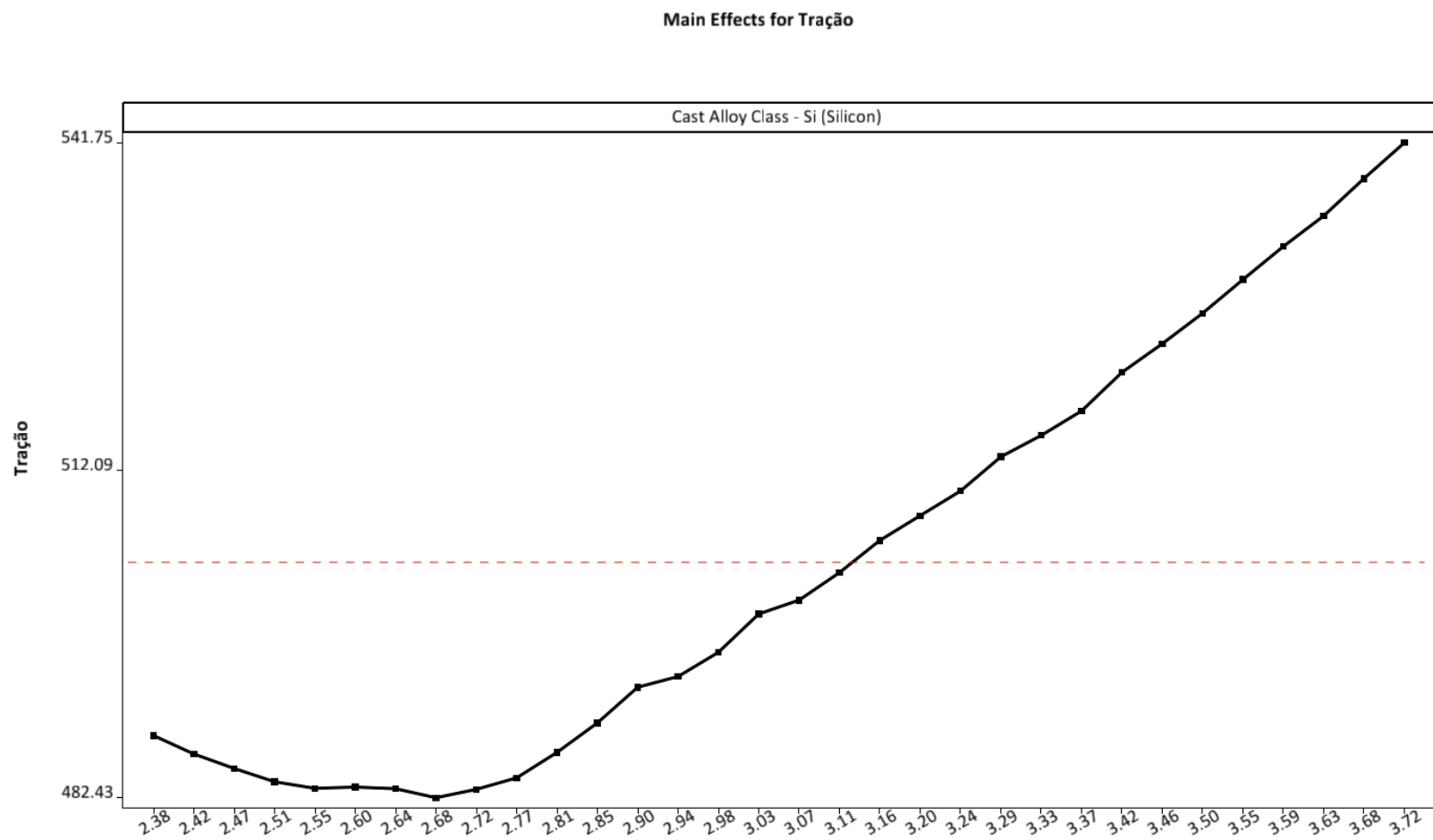


Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AA - SILÍCIO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (HIPEREUTÉTICO)

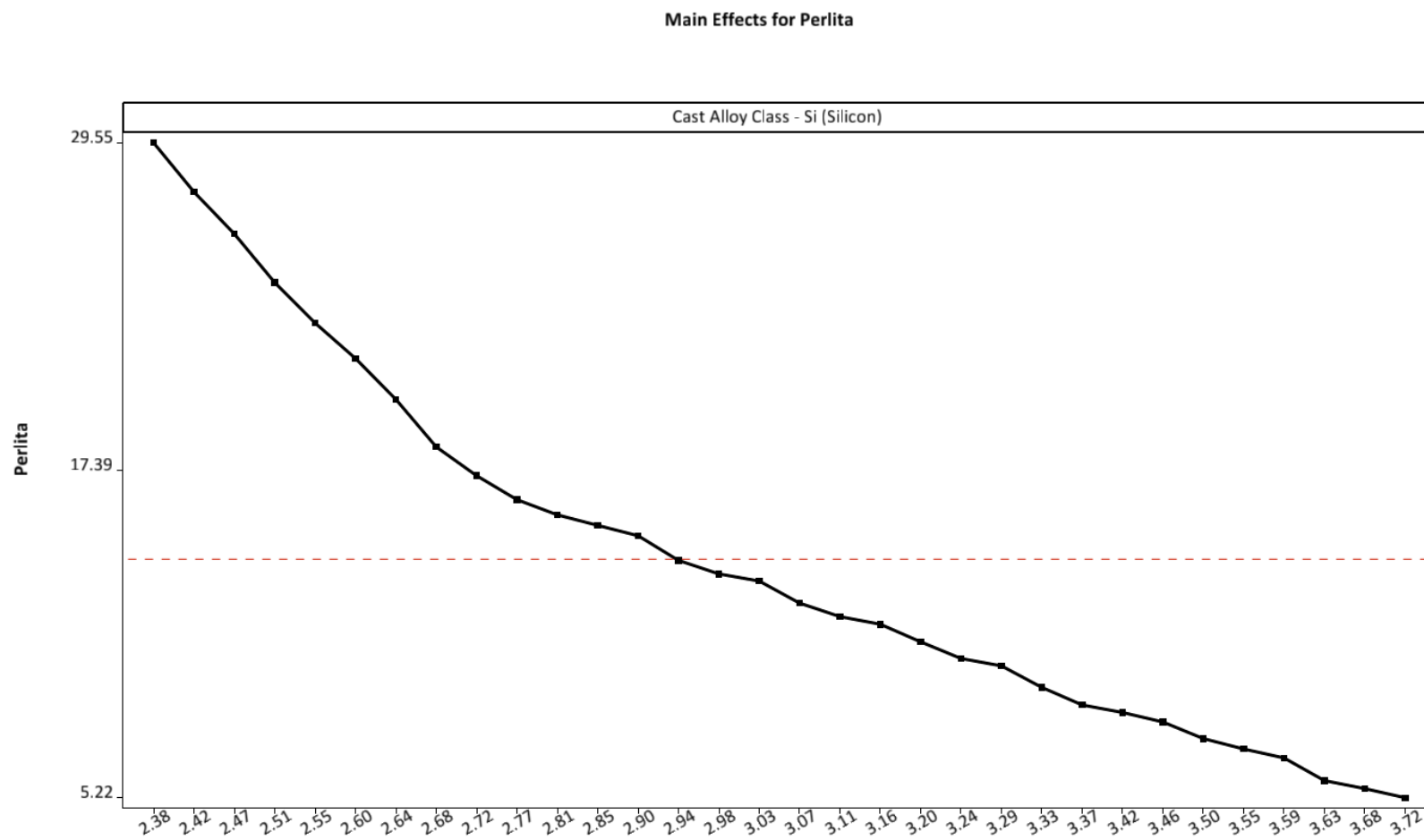


APÊNDICE AB - SILÍCIO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (HIPEREUTÉTICO)

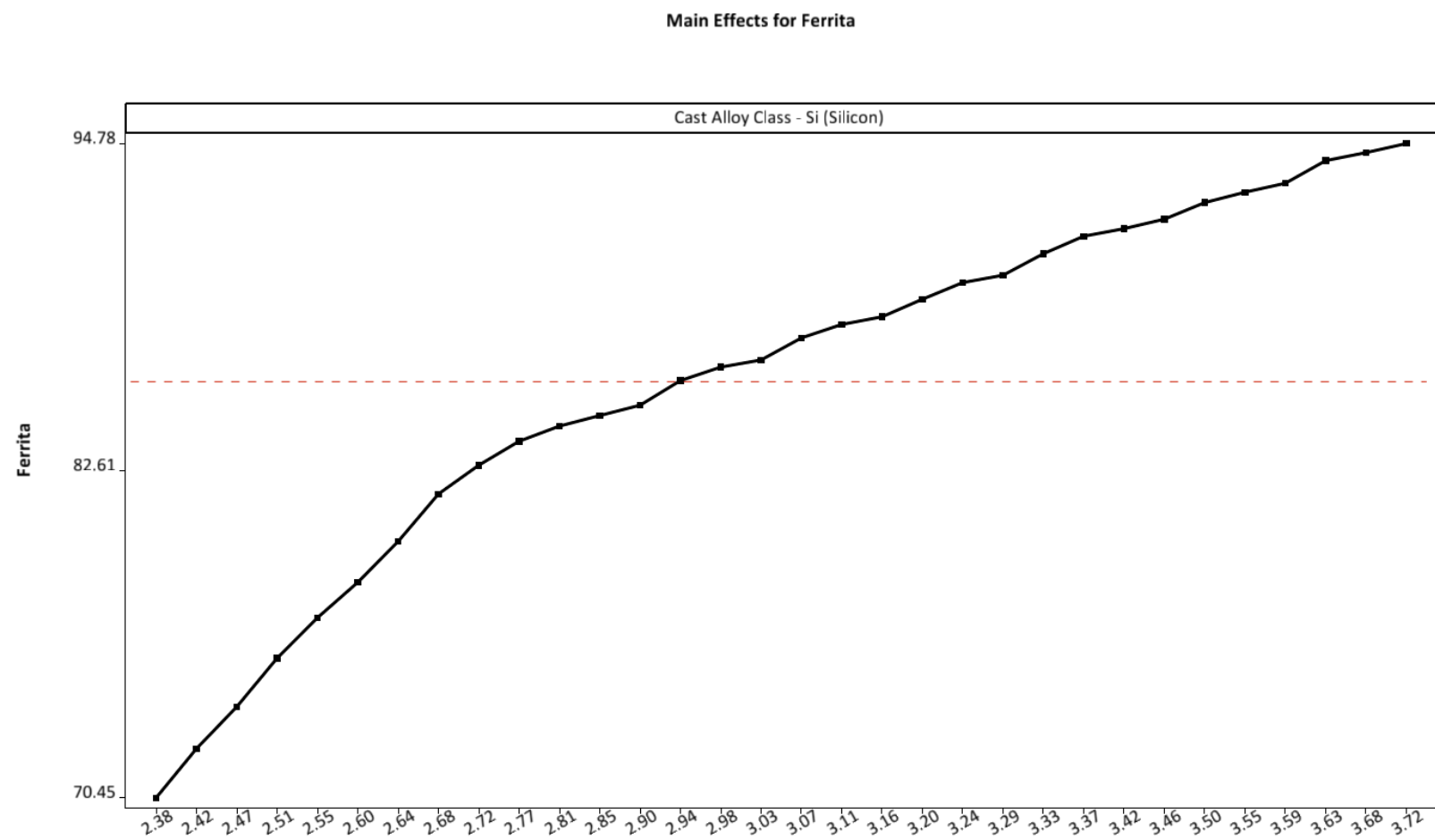


Fonte: O autor, 2018.

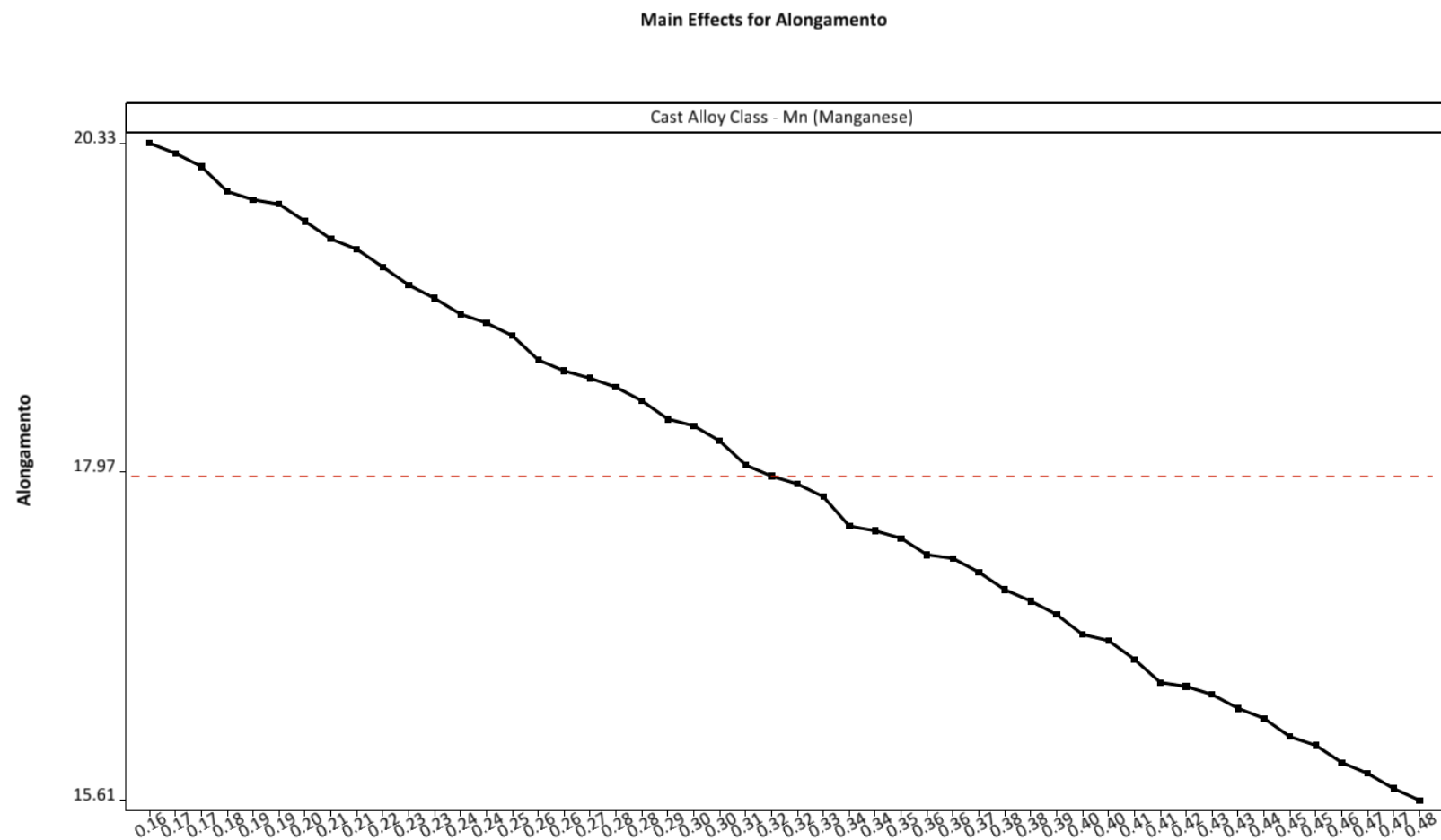
APÊNDICE AC - SILÍCIO / FORMAÇÃO DE PERLITA (HIPEREUTÉTICO)



APÊNDICE AD - SILÍCIO / FORMAÇÃO DE FERRITA (HIPEREUTÉTICO)

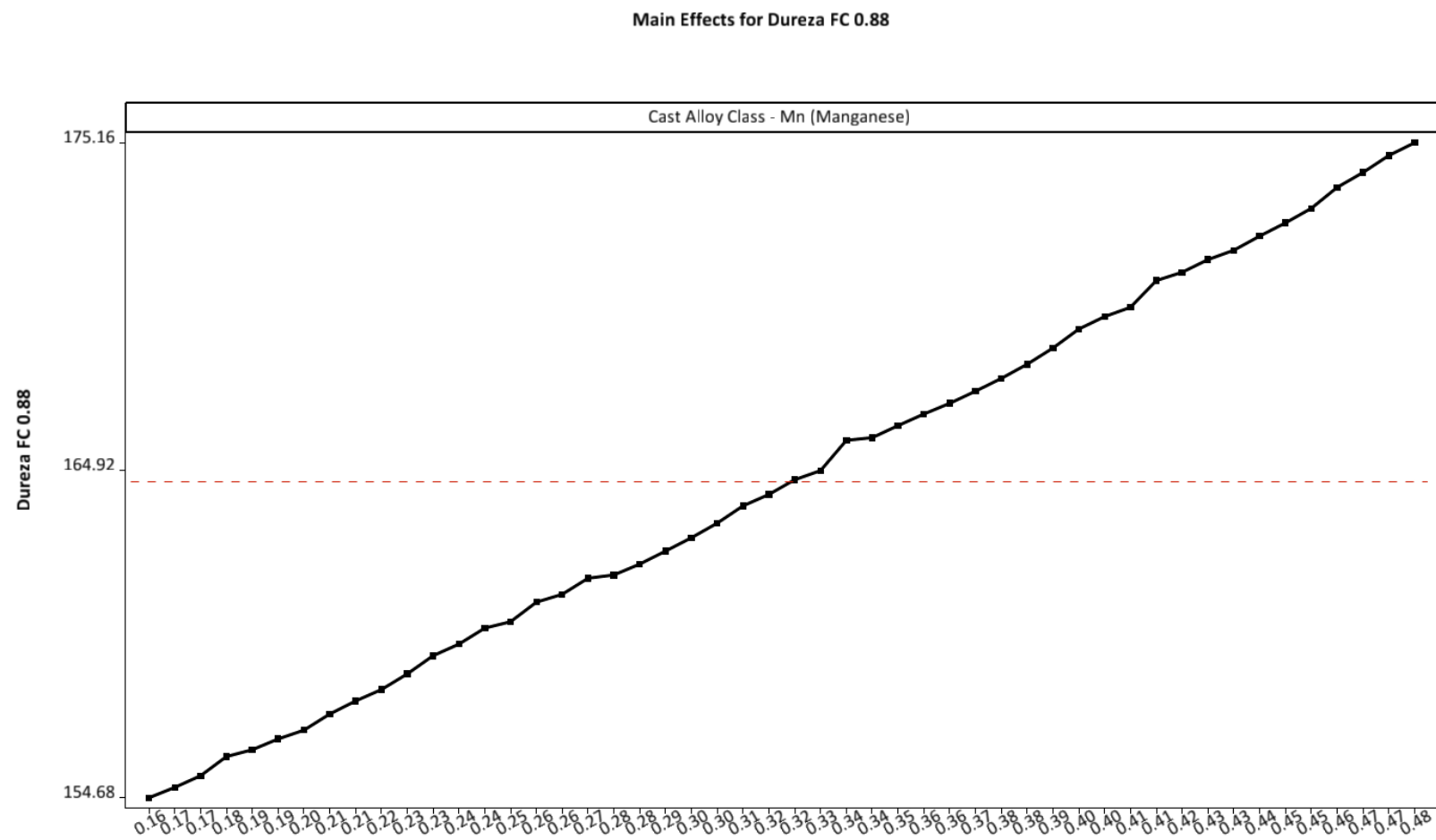


APÊNDICE AE - MANGANÊS / ALONGAMENTO



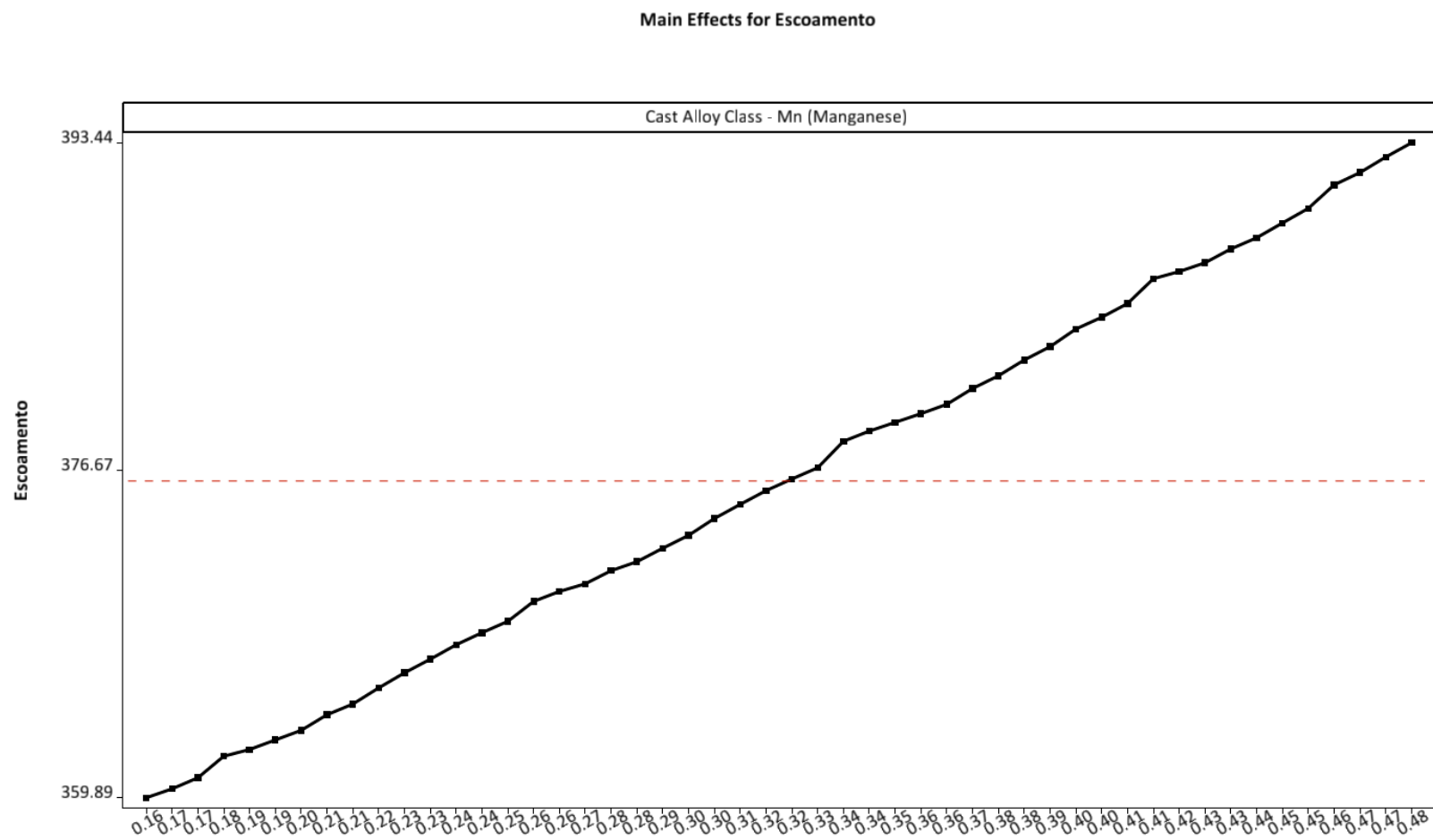
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AF - MANGANÊS / DUREZA



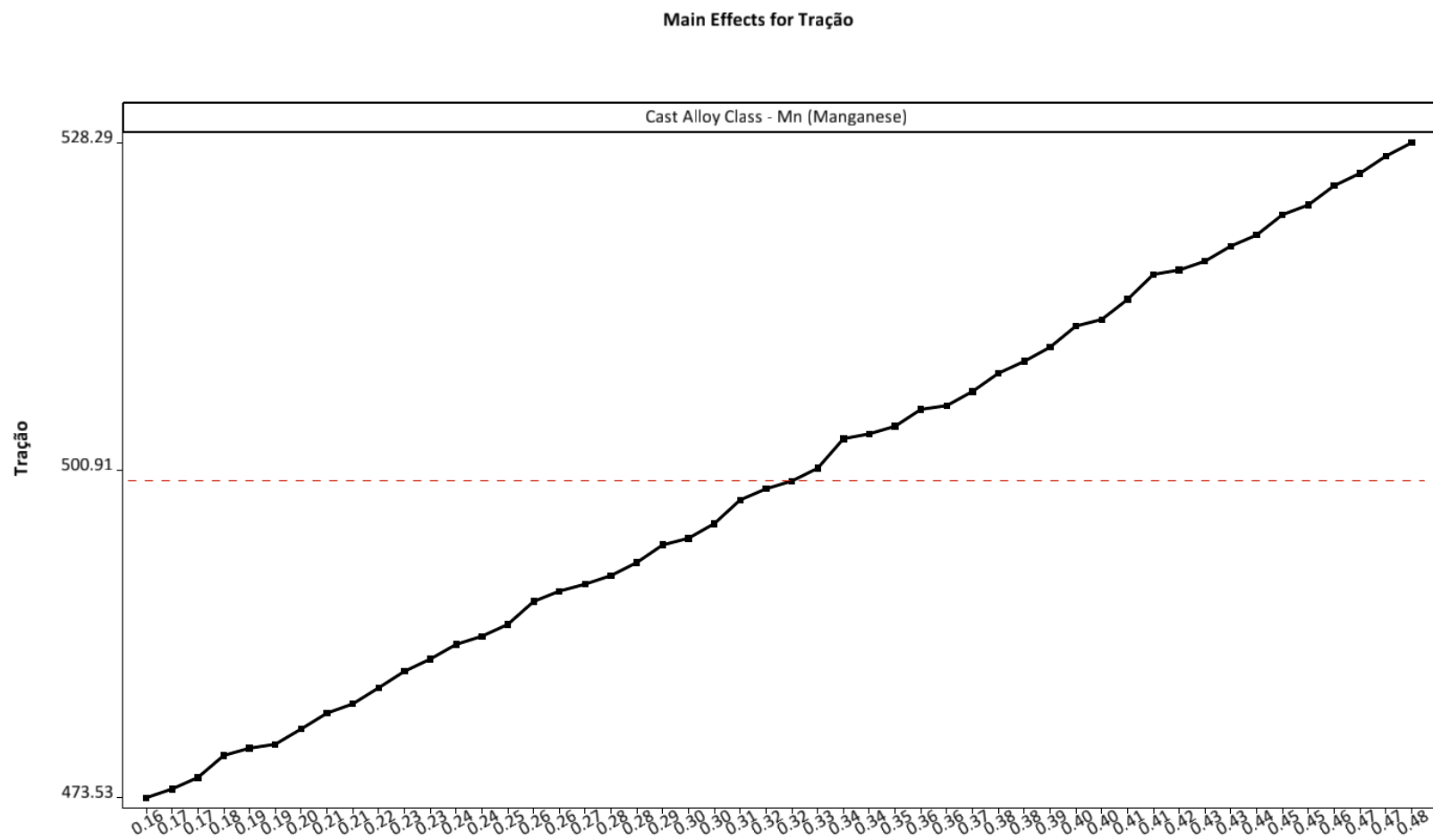
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AG - MANGANÊS / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO



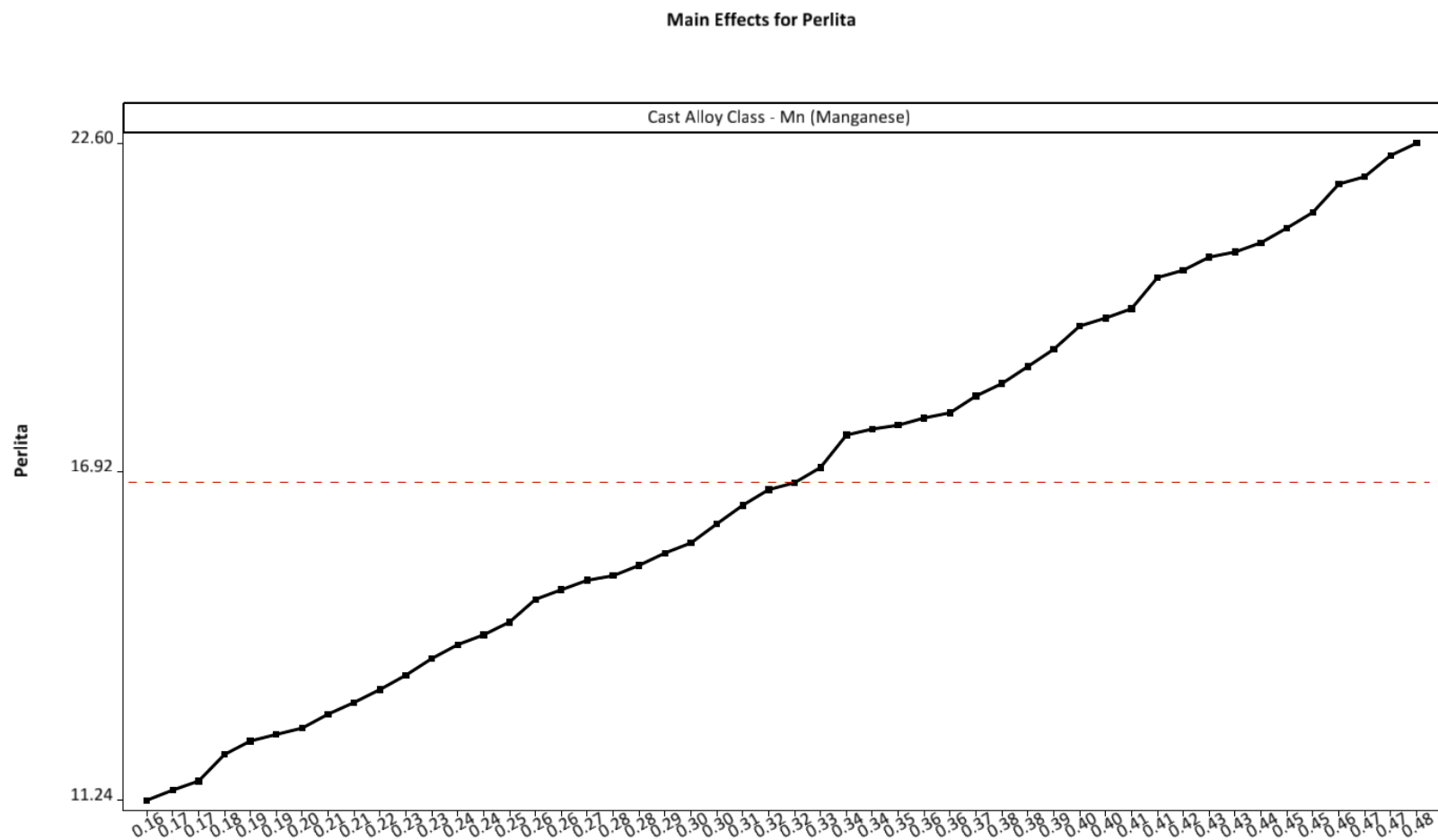
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AH - MANGANÊS / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

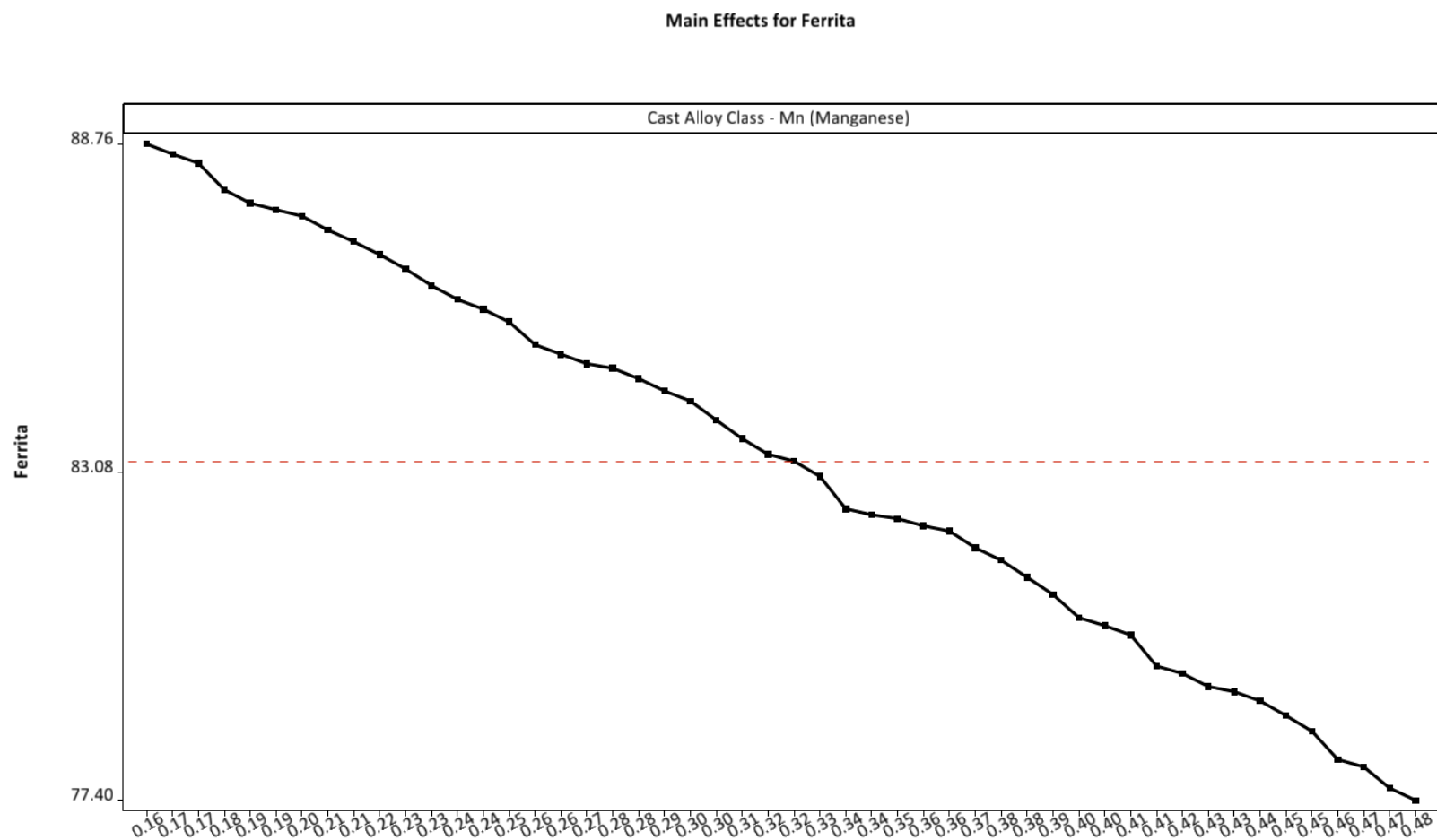


Fonte: O autor, 2018.

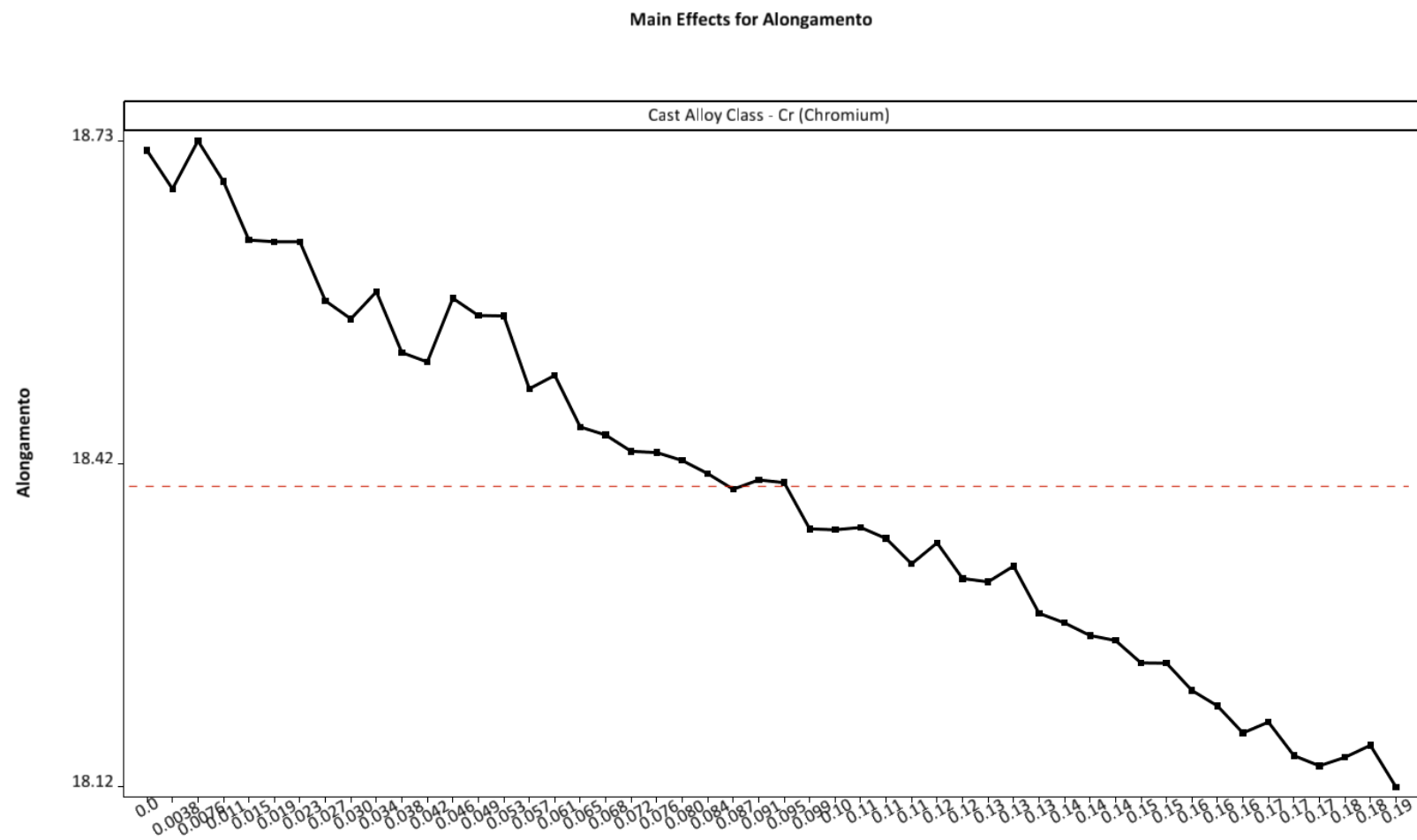
APÊNDICE AI - MANGANÊS / FORMAÇÃO DE PERLITA



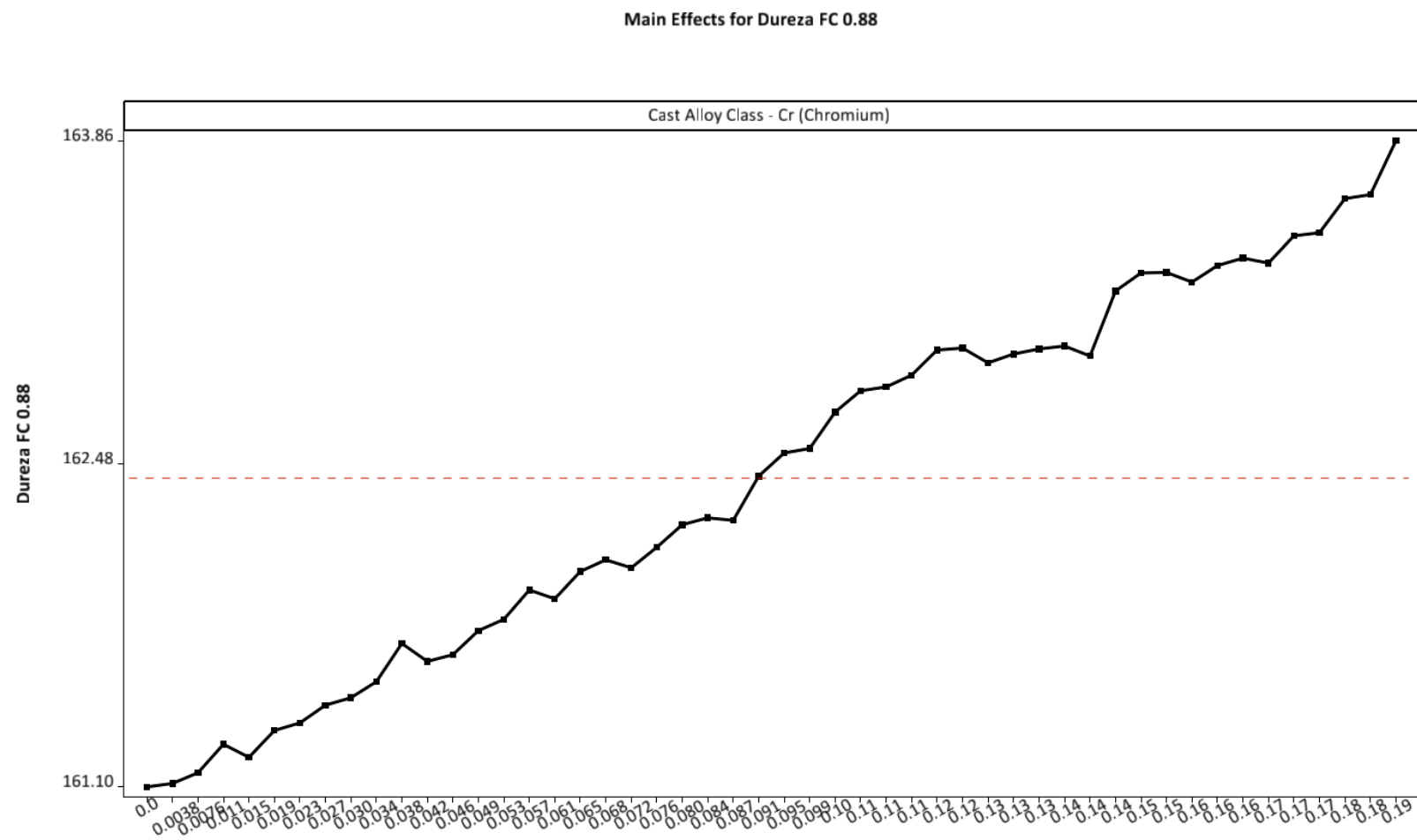
APÊNDICE AJ - MANGANÊS / FORMAÇÃO DE FERRITA



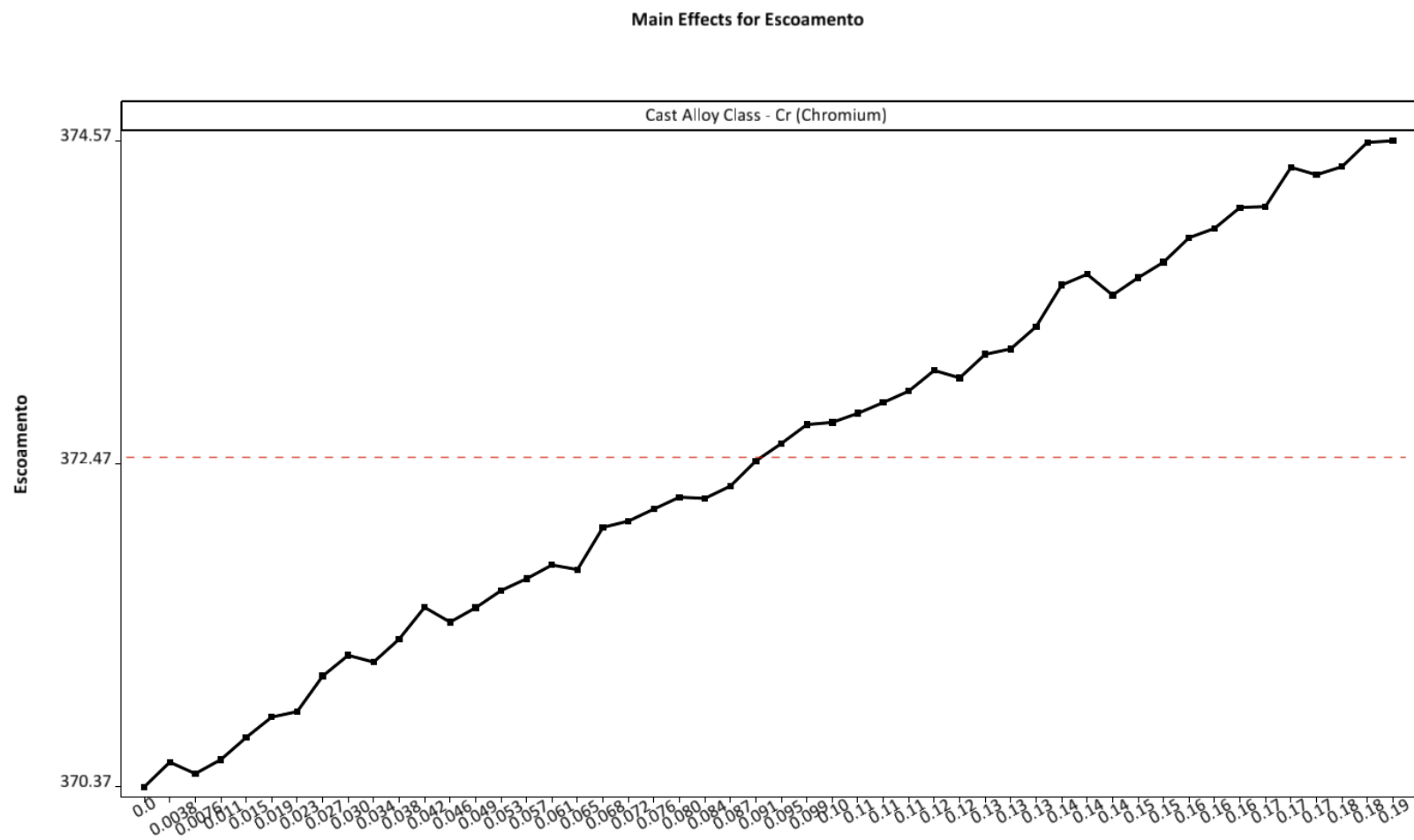
APÊNDICE AK - CROMO / ALONGAMENTO



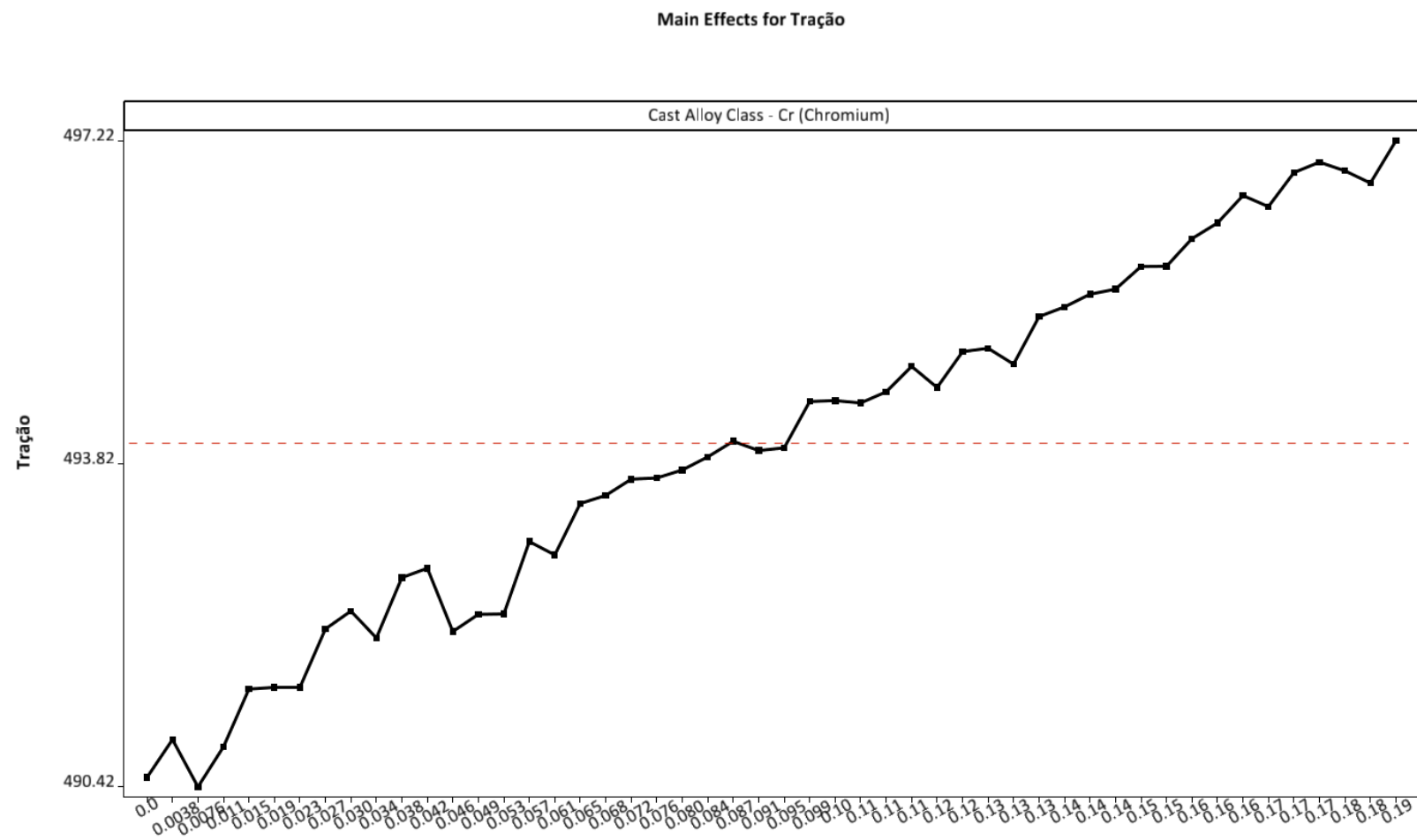
APÊNDICE AL - CROMO / DUREZA



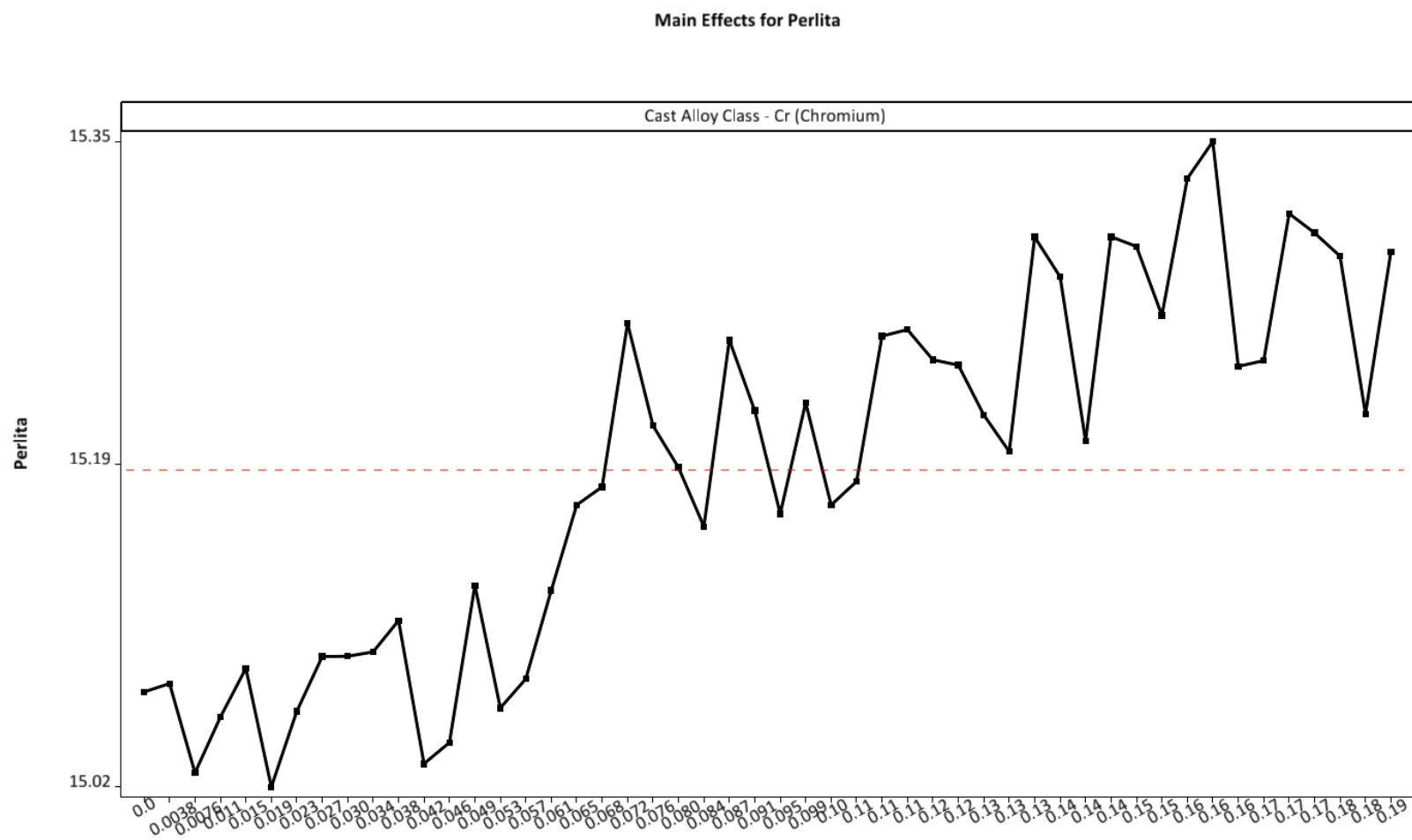
APÊNDICE AM - CROMO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO



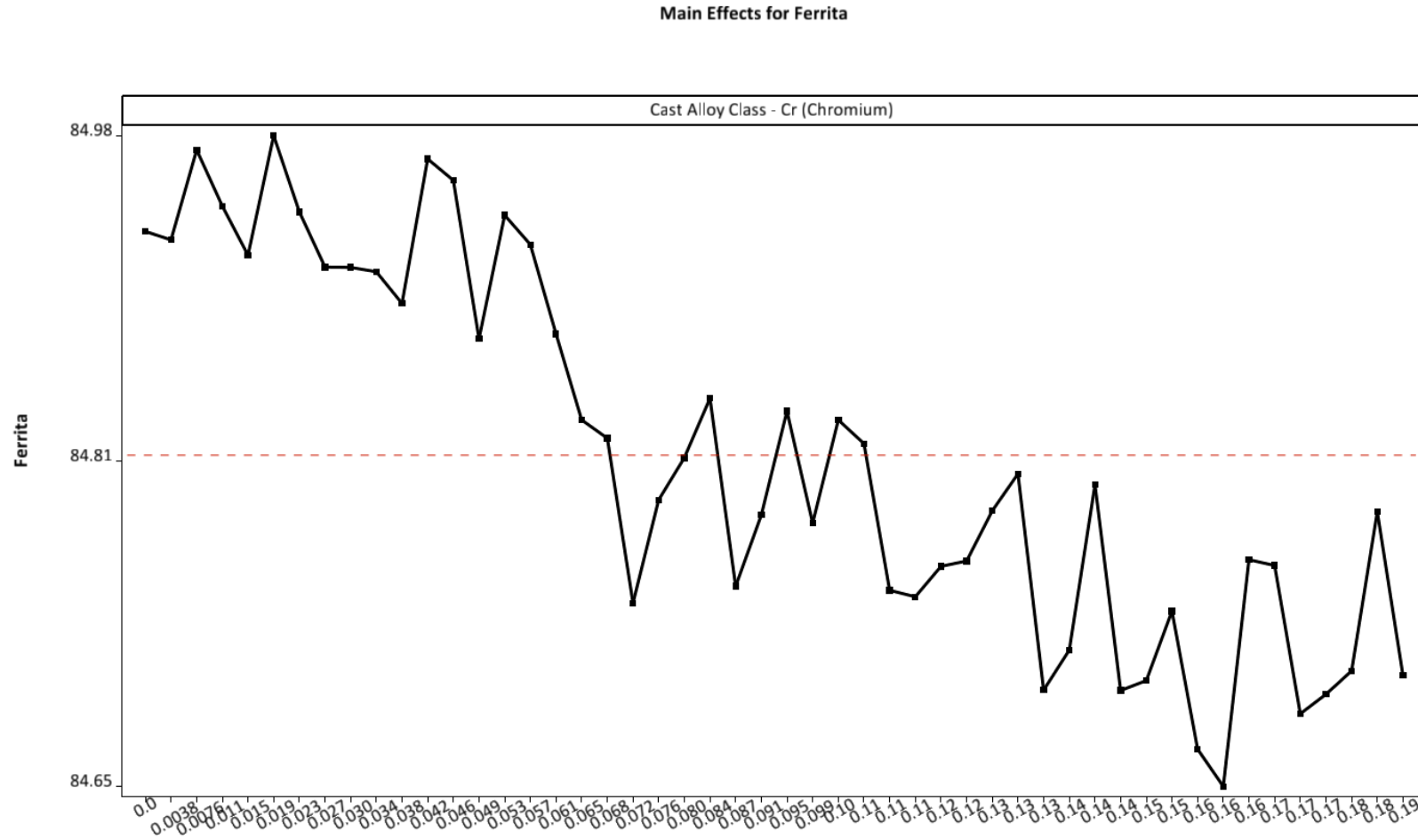
APÊNDICE AN - CROMO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO



APÊNDICE AO - CROMO / FORMAÇÃO DE PERLITA

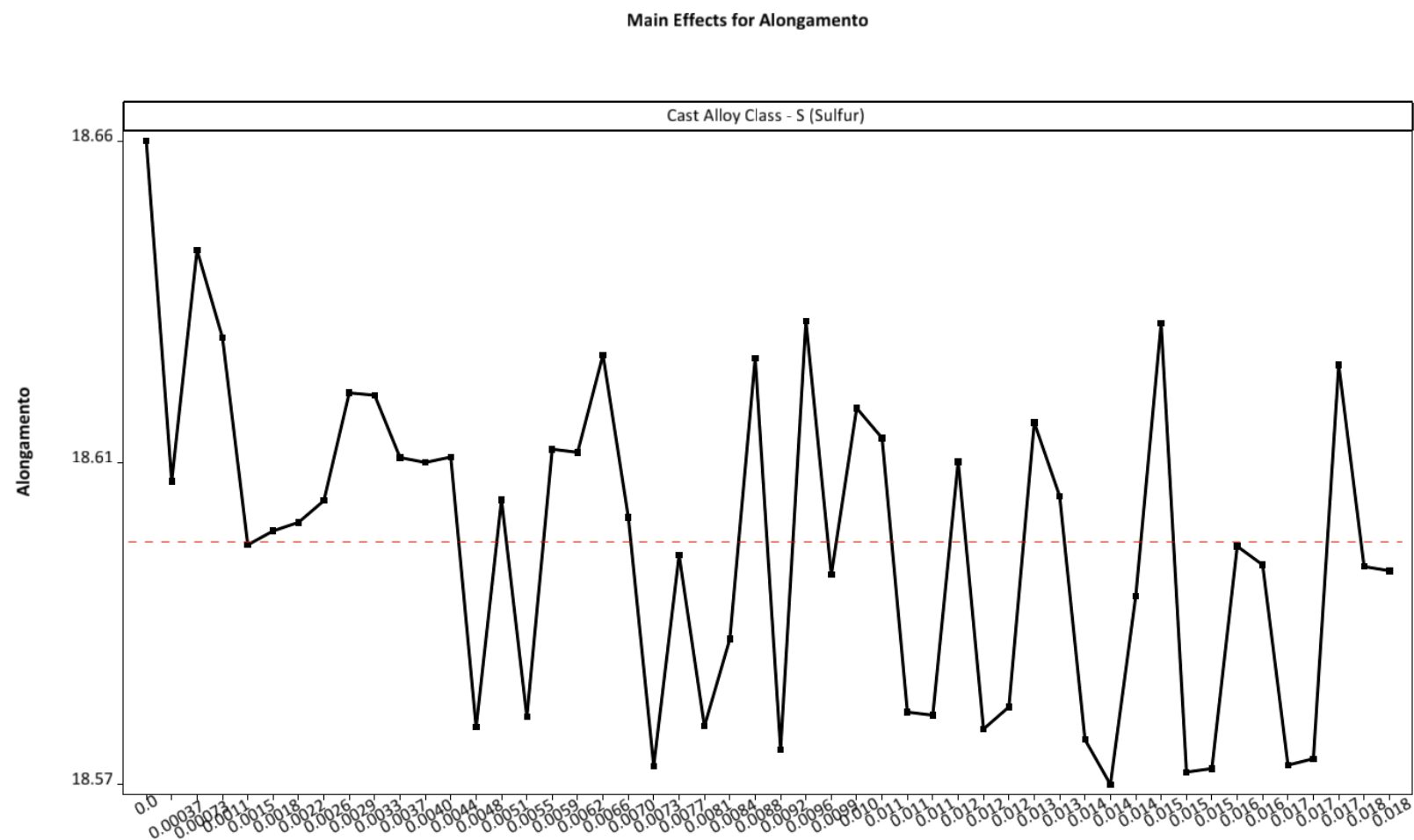


APÊNDICE AP - CROMO / FORMAÇÃO DE FERRITA



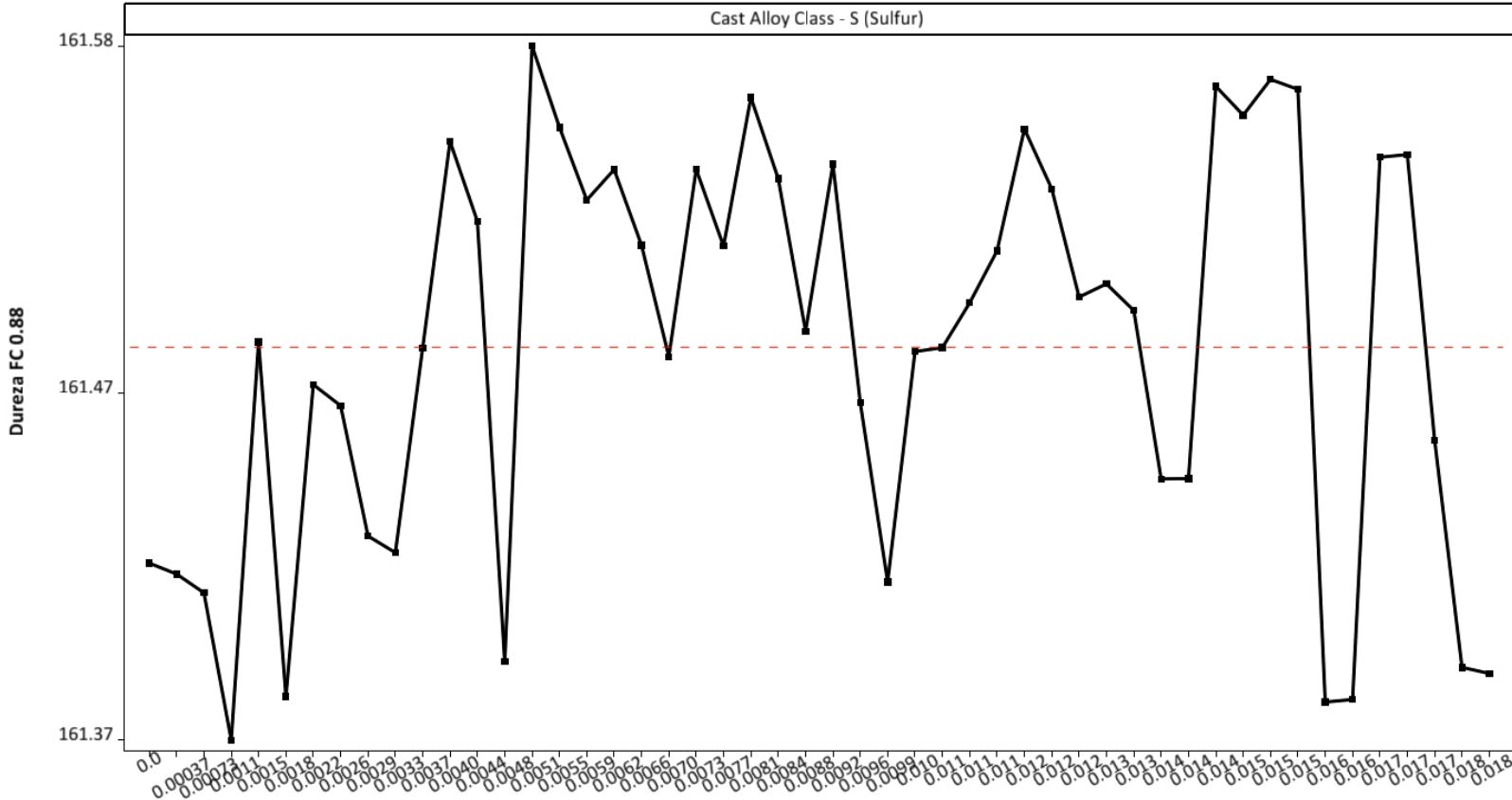
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AQ - ENXOFRE / ALONGAMENTO



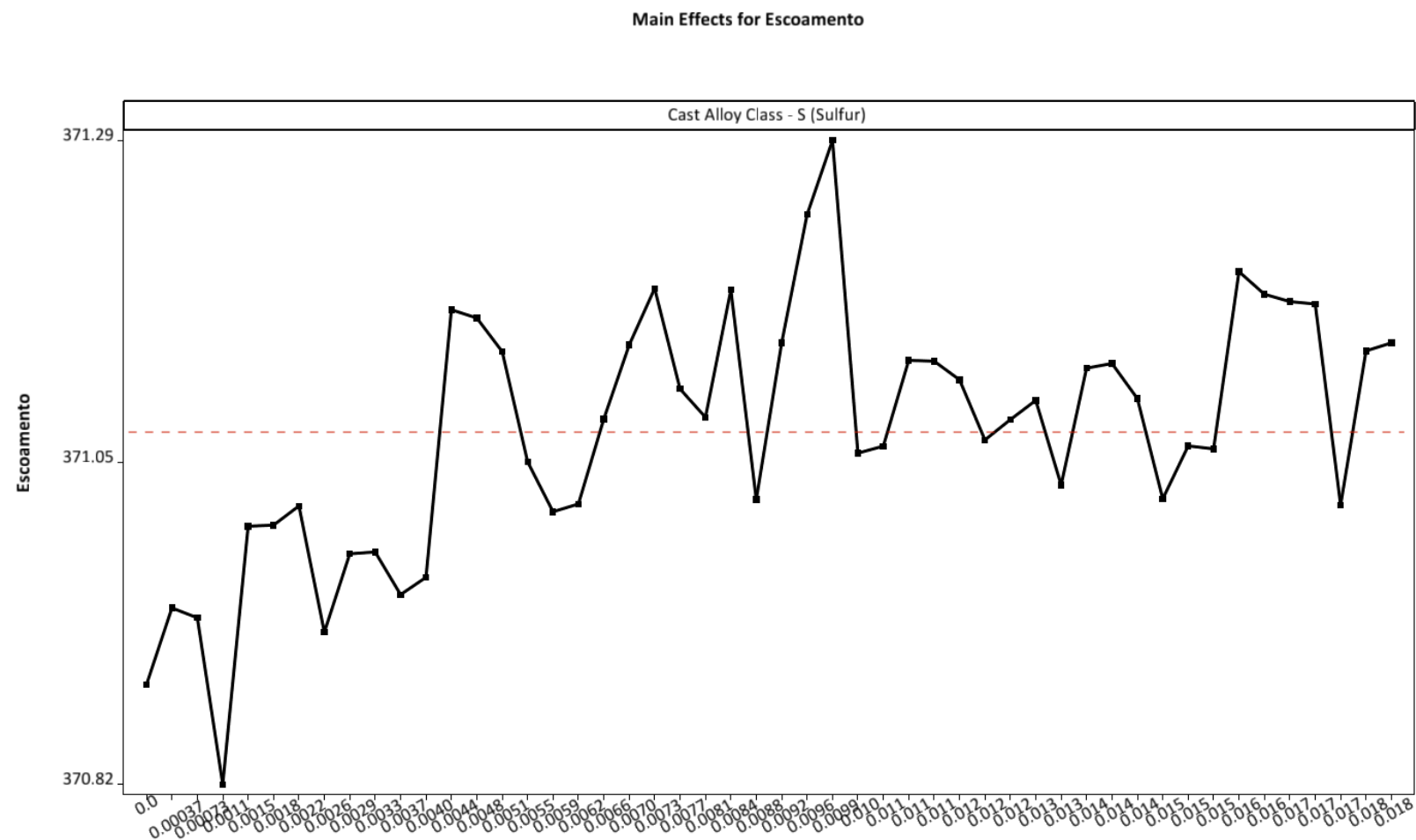
APÊNDICE AR - ENXOFRE / DUREZA

Main Effects for Dureza FC 0.88

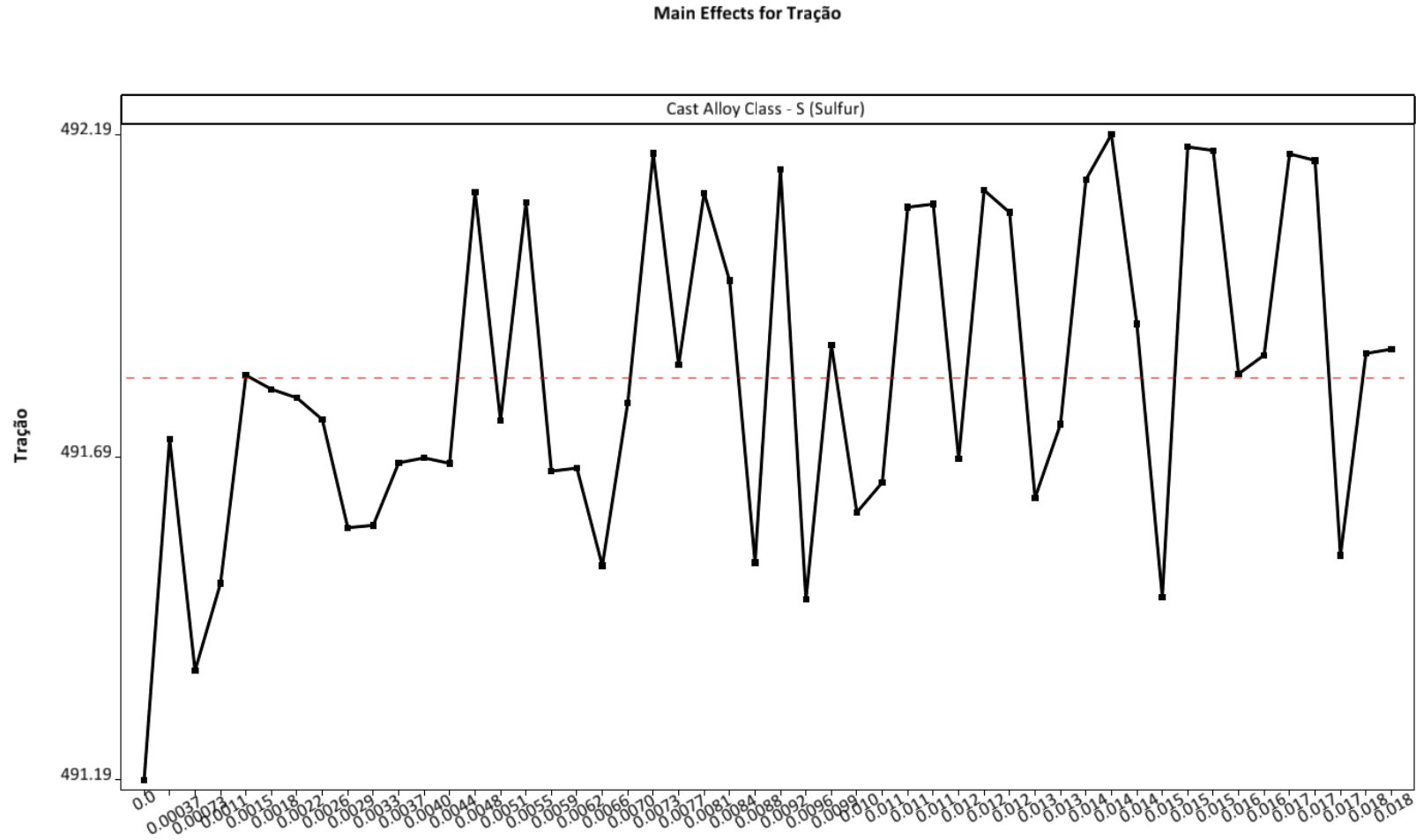


Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AS - ENXOFRE / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

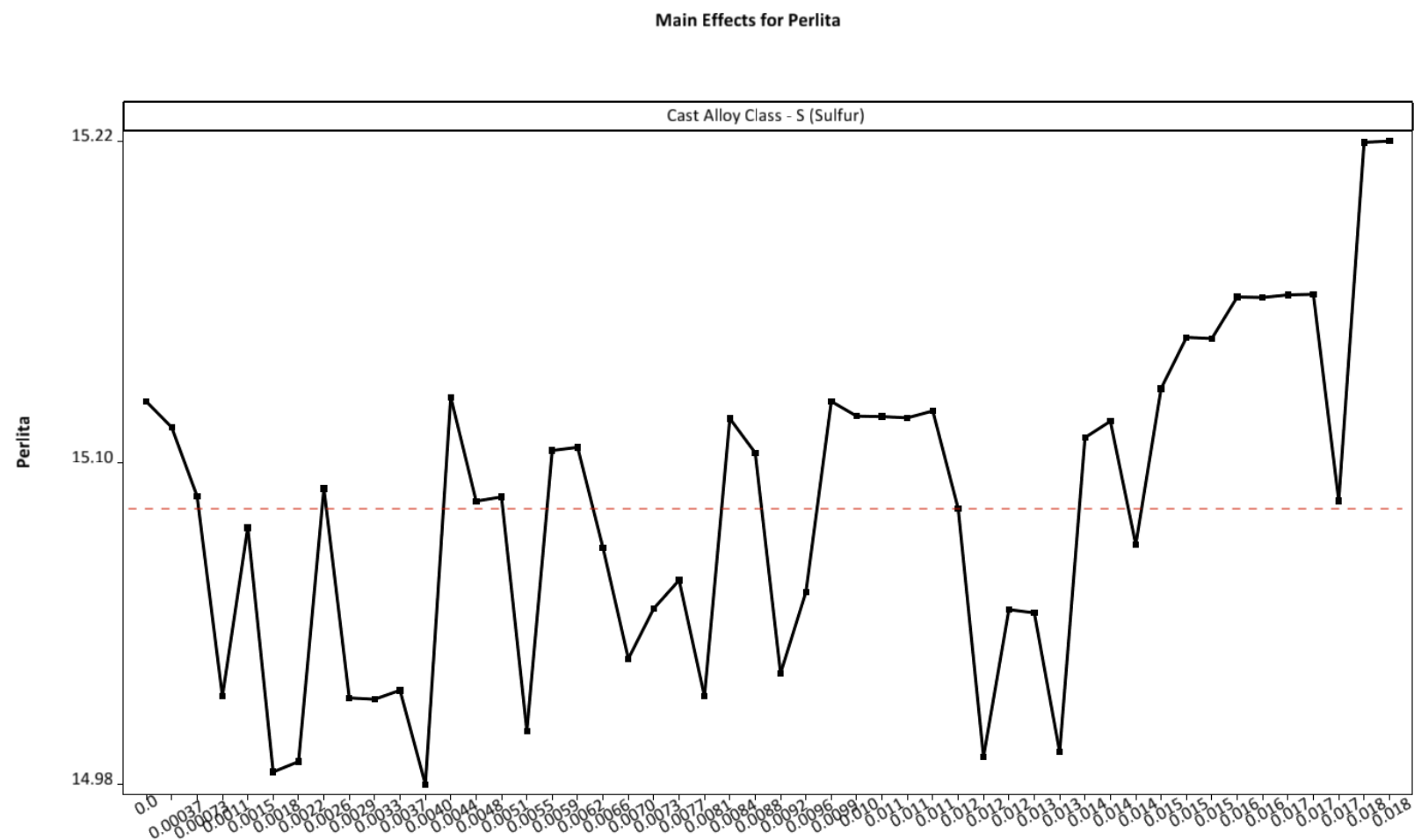


APÊNDICE AT - ENXOFRE / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

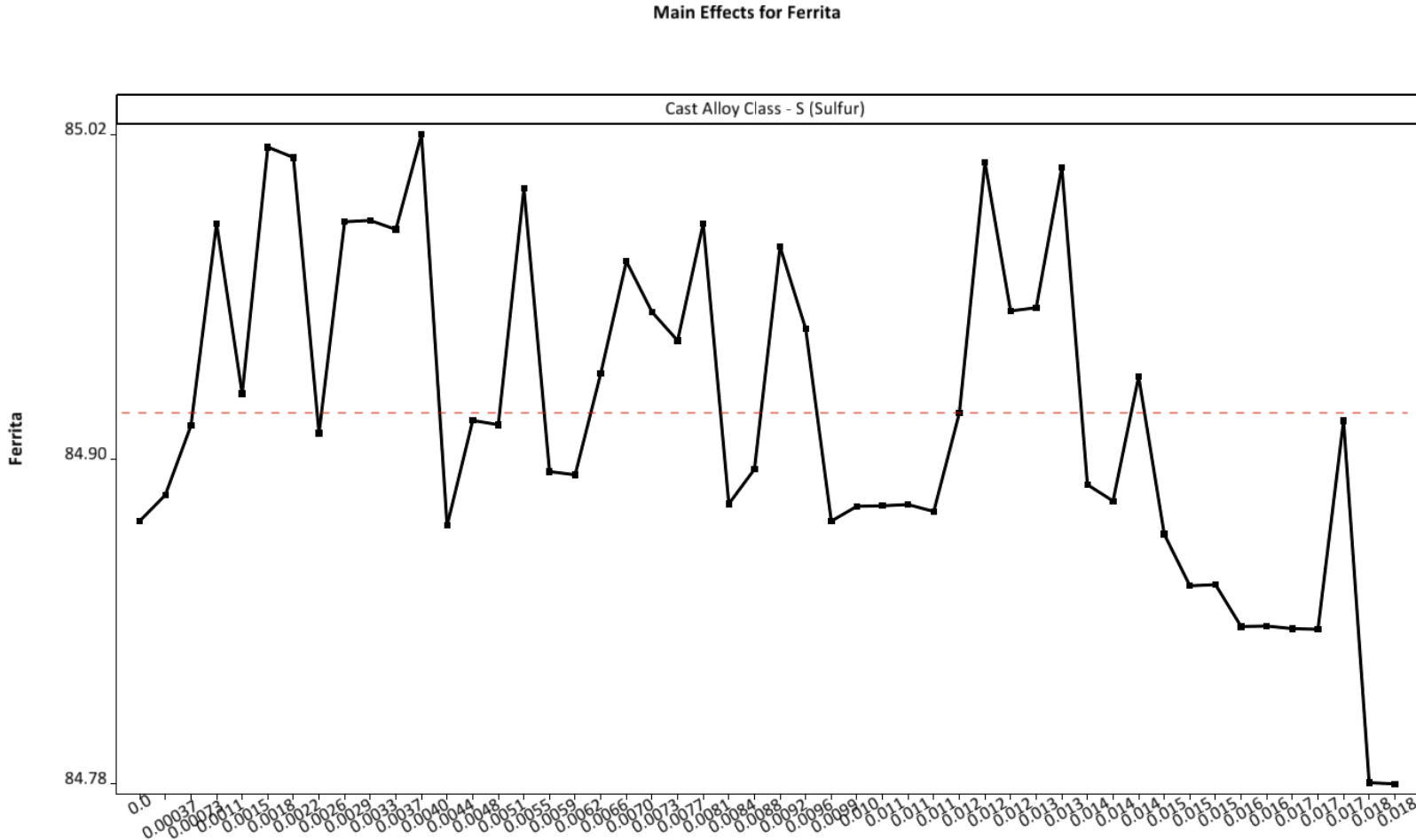


Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AU - ENXOFRE / FORMAÇÃO DE PERLITA

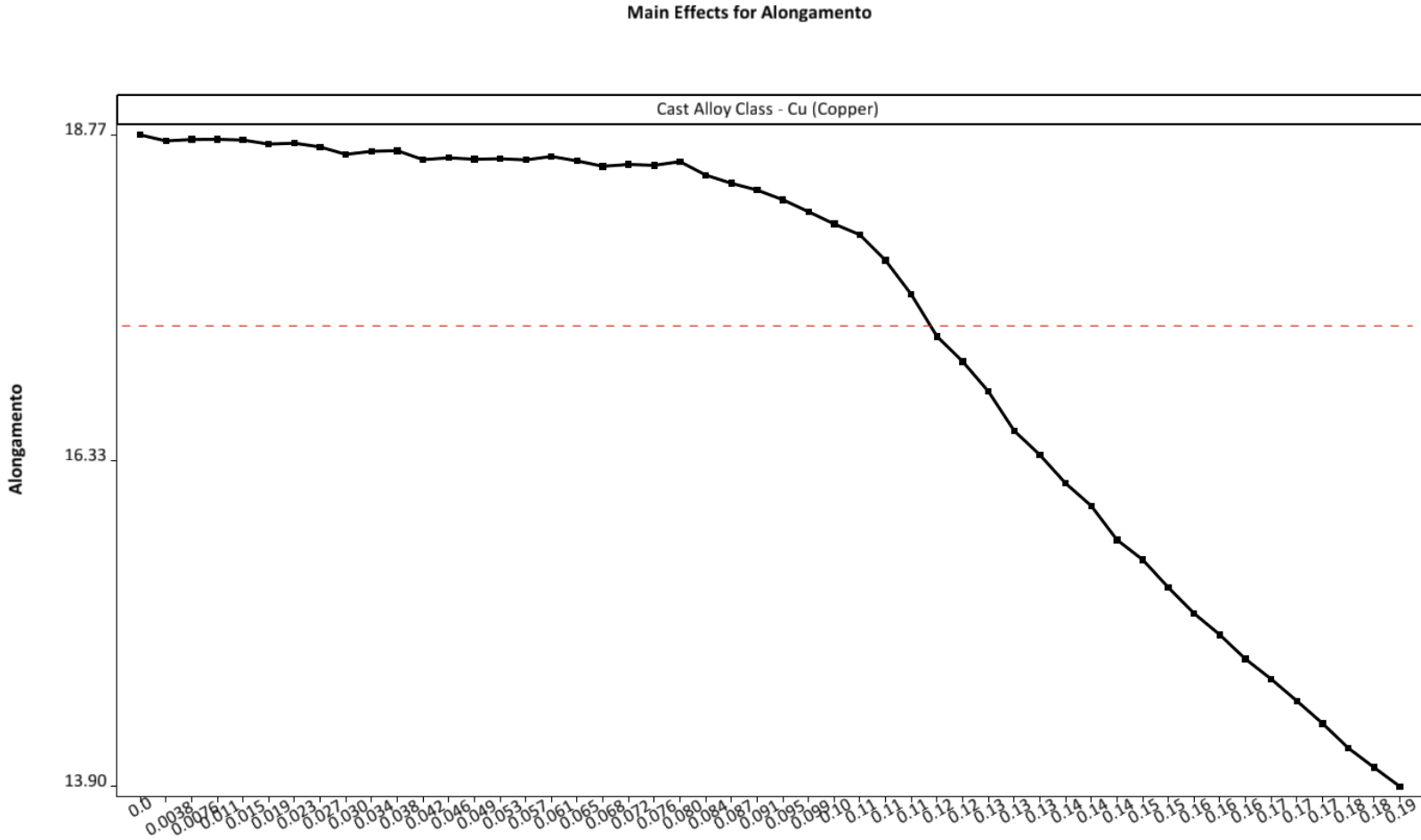


APÊNDICE AV - ENXOFRE / FORMAÇÃO DE FERRITA



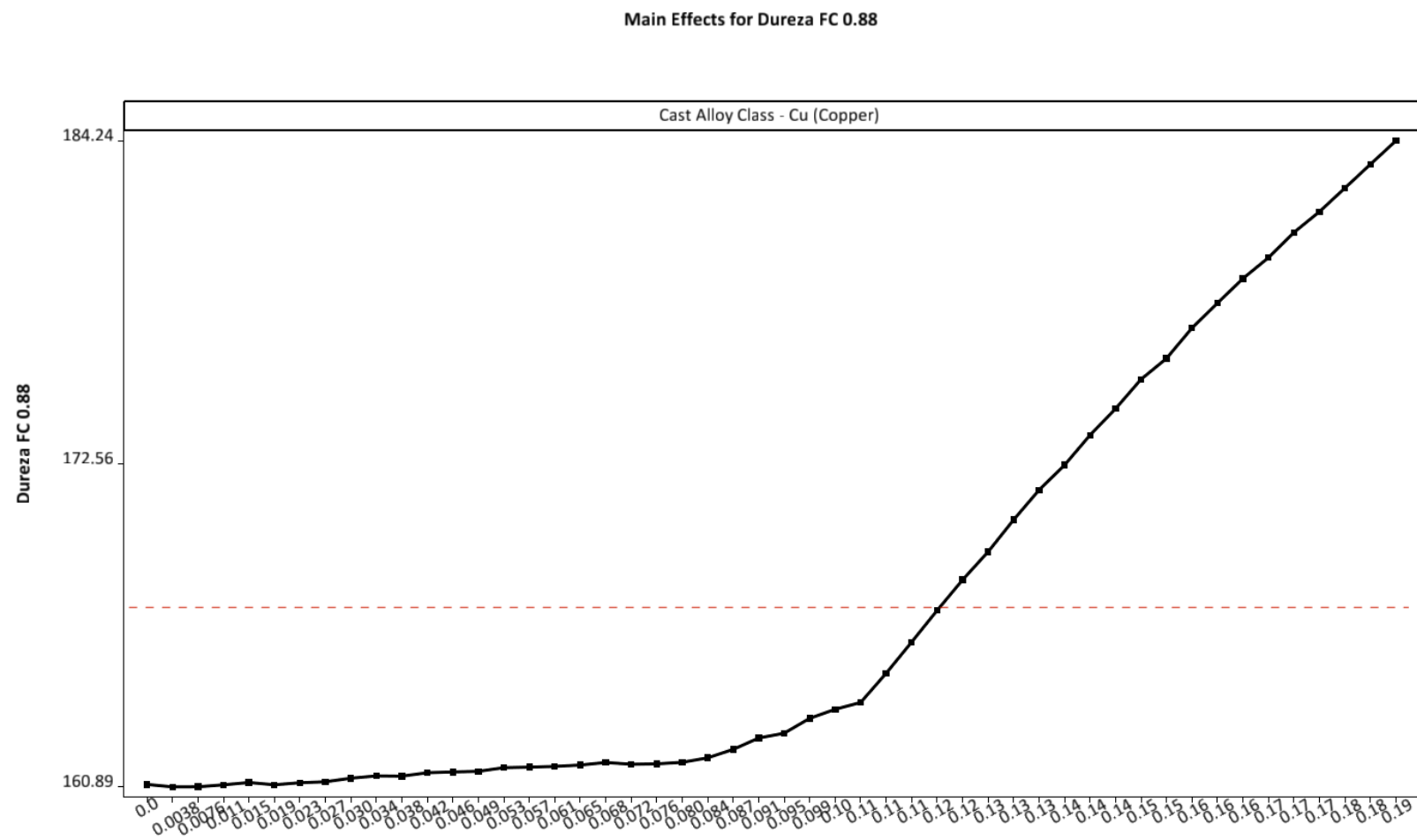
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AW - COBRE / ALONGAMENTO



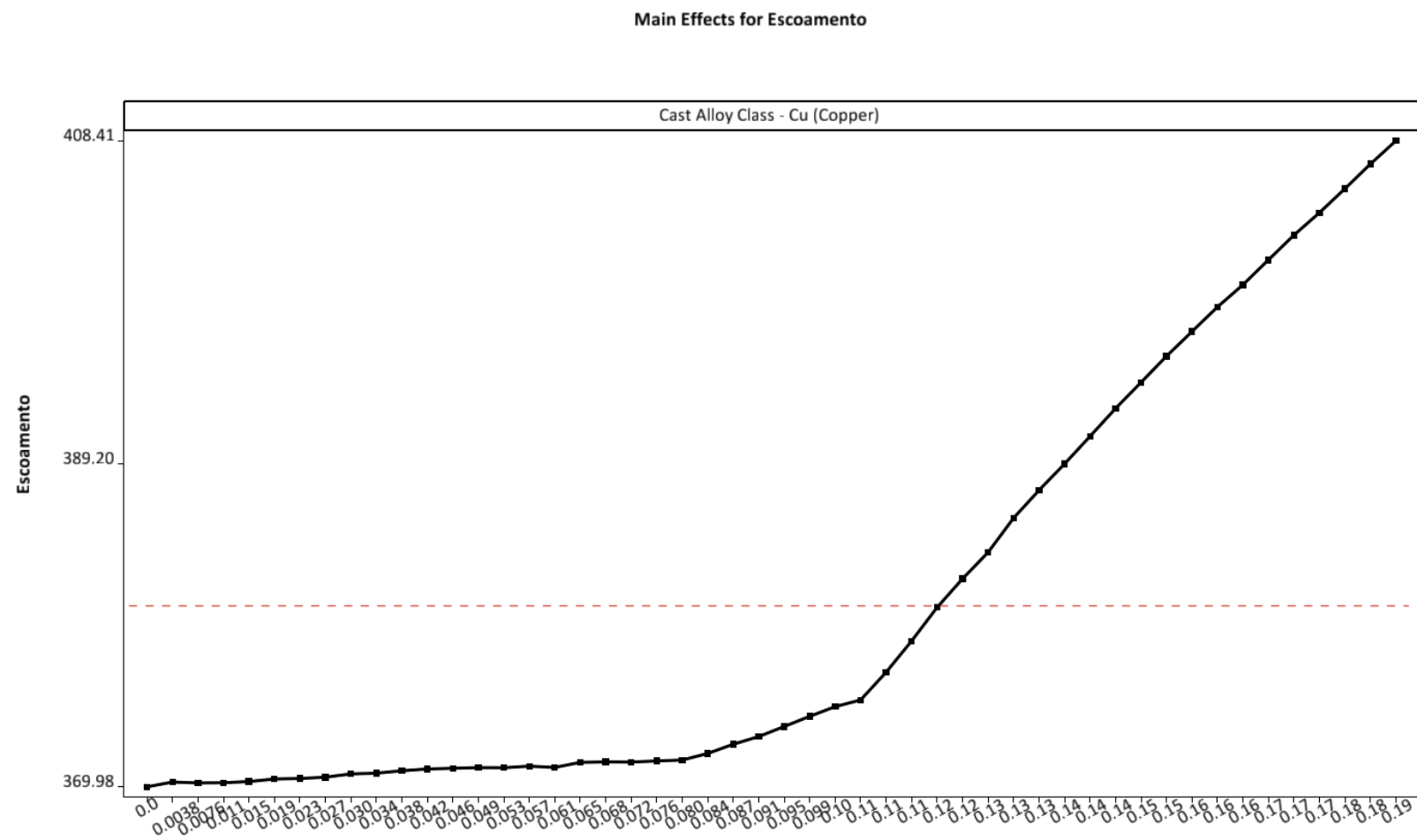
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AX - COBRE / DUREZA

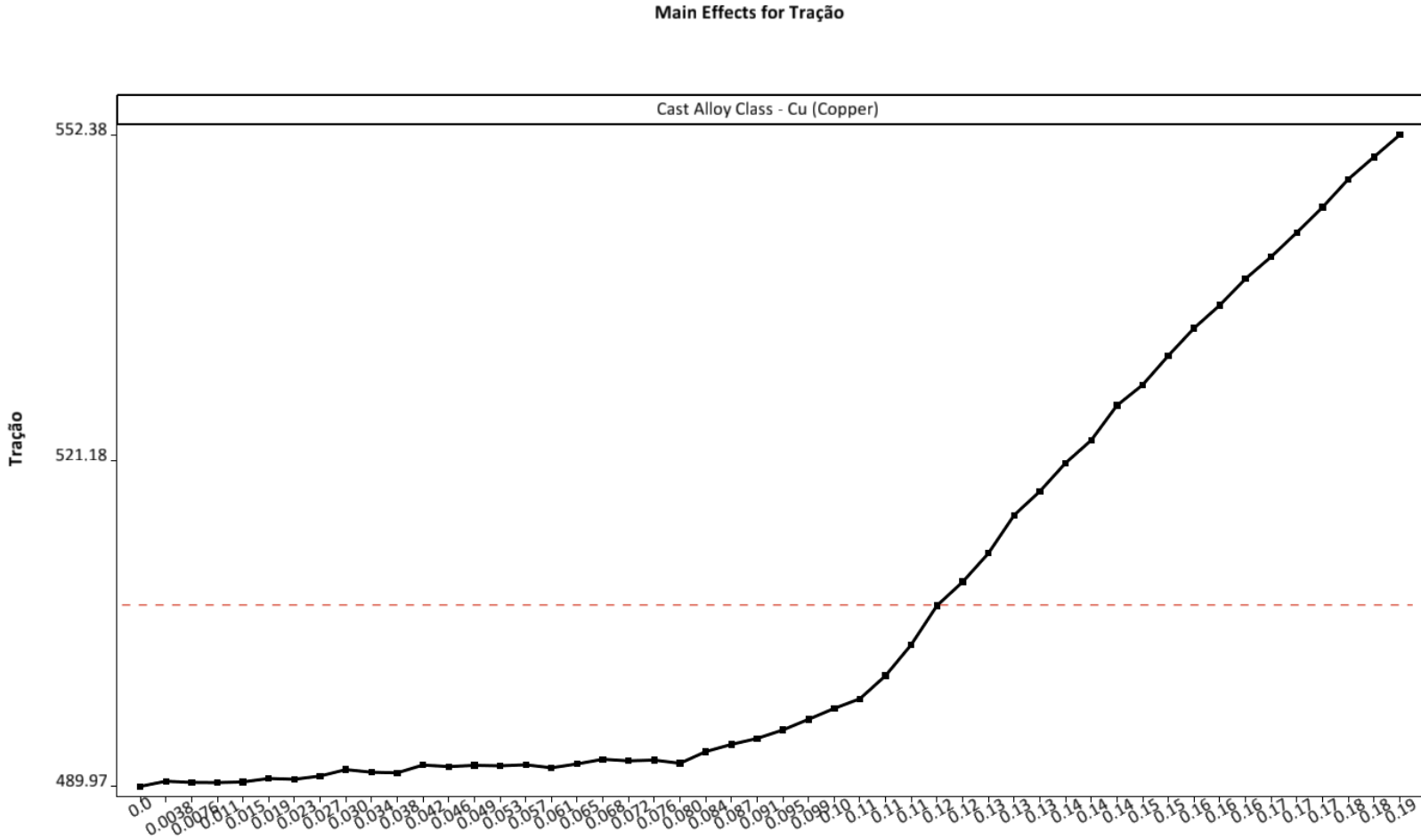


Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE AY - COBRE / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

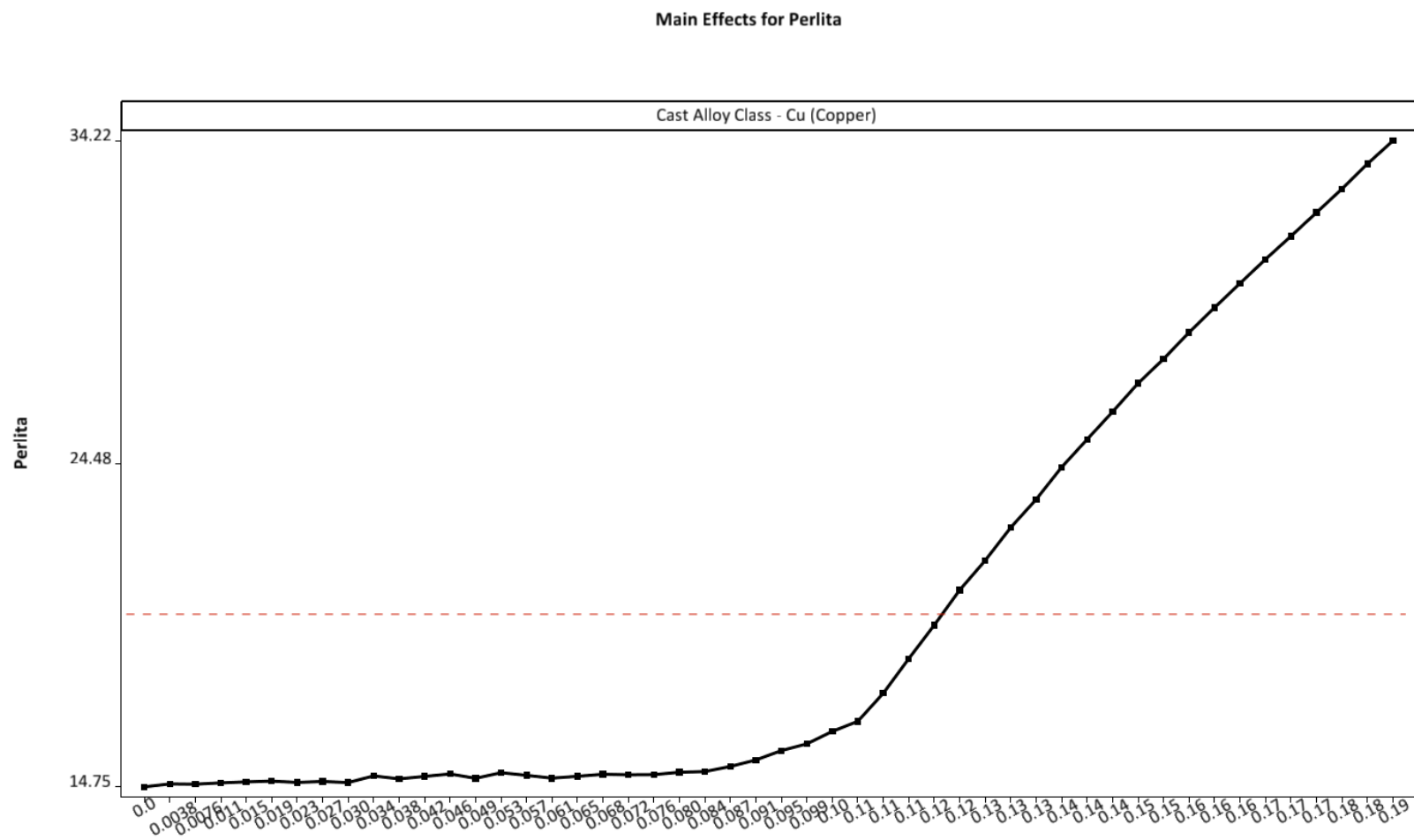


APÊNDICE AZ - COBRE / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

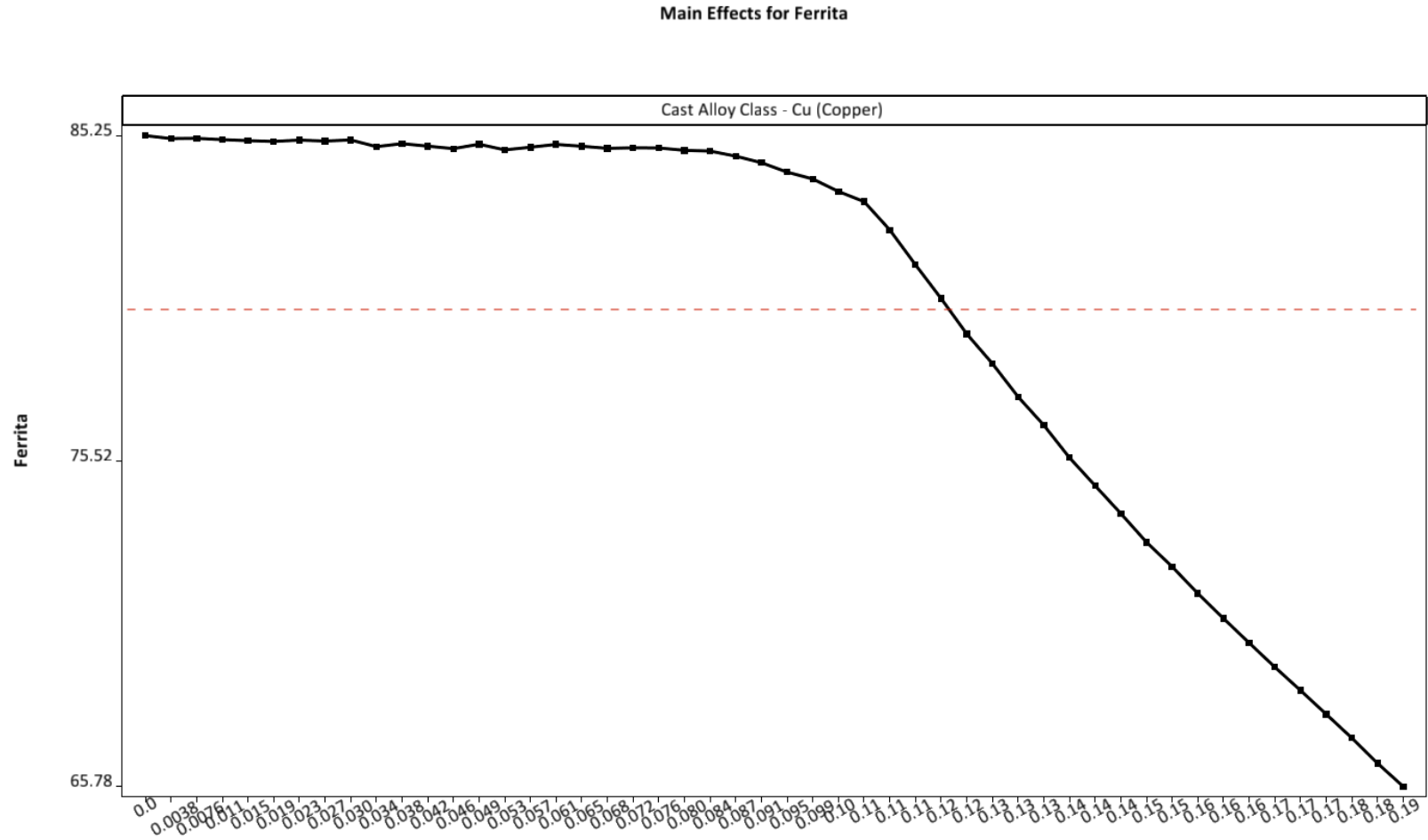


Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE BA - COBRE / FORMAÇÃO DE PERLITA

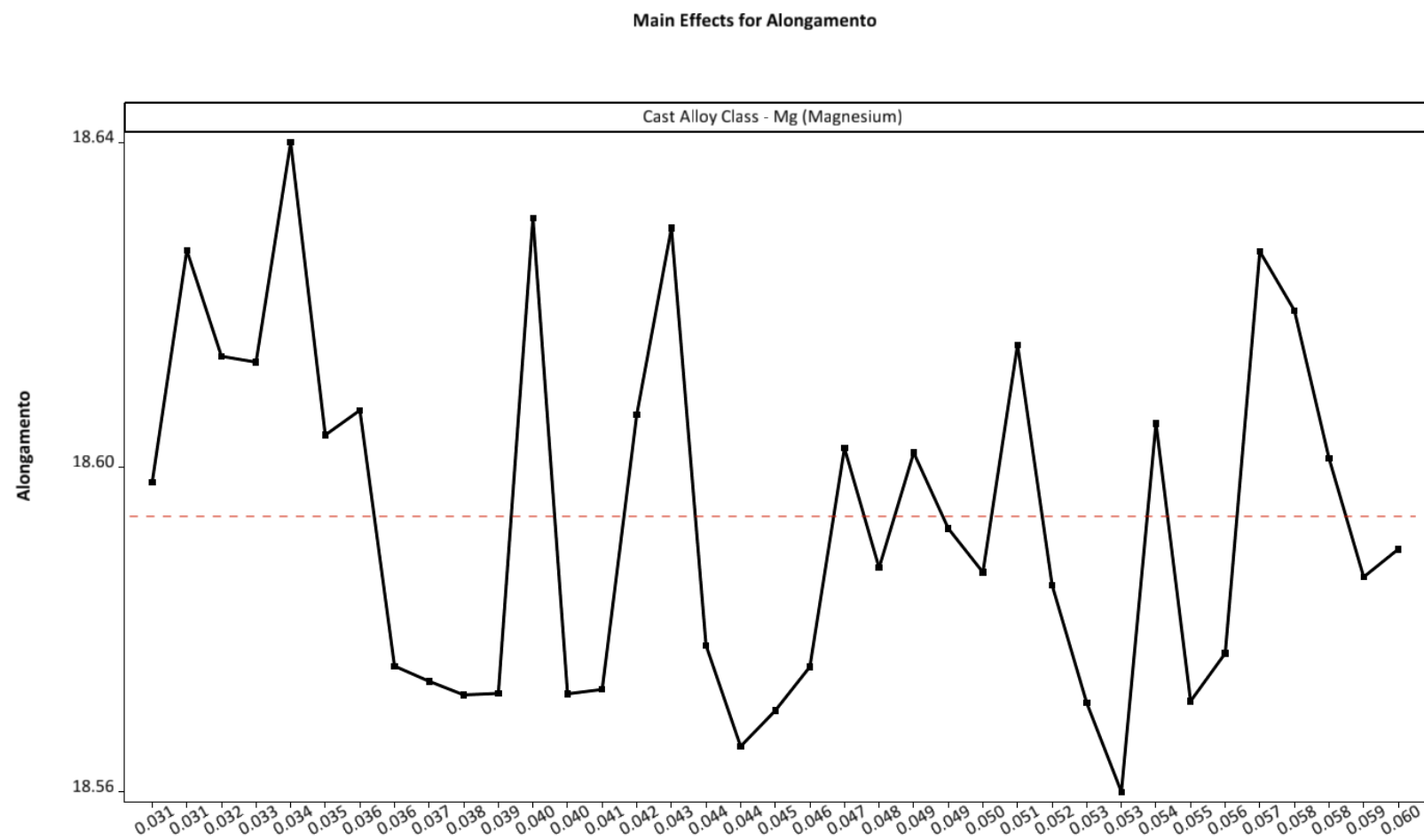


APÊNDICE BB - COBRE / FORMAÇÃO DE FERRITA



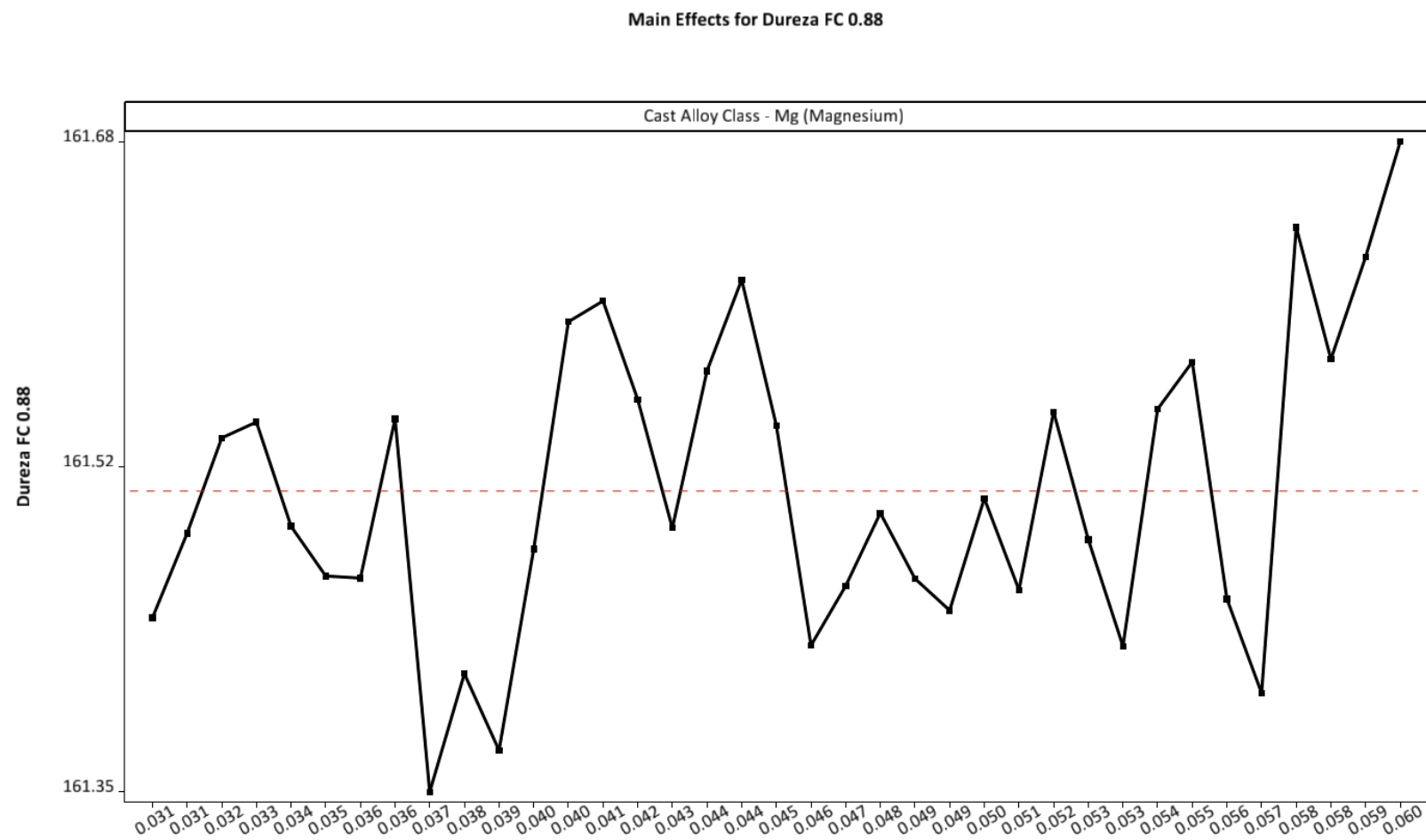
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE BC - MAGNÉSIO / ALONGAMENTO



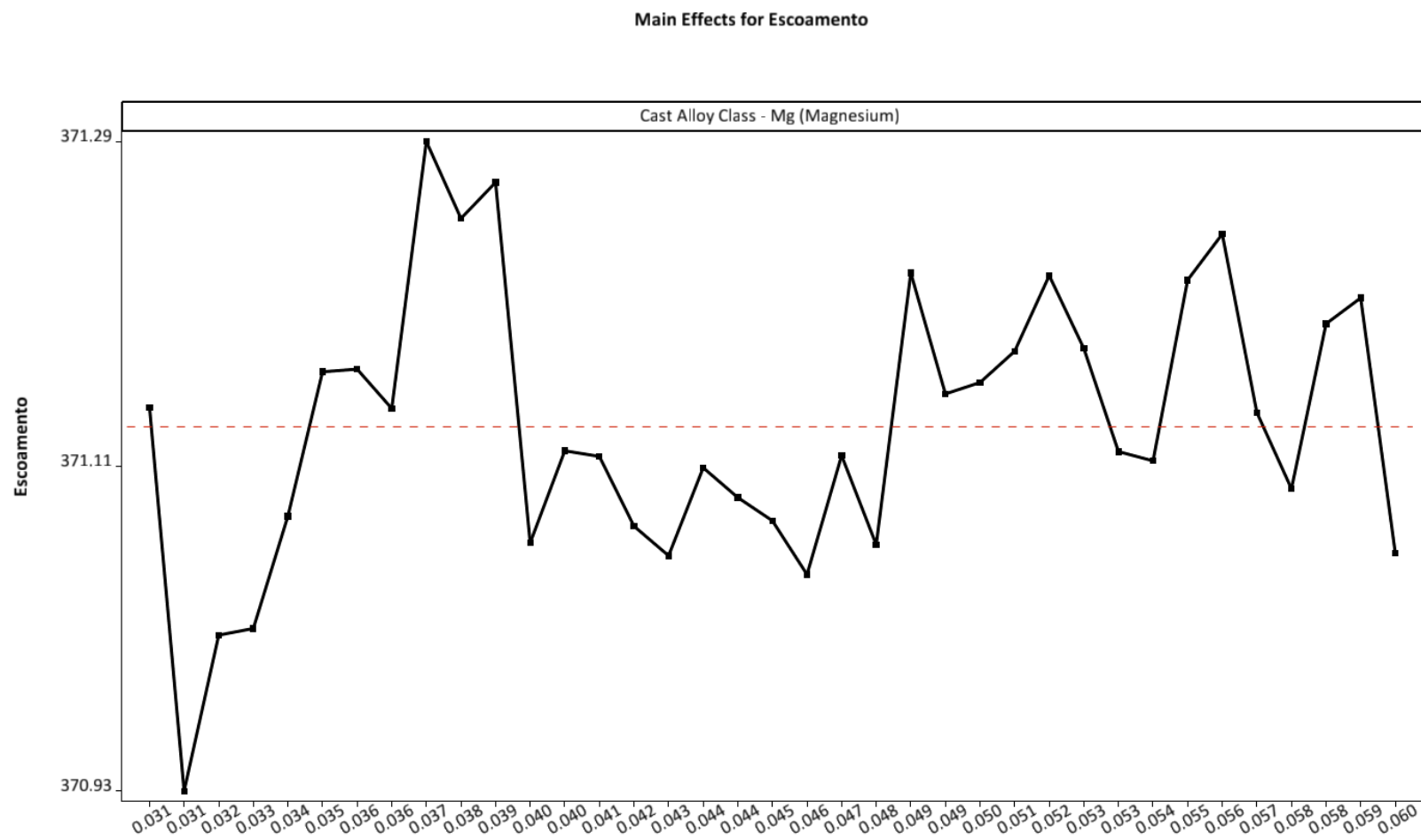
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE BD - MAGNÉSIO / DUREZA

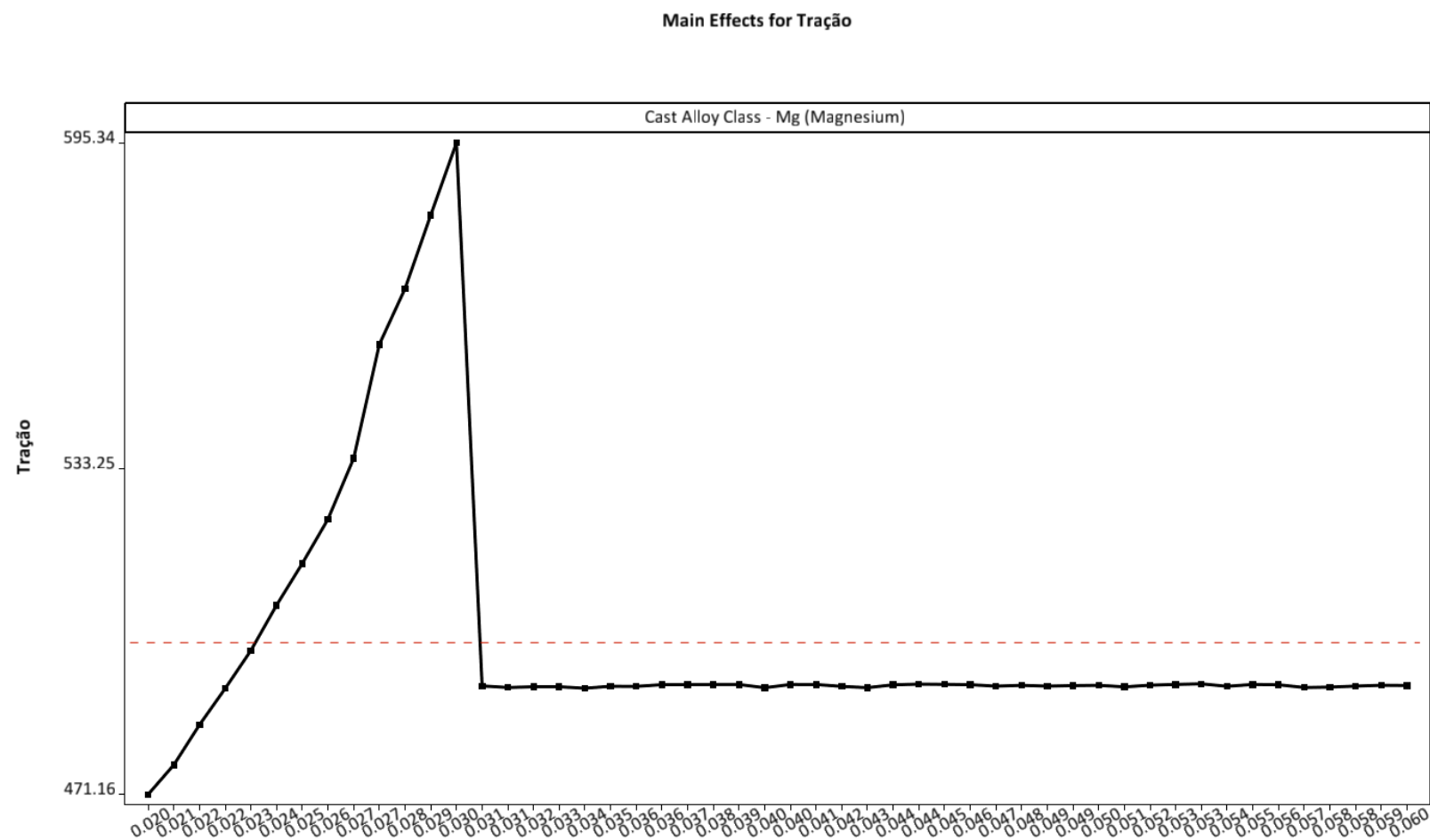


Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE BE - MAGNÉSIO / RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

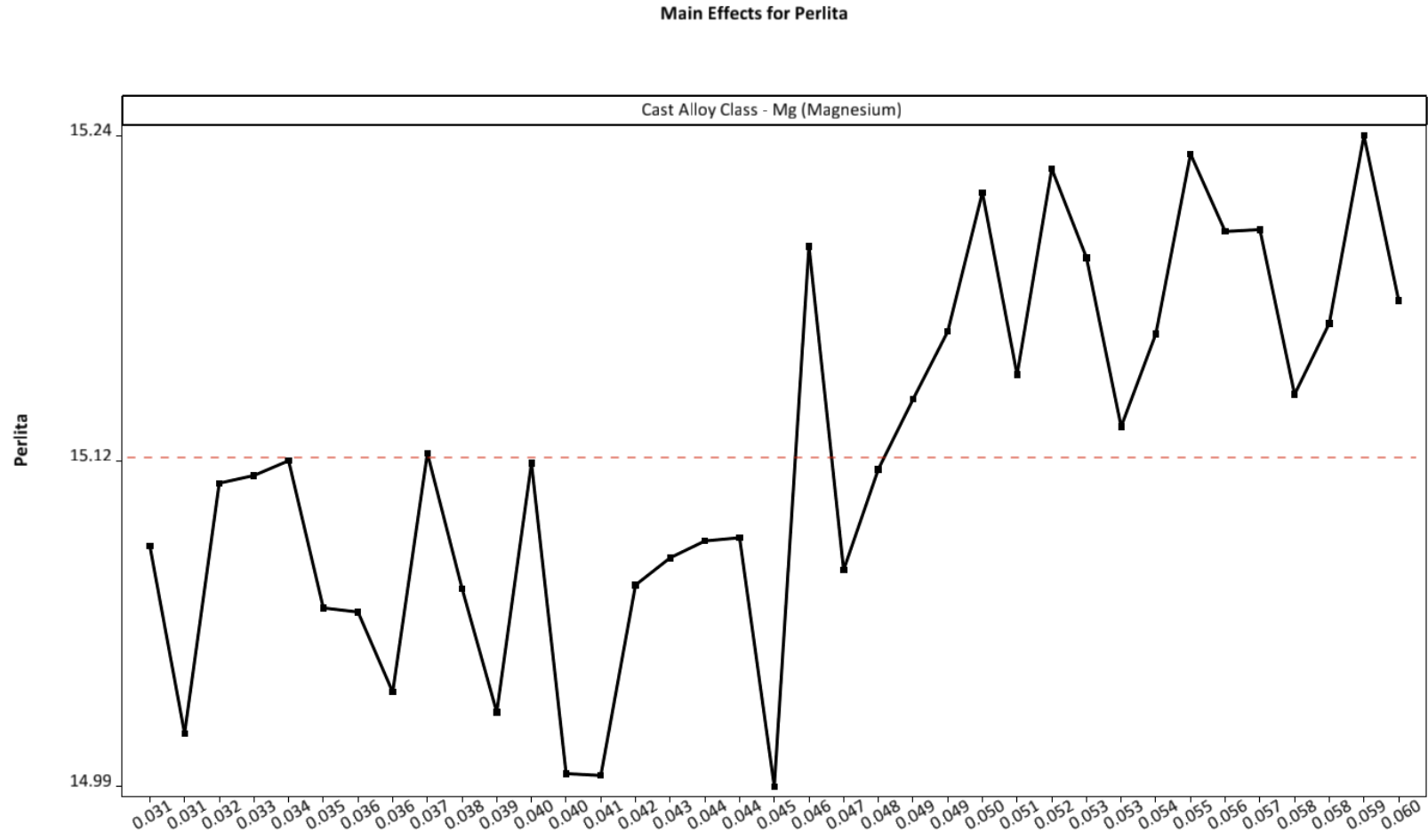


APÊNDICE BF - MAGNÉSIO / RESISTÊNCIA À TRAÇÃO



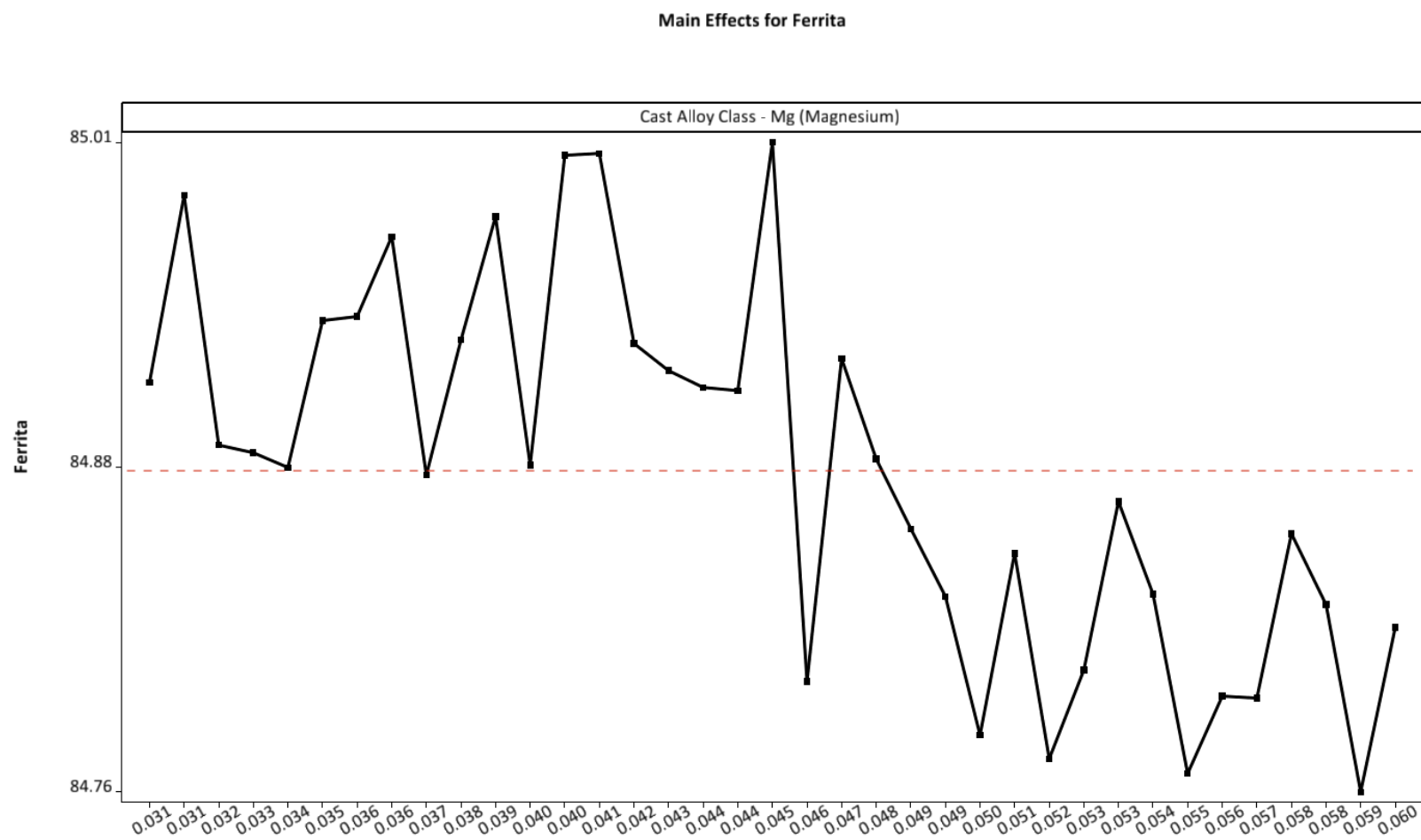
Fonte: O autor, 2018.

APÊNDICE BG - MAGNÉSIO / FORMAÇÃO DE PERLITA

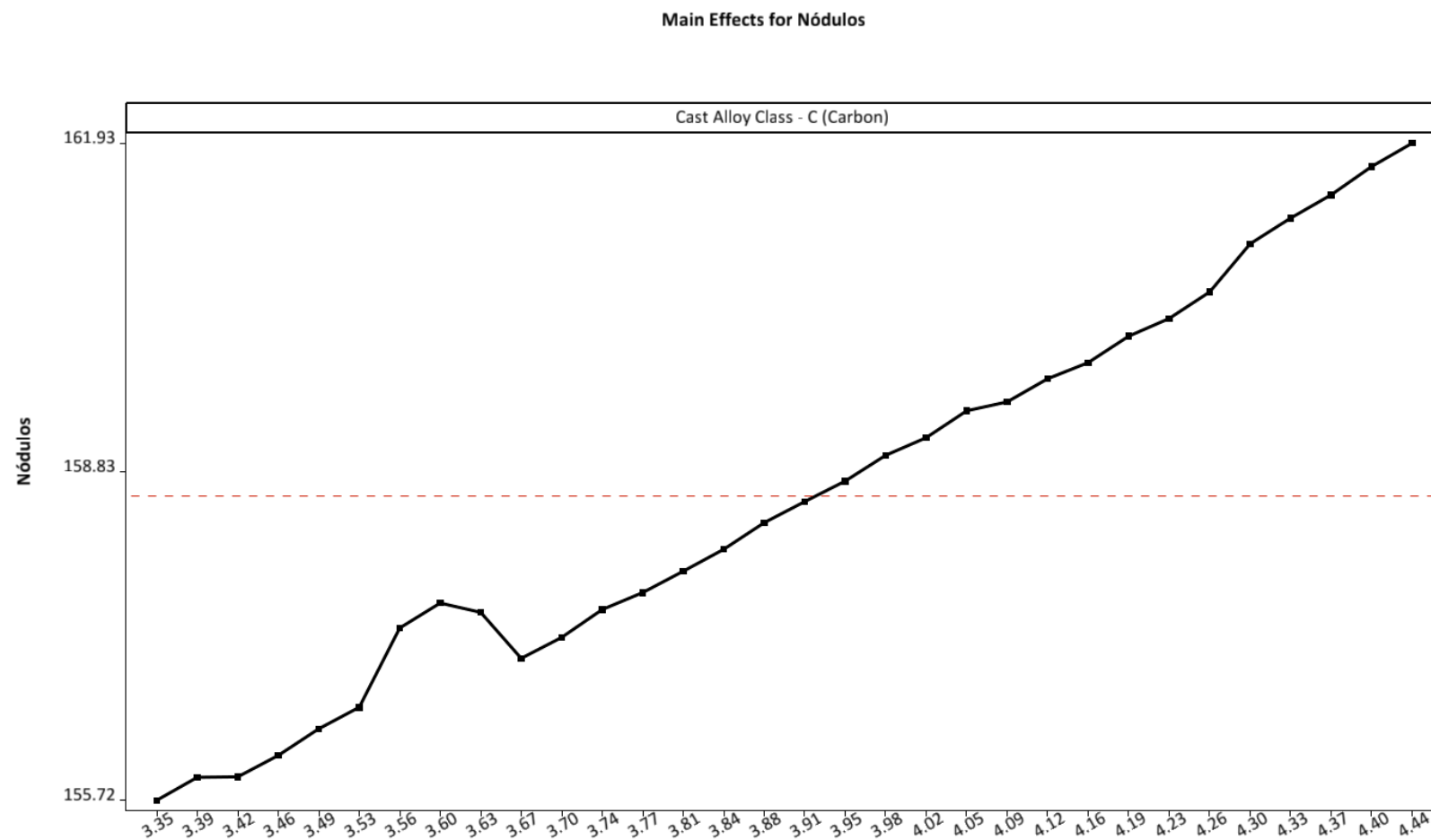


Fonte: O autor, 2018.

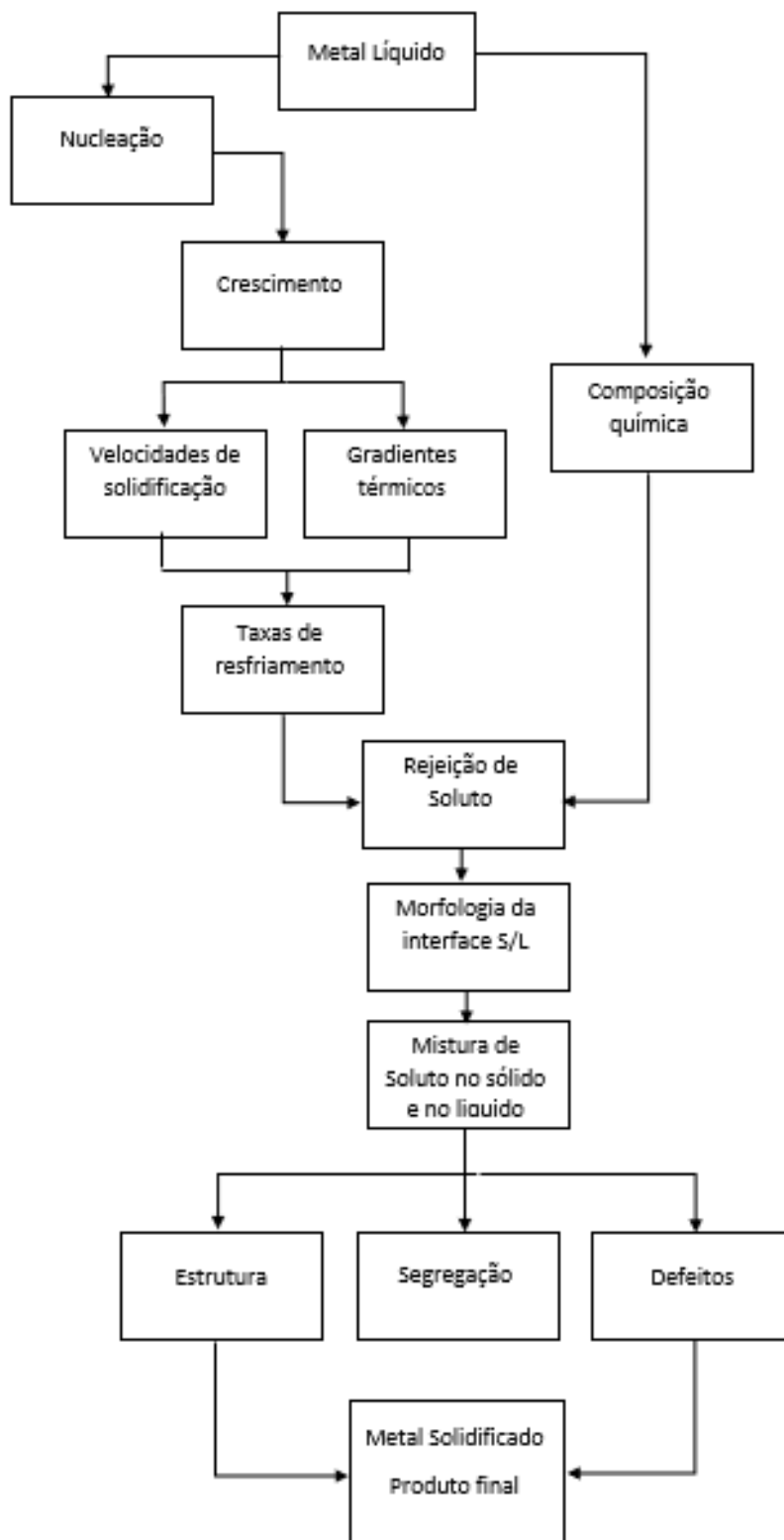
APÊNDICE BH - MAGNÉSIO / FORMAÇÃO DE FERRITA



APÊNDICE BI - CARBONO / FORMAÇÃO DE NÓDULOS

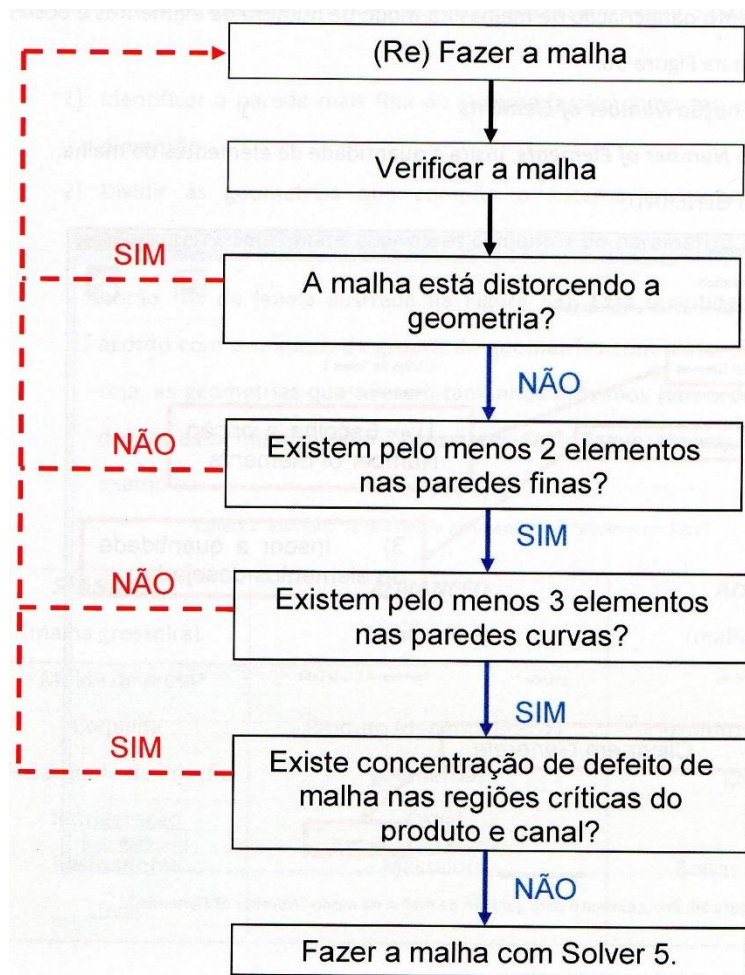


ANEXO A - FENÔMENOS DURANTE O PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO DE UM METAL



Fonte: Adaptado de Garcia, 2001.

ANEXO B - FLUXOGRAMA DE GERAÇÃO DE UMA MALHA COMPUTACIONAL



Fonte: MAGMA, 2015.