

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**ROBERTO CESAR RESENDE**

**PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR E DETERMINAÇÃO DE SUAS  
PROPRIEDADES COM E SEM A PRESENÇA DE NIÓBIO**

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

**ROBERTO CESAR RESENDE**

**PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR E DETERMINAÇÃO DE SUAS  
PROPRIEDADES COM E SEM A PRESENÇA DE NIÓBIO**

Dissertação apresentada como requisito  
para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica pela Universidade  
de Caxias do Sul.

Orientador Prof. Dr. Alexandre Vieceli

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

R433p Resende, Roberto Cesar

Produção de ferro fundido nodular e determinação de suas propriedades com e sem a presença de nióbio [recurso eletrônico] / Roberto Cesar Resende. – 2025.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Alexandre Veceli.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Ferro fundido - Propriedades mecânicas. 2. Nióbio. 3. Moldagem (Fundição). I. Veceli, Alexandre, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.74

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)  
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

**ROBERTO CESAR RESENDE**

**PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR E DETERMINAÇÃO DE SUAS  
PROPRIEDADES COM E SEM A PRESENÇA DE NIÓBIO**

Dissertação apresentada à Universidade de  
Caxias do Sul como requisito para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia Mecânica.  
Área de concentração: Projeto e Fabricação  
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vieceli

**Aprovado em 10/03/2025.**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Alexandre Vieceli  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. César Aguzzoli  
Universidade de Caxias do Sul – UCS



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder a força e determinação necessárias para enfrentar este desafio.

Ao meu dedicado orientador, Alexandre Vieceli, cuja orientação e apoio foram inestimáveis durante todo o processo.

À Metalúrgica Rio, por me proporcionar a valiosa oportunidade de participar deste projeto significativo.

Aos respeitáveis membros da banca, cujas avaliações e *insights* enriqueceram o meu trabalho.

À Universidade de Caxias do Sul (UCS), por oferecer a oportunidade de estudo e pelo conhecimento valioso que pude adquirir durante minha jornada acadêmica.

Aos colaboradores da Rio que contribuíram com dedicação e *expertise* para o sucesso deste projeto.

Ao meu filho Théo, mesmo que ainda seja uma criança que não compreenda completamente, por ser minha fonte de motivação e inspiração constante.

Agradeço imensamente à minha esposa, Daiane, pela compreensão, paciência e apoio incondicional durante todo o período da graduação. Sua presença e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse alcançar esse objetivo.

Aos colegas que compartilharam comigo esta caminhada, proporcionando apoio mútuo e companheirismo.

Cada um de vocês desempenhou um papel essencial em minha trajetória, e sou profundamente grato por todo o apoio, encorajamento e colaboração que recebi. Sem dúvida, essa jornada não teria sido possível sem a contribuição de cada um de vocês.

## RESUMO

Os ferros fundidos são amplamente utilizados em diversas indústrias devido às suas propriedades mecânicas e custo-benefício. Entre esses, o ferro fundido nodular se destaca pela sua ductilidade e resistência mecânica, propriedades atribuídas à sua microestrutura com grafita nodular. O presente estudo aborda a produção de ferro fundido nodular e a determinação de suas propriedades com e sem a adição de nióbio. Foram analisadas as adições de concentrações de 0,18 %, 0,25 % e 0,34 % em massa de nióbio em ferro fundido nodular. A pesquisa focou na análise das microestruturas resultantes e nas suas propriedades mecânicas, como resistência à tração, resistência ao escoamento, alongamento, dureza e energia absorvida no impacto. Os ensaios mecânicos confirmaram o efeito significativo da adição de nióbio nas propriedades do ferro fundido nodular. A análise de variância revelou através do teste F com confiança de 95% , que em todos os testes, a adição de nióbio influencia significativamente a resistência a tração, resistência ao escoamento, dureza Brinell, alongamento e resistência ao impacto. O teste de Fisher confirmou diferenças estatísticas significativas entre as concentrações avaliadas, especialmente entre 0 % e 0,34 %. No alongamento pós-ruptura, as diferenças foram significativas na maioria das comparações, exceto entre 0,25 % e 0,34 %. Esses resultados reforçam que o nióbio melhora significativamente as propriedades mecânicas do material, com destaque para o aumento de resistência mecânica e dureza. Observou-se que o aumento das concentrações de nióbio, na faixa estudada, levou a um incremento na fração de perlita e a uma redução correspondente da fração de ferrita, com consequências positivas na resistência ao impacto até a concentração ótima, além da qual foi observada uma queda. Esse comportamento se deve à capacidade do nióbio de atuar como formador de carbonetos e de influenciar a estabilidade da perlita, o que favorece a resistência da matriz. Os resultados confirmam que o nióbio em concentrações específicas, exercem uma influência significativa sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular.

**Palavras chaves:** Nióbio, Ferro Fundido Nodular, Propriedades Mecânicas, Microestrutura.

## ABSTRACT

Cast irons are widely used in various industries due to their mechanical properties and cost-effectiveness. Among them, ductile iron stands out for its ductility and mechanical strength, properties attributed to its microstructure with nodular graphite. This study addresses the production of ductile iron and the determination of its properties with and without the addition of niobium. Additions of 0.18%, 0.25%, and 0.34% by mass of niobium in ductile iron were analyzed. The research focused on analyzing the resulting microstructures and their mechanical properties, such as tensile strength, yield strength, elongation, hardness, and impact energy absorption. Mechanical tests confirmed the significant effect of niobium addition on the properties of ductile iron. ANOVA, through the F-test with 95% confidence, revealed that in all tests, the addition of niobium significantly influences tensile strength, yield strength, Brinell hardness, elongation, and impact resistance. The Fisher test confirmed statistically significant differences between the evaluated concentrations, especially between 0% and 0.34%. For post-fracture elongation, the differences were significant in most comparisons, except between 0.25% and 0.34%. These results reinforce that niobium significantly improves the material's mechanical properties, particularly increasing mechanical strength and hardness. It was observed that increasing niobium concentrations within the studied range led to an increase in the pearlite fraction and a corresponding reduction in the ferrite fraction, positively impacting impact resistance up to the optimal concentration, beyond which a decline was observed. This behavior is due to niobium's ability to act as a carbide-forming element and influence pearlite stability, enhancing matrix strength. The results confirm that niobium, at specific concentrations, exerts a significant influence on the microstructure and mechanical properties of ductile iron.

**Keywords:** Niobium, Ductile Cast Iron, Mechanical Properties, Microstructure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grafita esferoidal do ferro fundido nodular .....	17
Figura 2 - Microestrutura do ferro fundido nodular (A= Ferrita, B= Perlita).....	18
Figura 3 - Microestrutura do ferro fundido nodular austemperado .....	18
Figura 4 – Resistência ao impacto de diferentes classes de ferro fundido nodular ...	24
Figura 5 - Ferro fundido nodular com adições de nióbio e mostrando pequenas e discretas partículas de NbC homogeneamente distribuídas. ....	28
Figura 6 - Resultados de propriedades mecânicas com adição de Nb. ....	30
Figura 7 – Resultados de resistência ao impacto.....	30
Figura 8 - Resultados de ensaio de tração.....	32
Figura 9 - Resultados de ensaios mecânicos de ligas com adição de Nb.....	35
Figura 10 - Valores de perlita e ferrita .....	38
Figura 11 – Resultados percentuais de microestruturas conforme teor de Nb.....	39
Figura 12 – Resultados de Resistência a tração .....	40
Figura 13 – Resulta de dureza .....	41
Figura 14 – Resultado resistência ao impacto.....	41
Figura 15 – Fluxograma das etapas experimentais do trabalho.....	42
Figura 16 – Dimensões do bloco Y ( Dimensões em mm) .....	43
Figura 17 – Modelo impresso do bloco Y .....	44
Figura 18 – Modelo com 6 cavidades.....	45
Figura 19 – Temperatura de enchimento do MAGMASOFT®.....	48
Figura 20 – Molde inferior com cola, molde superior e filtro .....	50
Figura 21 – Molde com lastros .....	50
Figura 22 – Metal líquido no forno.....	51
Figura 23 – Tratamento de nodularização em panela .....	52
Figura 24 – Tratamento de inoculação.....	52
Figura 25 – Vazamento dos moldes.....	53
Figura 26 – (a) Amostra final destinada à análise da composição química (b) Corpo de prova para avaliação da nodularização.....	54
Figura 27 - Transferência do metal da panela para o forno.....	55
Figura 28 – Peças desmoldadas .....	55
Figura 29 – Corte do Bloco Y .....	56
Figura 30 – Corpo de prova para tração.....	57

Figura 31 – Peça utilizada no estudo de caso.....	58
Figura 32 – Local do corte com serra fita no bloco Y para análise de sanidade .....	59
Figura 33 – Bloco Y cortado, sem a presença de defeitos visuais. ....	65
Figura 34 – Microestrutura do ferro fundido nodular sem nióbio .....	67
Figura 35 – Microestrutura típica de ferro fundido nodular com nióbio.....	68
Figura 36 – Grau de nodularização .....	69
Figura 37 – Nódulos por mm <sup>2</sup> .....	70
Figura 38 – Fração de Perlita .....	71
Figura 39- Fração de Ferrita.....	71
Figura 40 – Microestrutura do ferro fundido nodular com 0,34 % de nióbio .....	72
Figura 41 – Microestrutura com nióbio de 0,25 % .....	73
Figura 42 – Microestrutura com nióbio de 0,18 %.....	73
Figura 43 – Tamanho dos carbonetos.....	75
Figura 44 – Partículas de Nióbio e elementos presentes analisados por EDS.....	75
Figura 45 – Resistência à Tração com variação da quantidade de nióbio. ....	78
Figura 46 - Teste de Fisher para Resistência à Tração.....	79
Figura 47 – Resistência ao escoamento com variação da quantidade de nióbio. ....	81
Figura 48 - Teste de Fisher para Resistência ao Escoamento .....	82
Figura 49 - Alongamento com variação da quantidade de nióbio.....	84
Figura 50 – Teste de Fisher para alongamento pós-ruptura .....	86
Figura 51 - Resistência à tração, Resistência ao escoamento e Alongamento.....	87
Figura 52 - Resultado de dureza x porcentagem de nióbio .....	89
Figura 53 – Teste de Fisher Dureza Brinell .....	90
Figura 54 - Resultado do ensaio Charpy x porcentagem de nióbio .....	92
Figura 55 – Teste de Fisher para energia absorvida no ensaios de Impacto Charpy	93
Figura 56 – Comparativo do estudo de caso com e sem nióbio.....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de ferros fundidos nodulares.....	22
Tabela 2 – Classes e requisitos de composição química (% em massa) .....	23
Tabela 3 – Valores de resistência a fadiga (vida infinita) .....	24
Tabela 4 - Coeficiente de expansão térmica <i>grade</i> 60-40-18 e 65-45-12 .....	25
Tabela 5 - Algumas propriedades físicas do NbC .....	27
Tabela 6 - Composição química com e sem Nióbio ( % em massa) .....	32
Tabela 7 – Valores médios obtidos com adição de nióbio .....	33
Tabela 8 – Composição química ( % em massa) .....	34
Tabela 9 – Composição química ( % em massa) .....	34
Tabela 10 - Resultados de ensaios mecânicos .....	37
Tabela 11 – Resultados de composição química (% em massa) .....	40
Tabela 12 - Porcentagem de materiais e elementos utilizados na carga metálica ( % em massa).....	46
Tabela 13 – Carga utilizada na fusão.....	46
Tabela 14 – Composição química da liga base GGG50 (% em massa).....	47
Tabela 15 – Composição dos ferros liga (% em massa) .....	47
Tabela 16 – Composição química do FeNb (% em massa) .....	47
Tabela 17 – Ensaios da areia.....	49
Tabela 18 - Propriedades mecânicas especificadas para a peça .....	58
Tabela 19 – Quantidades de bloco Y fundidos e corpos de provas para análise .....	62
Tabela 20 – Resultado análise de sanidade.....	65
Tabela 21 – Resultado análise de ultrassom.....	66
Tabela 22 – Composição química.....	66
Tabela 23 – Resultados de Resistência à Tração .....	77
Tabela 24 – Resultados de resistência ao escoamento .....	80
Tabela 25 – Resultados de alongamento após fratura.....	83
Tabela 26 – Resultados de dureza Brinell.....	88
Tabela 27 – Resultados de Resistência ao Impacto Charpy.....	91
Tabela 28 – Resultados do estudo de caso sem adição de Nióbio .....	94
Tabela 29 – Resultados do estudo de caso com adição de 0,34 % de Nióbio .....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Alongamento pós-ruptura (%)
CE	Carbono equivalente
LRT	Limite de resistência a tração (MPa)
LE	Limite de (resistência ao) escoamento (MPa)
RI	Resistência ao Impacto (J/cm <sup>2</sup> )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	13
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.2.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
1.2.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
2.1	FERRO FUNDIDO NODULAR.....	16
2.1.1	<b>Propriedades dos ferros fundidos nodulares</b> .....	<b>22</b>
2.1.2	<b>Nióbio como elemento de liga de ferros fundidos</b> .....	<b>25</b>
2.1.3	<b>Ferros fundidos com a incorporação de nióbio</b> .....	<b>26</b>
2.1.4	<b>Propriedades mecânicas do ferro fundido com nióbio</b> .....	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>42</b>
3.1	MATERIAIS .....	43
3.2	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	48
3.3	CONFECÇÃO DO FERRAMENTAL .....	48
3.4	MOLDAGEM.....	49
3.5	FUSÃO E VAZAMENTO .....	51
3.6	INCORPORAÇÃO DO NIÓBIO.....	54
3.7	DESMOLDAGEM .....	55
3.8	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	56
3.9	ESTUDO DE CASO .....	57
3.10	AVALIAÇÃO DE DEFEITOS.....	58
3.11	ANÁLISE QUÍMICA DAS LIGAS FUNDIDAS .....	59
3.12	ANÁLISE MICROESTRUTURAL DAS LIGAS FUNDIDAS .....	59
3.13	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	60
3.14	AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LIGAS.....	62
3.14.1	<b>Dureza</b> .....	<b>63</b>
3.14.2	<b>Resistência à tração</b> .....	<b>64</b>
3.14.3	<b>Resistência ao impacto</b> .....	<b>64</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>65</b>

4.1	SANIDADE DO FUNDIDO POR ANÁLISE VISUAL .....	65
4.2	SANIDADE DO FUNDIDO POR ULTRASSOM .....	66
4.3	ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL FUNDIDO .....	66
4.4	ANÁLISE MICROGRÁFICA DO MATERIAL FUNDIDO .....	67
<b>4.4.1</b>	<b>Resultados da análise microscópica óptica .....</b>	<b>68</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Resultados da análise em MEV e por EDS .....</b>	<b>72</b>
4.5	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	76
4.6	RESULTADOS DE PROPRIEDADES DO ESTUDO DE CASO .....	94
4.7	DISCUSSÕES SOBRE RESULTADOS .....	96
4.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	100
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>103</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>104</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>106</b>
	APÊNDICE A - NÓDULOS DE GRAFITA SEM ADIÇÃO DE NIÓBIO .....	115
	APÊNDICE B - MICROESTRUTURA SEM ADIÇÃO DE NIÓBIO .....	116
	Apêndice C - NÓDULOS DE GRAFITA COM NIÓBIO DE 0,18 % .....	117
	APÊNDICE D - MICROESTRUTURA COM NIÓBIO DE 0,18 % .....	118
	APÊNDICE E - NÓDULOS DE GRAFITA COM NIÓBIO DE 0,25 % .....	119
	APÊNDICE F - MICROESTRUTURA COM NIÓBIO DE 0,25 % .....	120
	APÊNDICE G - NÓDULOS DE GRAFITA COM NIÓBIO DE 0,34 % .....	121
	APÊNDICE H - MICROESTRUTURA COM NIÓBIO DE 0,34 % .....	122
	APÊNDICE I - MEV COM NIÓBIO DE 0,18 % .....	123
	APÊNDICE J - EDS COM NIÓBIO DE 0,18 % .....	124
	APÊNDICE K - MEV COM NIÓBIO DE 0,25 % .....	124
	APÊNDICE L - EDS COM NIÓBIO DE 0,25 % .....	125
	APÊNDICE M – MEV COM NIÓBIO DE 0,34 % .....	125
	APÊNDICE N - EDS COM NIÓBIO DE 0,34 % .....	126
	APÊNDICE O - NÓDULOS DE GRAFITA COM NIÓBIO DE 0,34 % - ESTUDO DE CASO .....	127
	APÊNDICE P - MICROESTRUTURA COM NIÓBIO DE 0,34 % - ESTUDO DE CASO .....	128

APÊNDICE Q – ANOVA PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	129
APÊNDICE R – ANOVA PARA RESISTÊNCIA DE ESCOAMENTO .....	129
APÊNDICE S – ANOVA PARA ALONGAMENTO.....	130
APÊNDICE T – ANOVA PARA DUREZA BRINELL .....	130
APÊNDICE U – ANOVA PARA RESISTÊNCIA AO IMPACTO CHARPY .....	131
APÊNDICE V - CÁLCULO TAMANHO DA AMOSTRA .....	131
ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO NIÓBIO .....	111
ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DA LIGA FESIMG.....	112
ANEXO C – ESPECIFICAÇÃO INOCULANTE .....	113
ANEXO D - QUADRO COMPARATIVO .....	114

## 1 INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos são classificados em diferentes famílias, principalmente de acordo com a forma da grafita. O nome de cada família, além de refletir a forma da grafita (nodular, vermicular, em veios), tem relação com o aspecto da fratura (cinzento, branco) ou com alguma propriedade mecânica relevante (maleável). Os ferros fundidos nodulares apresentam a grafita em forma de nódulos, que confere ductilidade, propriedade importante do material (Guessser, 2019, p. 4).

Segundo balanço publicado pela ABIFA (2023) no ano de 2022, o setor de fundição produziu 2,97 milhões de toneladas de fundidos, entre ferro fundido (2.260 t), aço (289.588 t) e metais não ferrosos (425,521 t). Dentre eles, o ferro fundido é responsável por 75 % de toda produção, aproximadamente.

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos são aprimoradas significativamente por meio da incorporação de elementos de liga. Esta prática é essencial na metalurgia e engenharia de materiais, pois permite modificar e otimizar as características do ferro fundido, de acordo com as necessidades específicas de uma aplicação (Nascimento, 2009, p. 68).

O nióbio (Nb) representa um elemento químico de relevância tanto na indústria quanto na pesquisa científica, sendo reconhecido como um recurso estratégico de significativa importância. Este elemento de transição apresenta atributos como aumento na resistência e tenacidade, que lhe conferem um alto valor em uma variedade de aplicações, desde o aprimoramento das propriedades de metais até seu papel fundamental no impulsionamento de avanços tecnológicos em diversas áreas, como automobilística, aeroespacial, eletrônicos, siderúrgica (Corgulho, Santos, & Nunes, 2024, p. 13).

A aplicação do nióbio nos pedidos de patente é na metalurgia (45 %), o que corresponde ao fato de que os principais produtos que contêm nióbio são os aços (ligas metálicas). A indústria química é destacada em 32 % dos pedidos relacionados ao nióbio depositados no Brasil, principalmente na química orgânica, onde os resultados de nióbio são amplamente empregados. Em terceiro lugar, o setor de transporte se destaca, especialmente o setor automotivo, representando 23 % dos pedidos com nióbio (Corgulho, Santos, & Nunes, 2024, p. 9).

A maior parte das reservas economicamente viáveis de nióbio encontra-se no Brasil, com aproximadamente 94 % das reservas globais. No entanto, o nióbio brasileiro não é comercializado em sua forma bruta, mas sim em forma de produtos beneficiados e semimanufaturados. O Brasil detém historicamente a posição de maior produtor mundial de nióbio e ferronióbio, contribuindo com 90 % da produção global de nióbio, seguido pelo Canadá, que responde por 8 % da produção (Corgulho, Santos, & Nunes, 2024, p. 19).

O Nióbio afeta as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular, tal que adições de Nb indicam aumento na resistência à tração, limite de escoamento e dureza (Souza, 2012, p. 138).

A pesquisa tem como objetivo analisar a adição de nióbio em diferentes concentrações nas propriedades do ferro fundido nodular. Investigou-se como a presença do nióbio influencia essa liga metálica, examinando suas características e desempenho em diferentes composições. Essa análise buscou fornecer uma compreensão do potencial do nióbio nas aplicações industriais, contribuindo para o avanço do conhecimento nesse campo da metalurgia.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A justificativa para o estudo sobre a aplicação e avaliação do nióbio na produção de ferro fundido nodular reside na importância desse material na indústria atual. O ferro fundido desempenha um papel fundamental na fabricação de componentes em diversos setores, como automotivo, construção, maquinaria pesada e muitos outros. A incorporação do nióbio nessas ligas tem o potencial de melhorar significativamente suas propriedades mecânicas, resultando em produtos mais resistentes e duráveis (Nylén, 2007, p. 72).

Além disso, o nióbio é um elemento de liga importante, com aplicações em tecnologias emergentes, como veículos elétricos, energias renováveis e com o avanço da tecnologia e a necessidade de materiais mais leves e resistentes, a demanda por nióbio tem aumentado continuamente. Portanto, compreender a interação do nióbio com o ferro fundido nodular é relevante não apenas para a indústria atual, mas também para a sustentabilidade e a inovação tecnológica.

Diferentemente dos estudos existentes na literatura, que foram conduzidos em ambiente laboratorial, utilizando moldes simplificados sem sistema de canalização,

este trabalho foi realizado em um ambiente industrial, com fornos de maior capacidade e moldes de areia contendo todo o sistema de canalização e alimentação da peça. Essa abordagem permitiu avaliar o comportamento real do ferro fundido nodular com nióbio em condições de produção, levando em consideração fatores como transferência de calor, resfriamento e solidificação, que impactam diretamente as propriedades mecânicas finais do material.

Além disso, o diferencial deste estudo está na aplicação prática do ferro fundido nodular com nióbio em uma peça usualmente produzida e utilizada em motores de combustão interna. Esse estudo de caso possibilitou uma análise mais realista dos impactos do nióbio em um componente com relevância industrial, fornecendo dados diretamente aplicáveis à manufatura de peças fundidas para o setor automotivo e outras áreas.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho são descritos a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo foi produzir e caracterizar o ferro fundido nodular bruto de fusão e comparar com o mesmo material ligado ao nióbio em três diferentes teores percentuais.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a resistência à tração, resistência ao escoamento e ductilidade do ferro fundido nodular bruto de fusão e com adições de nióbio.
- Avaliar a dureza no ferro fundido nodular bruto de fusão e com adições de nióbio.
- Analisar a microestrutura no ferro fundido nodular bruto de fusão e com adições de nióbio.
- Avaliar a resistência ao impacto no ferro fundido nodular bruto de fusão e com adições de nióbio.

- Avaliar a viabilidade técnica de incorporar nióbio em peça usualmente produzida em ferro fundido nodular bruto de fusão, visando aprimorar suas propriedades mecânicas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A utilização do nióbio na produção de ferro fundido nodular representa um campo de pesquisa e aplicação de grande relevância na indústria metalúrgica e em setores que dependem de materiais com alta resistência e durabilidade. Neste contexto, a fundamentação teórica aborda os principais aspectos relacionados a utilização do Nióbio e suas aplicações.

Neste capítulo da dissertação, são abordados os principais temas que servem como pilares para compreensão do trabalho desenvolvido, ou sejam: o ferro fundido nodular e os efeitos da incorporação do nióbio na liga.

### 2.1 FERRO FUNDIDO NODULAR

As ligas ferro-carbono com teor de carbono superior a 2 % em massa correspondem, como relatado na literatura metalúrgica, aos ferros fundidos. O elevado teor de carbono dessas ligas e a presença sempre obrigatória do elemento silício tornam, entretanto, necessário considerá-las como ligas ternárias Fe-C-Si (Chiaverini, 1986, p. 163).

O ferro fundido nodular, também conhecido como ferro fundido dúctil ou de grafite nodular, é uma liga metálica de ferro e carbono que se destaca por ter uma microestrutura única com grafite na forma nodular. Essa microestrutura é o resultado de um processo de tratamento térmico controlado, no qual elementos nodularizantes como magnésio ou cério, são adicionados ao metal fundido (Chiaverini, 1986, p. 163).

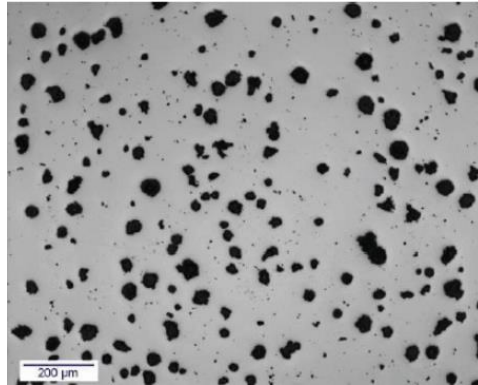
O ferro fundido nodular possui uma forma de grafita esferoidal em sua matriz metálica, o que confere propriedades mecânicas excepcionais, como alta ductilidade e resistência à tração, comparativamente ao ferro fundido cinzento. Essas características tornam o material altamente versátil e adequado para uma ampla gama de aplicações em várias indústrias, incluindo a automobilística, a construção civil e a de equipamentos pesados (Chiaverini, 1986, p. 163).

Na Figura 1, exemplifica-se um ferro fundido nodular, em que se visualiza sua grafita, na forma de esferoides escuros.

O processo de produção começa com a transferência do metal do forno para uma panela de nodularização. Nessa panela, é adicionada uma liga nodularizante, composta por ferro, silício e magnésio (FeSiMg) em uma proporção de 5 % a 10 %. O

objetivo principal desse passo é realizar a dessulfuração e desoxidação do metal líquido (Nascimento, 2009, p. 11).

Figura 1 – Grafita esferoidal do ferro fundido nodular



Fonte: Rio (2023).

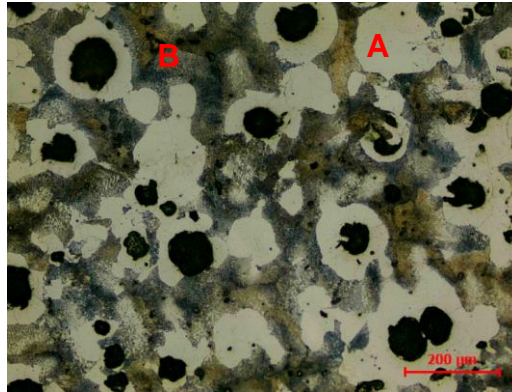
O magnésio (Mg) introduzido por meio da liga FeSiMg, reage com o enxofre presente no banho, o que resulta na formação de sulfetos estáveis que se dispersam no banho metálico. Essas inclusões desempenham um papel fundamental ao servirem como substrato para a posterior deposição de uma camada de silicatos e, por fim, funcionam como locais propícios para o crescimento da grafita (Vicente, *et al.*, 2019).

Após a nodularização, o metal é vazado no molde, onde ele solidificará em uma faixa de temperatura entre 1153 °C e 1147 °C. Durante esse processo, ocorre a formação de grafita esferoidal, que se dispersa na matriz austenítica. É importante manter um teor de Mg na peça final entre 0,035 % e 0,055 % em massa, para garantir a formação da grafita nodular. Essa grafita possui a característica de concentrar menos tensão, o que faz com que a matriz da liga tenha uma influência mais significativa nas propriedades do material, que pode representar até 70 % das propriedades mecânicas e físicas (Nascimento, 2009, p. 11).

Segundo Guessser (2019, p. 5), os ferros fundidos nodulares se caracterizam pela presença de grafita em forma de nódulos, que lhes confere uma notável ductilidade, uma propriedade importante para esse material. Entre as variantes, os nodulares com matriz ferrítica exibem valores de limite de resistência situados na faixa de 380 MPa a 450 MPa, acompanhados de alongamento que variam entre 10 % e 22 %. Por outro lado, os nodulares de matriz perlítica podem atingir impressionantes 900 MPa em termos de limite de resistência, embora apresentem valores de alongamento de 2 %. Devido a essa combinação de propriedades, os ferros fundidos

nodulares têm conquistado crescente aplicação na engenharia, gradualmente substituindo componentes de ferro fundido cinzento, ferro fundido maleável, aço fundido e forjado, além de estruturas soldadas. Na Figura 2 é demonstrada a microestrutura de um ferro fundido nodular.

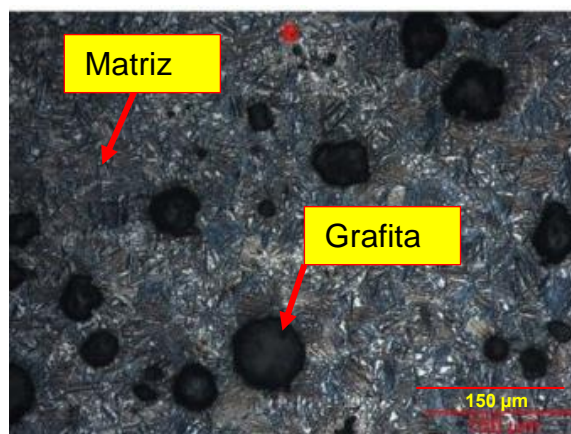
Figura 2 - Microestrutura do ferro fundido nodular (A= Ferrita, B= Perlita)



Fonte: Rio (2023).

Uma categoria dentro dos ferros fundidos nodulares é a dos austemperados, que apresentam matriz de ausferrita, resultante de um tratamento térmico específico de austêmpera. Outro grupo relevante é o dos nodulares ligados ao Si + Mo e os nodulares austeníticos, ligados ao níquel (Ni), que se destacam pelo uso na indústria automobilística, especialmente em coletores de exaustão e carcaças de turbocompressores (Guessser, 2019, p. 7). A Figura 3 ilustra a microestrutura do ferro fundido austemperado, destacando a grafita e a matriz.

Figura 3 - Microestrutura do ferro fundido nodular austemperado



Fonte: Rio (2023).

Guesser (2019, p. 67) destaca a importância do ensaio de tração como uma técnica fundamental na análise de materiais, oferecendo *insights* sobre seu comportamento mecânico em situações práticas. Em particular, enfatiza-se que o limite de resistência, o qual denota a máxima tensão que o material pode suportar antes da fratura, é uma medida obtida através deste método, destacando seu papel fundamental na engenharia e na predição de falhas estruturais.

Guesser (2019, p. 68) define o alongamento como o aumento permanente no comprimento, expresso como uma porcentagem do comprimento útil inicial do corpo de prova. Destaca sua relevância na avaliação da ductilidade e da capacidade de deformação dos materiais sob tensão, fornecendo percepções essenciais para o *design* e a engenharia de estruturas.

As principais características do ferro fundido nodular incluem:

- **Alta Ductilidade:** a presença de grafita nodular permite que o material seja altamente deformável sem fraturar, tornando-o adequado para aplicações que requerem absorção de choque e resistência à tração. Essa forma de grafita é distribuída de maneira mais uniforme e interconectada na matriz metálica do ferro fundido, o que promove uma maior ductilidade. Esses nódulos de grafita atuam como pontos de parada para as trincas e fissuras, impedindo a propagação delas, o que resulta em uma estrutura menos propensa à fratura frágil e mais capaz de deformar plasticamente antes da ruptura, conferindo maior ductilidade ao material (Asm Metals Handbook, 2000, p. 174).
- **Resistência à Tração:** o ferro fundido nodular exibe uma elevada resistência à tração, tornando-o adequado para componentes estruturais que exigem suporte de carga. Os nódulos de grafita presentes na microestrutura do ferro fundido nodular atuam como obstáculos à propagação de trincas e fissuras, o que aumenta significativamente a resistência à tração do material. Além disso, a forma esférica da grafita nodular distribui as tensões de forma mais uniforme na matriz metálica, reduzindo os pontos de concentração de tensão que poderiam levar à falha. Essa combinação de uma matriz metálica resistente com nódulos de grafita proporciona uma resistência à tração superior em comparação com outros tipos de ferro fundido, como o ferro fundido cinzento (Asm Metals Handbook, 2000, p. 238).

- Tenacidade: ele possui uma excelente resistência ao impacto e à fadiga, tornando-o ideal para peças sujeitas a cargas dinâmicas, pois a matriz metálica do ferro fundido nodular contribui para sua tenacidade. Uma matriz ferrítica ou perlítica uniforme e bem distribuída pode oferecer resistência adicional à propagação de trincas, complementando os efeitos da grafita nodular na melhoria da tenacidade do material (Asm Metals Handbook, 2000, p. 300).
- Usinabilidade: o material pode ser usinado com facilidade, o que facilita a fabricação de peças complexas, de modo que os nódulos de grafita conferem uma estrutura mais isotrópica e menos propensa à concentração de tensões, o que resulta em maior ductilidade e tenacidade ao material. Além disso, a presença de grafita nodular facilita o processo de usinagem, pois ela age como lubrificante, reduzindo o desgaste da ferramenta de corte e melhorando a qualidade da superfície usinada (Asm Metals Handbook, 1990, p. 47).

Os ferros fundidos nodulares, são empregados tanto em sua forma bruta de fusão quanto após tratamento térmico. Essa versatilidade na utilização reflete-se nas diferentes aplicações industriais, onde as propriedades específicas do ferro nodular podem ser potencializadas por meio de técnicas de tratamento térmico, atendendo às exigências particulares de resistência, durabilidade e outras características necessárias para diversas aplicações (Santos, 2000, p. 1).

Santos (1987, p. 158) cita alguns tratamentos efetuados nos ferros fundidos nodulares, a saber: recozimento, alívio de tensões, normalização, têmpera e revenimento, endurecimento superficial e austêmpera.

Nas aplicações onde a prioridade não é alta resistência à tração, mas sim maximizar a ductilidade e a usinabilidade, é empregado o recozimento. Este processo resulta na obtenção de ferrita, devido à decomposição da cementita presente na perlita. O ciclo de recozimento consiste em aquecer o material entre 900 °C e 950 °C e mantê-lo nessa temperatura por 1 hora, adicionando 1 hora para cada aumento de 25 mm na espessura. Após isso, o resfriamento é realizado até 690 °C, quando então o material será mantido por 5 horas, com acréscimo de uma hora para cada 25 mm de espessura, seguido pelo resfriamento até a temperatura ambiente (Santos, 1987, p. 158).

Alívio de tensões é empregado para minimizar as tensões originadas no material durante a solidificação, sem causar mudanças significativas na microestrutura ou nas propriedades mecânicas. O ciclo de tratamento envolve temperaturas entre 510 °C e 680 °C, com a duração dependendo da temperatura aplicada, da natureza do trabalho realizado nas peças e do nível desejado de alívio de tensões. Além disso, a velocidade de resfriamento após o tratamento não afeta a microestrutura, nem as propriedades mecânicas do material (Santos, 1987, p. 161).

A normalização envolve a austenitização de uma peça fundida de ferro nodular, seguida de resfriamento ao ar até uma temperatura crítica. A normalização auxilia na quebra de carbonetos, aumenta dureza e resistência, bem como produz propriedades mais uniformes. A normalização deve ser realizada a uma temperatura de austenitização de aproximadamente 100 °C acima da temperatura crítica. Normalmente, temperaturas de austenitização na faixa de (870 – 900 °C) e tempos de espera de uma hora, mais uma hora por 25 mm de espessura, são adequadas para produzir uma estrutura totalmente austenítica em peças fundidas sem liga, relativamente isentas de carbonetos. A taxa de resfriamento deve ser suficientemente rápida para suprimir a formação de ferrita e produzir uma estrutura totalmente perlítica. (Mullins, 1990, p. 177).

O objetivo primordial dos tratamentos de têmpera e revenimento aplicados em ferro fundido é alcançar uma estrutura com uma determinada dureza, especialmente no caso do ferro fundido nodular. A temperatura de austenitização usualmente utilizada para ferros fundidos comerciais varia de 850 °C a 930 °C. O meio de têmpera mais comum para minimizar as tensões é o óleo, embora água possa ser empregada em peças com geometria mais simples. O tempo de manutenção na temperatura de austenitização depende da espessura da peça e de sua composição química, geralmente recomendando-se períodos de 0,5 a 1 hora para cada 25 mm de espessura. Quanto ao revenimento, este deve ser conduzido a temperaturas significativamente mais baixas que o limite inferior da zona crítica, com duração aproximada de 1 hora para cada 25 mm de espessura (Santos, 1987, p. 165).

O endurecimento superficial visa criar uma camada externa com alta dureza, enquanto mantém um núcleo ainda relativamente dúctil. Esse processo envolve o aquecimento da peça até uma temperatura acima do limite inferior da zona crítica por um período que varia de acordo com a profundidade desejada para a têmpera. Em seguida, realiza-se o resfriamento em meio líquido. Para minimizar as tensões

geradas entre a periferia e o núcleo durante esse processo, é recomendado realizar um alívio de tensões entre 150 °C e 200 °C após o tratamento (Santos, 1987, p. 167).

O ferro nodular austemperado requer um tratamento térmico em dois estágios. Na primeira etapa, austenitização, o aquecimento das peças fundidas é realizado em uma atmosfera controlada até uma temperatura de austenitização entre 815 e 925 °C. Em seguida, as peças são resfriadas rapidamente para evitar a formação de perlita e outros produtos de transformação e mantidas na temperatura de transformação por tempo suficiente para produzir as propriedades desejadas (Asm Metals Handbook, 1990, p. 106).

### 2.1.1 Propriedades dos ferros fundidos nodulares

Além do critério da microestrutura, que considera a forma da grafita e o tipo de matriz, os ferros fundidos nodulares podem ser classificados de acordo com os níveis de propriedades mecânicas. A norma NBR 6916/2017 cita a classe do material e seus respectivos valores de limite de resistência, limite de escoamento, alongamento e dureza, bem como a microestrutura predominante. De acordo com essa norma, os ferros fundidos nodulares são designados pelas letras FE seguidas por cinco algarismos, em que o três primeiros indicam o valor mínimo de limite de resistência à tração (em MPa) e os dois últimos, o alongamento mínimo (em %). A classe FE 38017-RI também é especificada quanto aos requisitos de resistência ao impacto, indicados pelas letras RI. A norma NBR 6916/2017 cita a classe do material e seus respectivos valores, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades de ferros fundidos nodulares

Classe	Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (HB)	Microestrutura predominante
FE 38017	380	240	17	140 – 180	Ferrítica
FE 42012	420	280	12	150 – 200	Ferrítica Perlítica
FE 50007	500	350	7	170 – 240	Ferrítica Perlítica
FE 60003	600	400	3	210 – 280	Perlítica
FE 70002	700	450	2	230 – 300	Perlítica
FE 80002	800	550	2	240 – 312	Ferrítica
FE 38017 RI	380	240	17	140 – 180	Ferrítica

Fonte: ABNT NBR 6916 (2017).

A norma NBR 8650/2015 cita as classes e requisitos de composição química para peças de ferro fundido nodular de aplicação automotiva, conforme demonstrado na Tabela 2.

A especificação de faixas de valores para os elementos químicos em ferros fundidos nodulares é uma prática necessária para acomodar as variabilidades inerentes ao processo de fusão, às reações químicas complexas, às limitações dos instrumentos de medição e ao comportamento dos elementos de liga. Essa abordagem permite a obtenção consistente das propriedades desejadas do material, mantendo um equilíbrio entre controle de processo, custo e qualidade do produto.

Tabela 2 – Classes e requisitos de composição química (% em massa)

Classe	Aplicação	C %	Si%	Mn máx. %	P máx. %	S máx. %	Cu%	Mg%
FE 38017	Fundidos submetidos a pressão, corpos de válvulas e de bombas, mecanismos de direção, flanges	3,4 3,8	2,1 2,8	0,3	0,09	0,02	-	0,04 0,06
FE 42012	Fundidos para máquinas submetidas a cargas de choque e fadiga, discos de freio	3,4 3,8	2,1 2,5	0,3	0,09	0,02	-	0,04 0,06
FE 50007	Virabrequins, engrenagens	3,4 3,8	2,3 2,8	0,5	0,09	0,02	0,2 0,7	0,04 0,06
FE 60003	Engrenagens de alta resistência, componentes de máquinas, peças automotivas	3,4 3,8	2,5 2,8	0,5	0,09	0,02	0,5 1,0	0,04 0,06
FE 70002	Idem	3,4 3,8	2,3 2,8	1,0	0,09	0,02	0,5 1,00	0,04 0,06
FE 80002	Pinhões, engrenagens, trilhos	3,4 3,8	2,1 2,8	1,0	0,09	0,02	0,5 1,00	0,04 0,06

Fonte: ABNT NBR 8650 (2015).

O desempenho na fadiga dos ferros fundidos, em geral, é influenciado pela morfologia da grafita, microestrutura da matriz e resistência à tração, tamanho da grafita, condição da superfície, como corrosão, e o tipo de tensão de carregamento (axial, flexão, flexão invertida, torção, multiaxial, amplitude variável). O efeito do formato da grafita na fadiga do ferro fundido recebe atenção especial e é uma variável chave que aumenta as concentrações de tensão para o início da trinca por fadiga. Portanto, o desempenho à fadiga dos ferros fundidos é influenciado grandemente pelo tamanho e forma da fase de grafita (Asm Metals Handbook, 1996, p. 1677).

Na Tabela 3 são apresentados valores de resistência à fadiga de ferros fundidos nodulares.

Tabela 3 – Valores de resistência a fadiga (vida infinita)

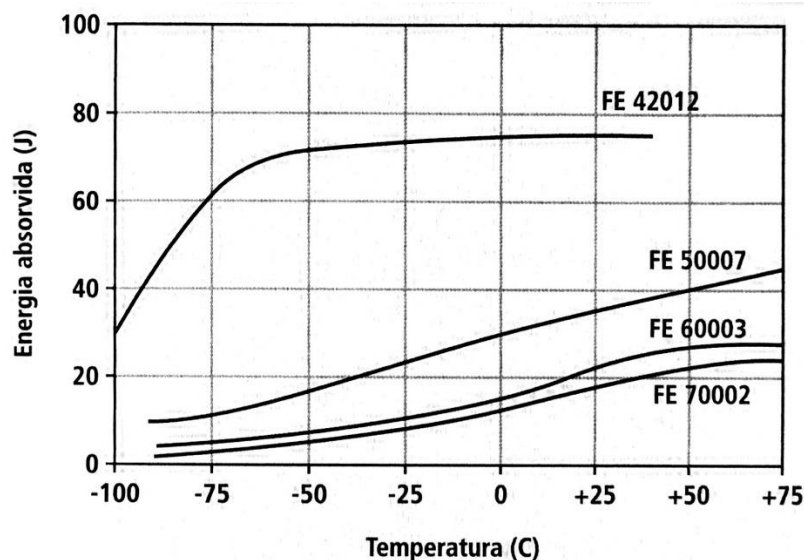
Classe	Resistência à Fadiga (MPa)
Padrão Dúctil 60-40-18	210
Padrão Dúctil 80-55-06	268-275
Padrão Dúctil 120-90-02	337

Fonte: Adaptado de ASM Metal Handbook (1996)

Um dos procedimentos empregados na avaliação da resistência ao impacto é o ensaio Charpy, o qual emprega uma amostra padronizada, seja ela entalhada ou não, submetida a um golpe de um pêndulo em um dispositivo específico. Essa descrição realça a técnica utilizada para determinar a capacidade de um material de absorver energia sob carga de impacto, fornecendo dados para avaliar sua tenacidade e comportamento em condições de serviço sujeitas a impactos (Burditt, 1993, p. 26).

Na Figura 4 são comparadas diferentes classes de ferro fundido nodular.

Figura 4 – Resistência ao impacto de diferentes classes de ferro fundido nodular



Fonte: Guesser (2019).

A maioria dos ferros fundidos nodulares apresenta coeficientes de expansão térmica ligeiramente maiores do que os do ferro fundido cinzento, porém menores em comparação com os do ferro fundido maleável e dos aços (Burditt, 1993, p. 27). Na Tabela 4 são demonstrados os valores de expansão de uma liga em ferro fundido nodular.

Tabela 4 - Coeficiente de expansão térmica *grade* 60-40-18 e 65-45-12

Temperatura (°C)	Coeficiente mínimo de expansão térmica (1/°C)
20-200	157,48 x 10 <sup>6</sup>
20-300	180,34 x 10 <sup>6</sup>
20-400	185,42 x 10 <sup>6</sup>
20-500	193 x 10 <sup>6</sup>
20-760	208 x 10 <sup>6</sup>
20- 871	216 x 10 <sup>6</sup>

Fonte: Adaptado de Burditt (1993).

A condutividade térmica dos ferros fundidos ferríticos é relatada como superior à dos ferros fundidos perlíticos. Essa distinção ressalta a variação nas propriedades térmicas entre diferentes microestruturas de ferros fundidos, indicando que a presença predominante de ferrita em ferros fundidos ferríticos contribui para uma maior eficiência na condução de calor em comparação com a estrutura perlítica dos ferros fundidos perlíticos (Burditt, 1993, p. 27).

Os ferros fundidos nodulares são caracterizados por terem resistividades elétricas mais baixas do que os ferros fundidos cinzentos. Os elementos primários que influenciam sua resistividade incluem o silício e o níquel (Burditt, 1993, p. 28).

### 2.1.2 Nióbio como elemento de liga de ferros fundidos

A tecnologia de fabricação de ferros fundidos tem experimentado avanços notáveis, impulsionados tanto por aprimoramentos nos processos de fabricação quanto por inovações nos materiais. Esse contínuo desenvolvimento, motivado por demandas específicas em diversas áreas de aplicação e pela busca por redução de custos, tem resultado na modernização de um material com uma longa tradição. A incorporação de Nb é particularmente crítica para componentes essenciais na indústria automobilística, como os eixos virabrequim, o que evidencia a constante evolução para atender às exigências crescentes de desempenho e durabilidade (Guesser; Guedes, 1997).

O nióbio é incorporado em ferros fundidos para diversas aplicações, como em anéis de segmento e camisas de cilindros em motores automotivos, corpos moedores e máquinas de jateamento na indústria de mineração de cimento, e discos de freios

de caminhões. Essa adição de nióbio resulta na formação de carbonetos que são eficazes em situações de desgaste e abrasão intensos (Júnior, 2008).

O nióbio apresenta baixa solubilidade tanto na austenita quanto na ferrita, o que propicia a ocorrência frequente da precipitação de fases contendo nióbio, especialmente a formação do carboneto de nióbio (NbC). Essa característica intrínseca do nióbio, ao limitar sua dissolução nas fases predominantes da microestrutura metálica, contribui para a presença marcante de compostos como o NbC, que determina as características microestruturais e, por conseguinte, as propriedades mecânicas do material. A compreensão da precipitação de fases ricas em Nb é importante para a otimização de ligas e processos de fabricação que visam melhorar o desempenho e a durabilidade de materiais em diversas aplicações industriais (Tenório, 1992, p. 10).

O Nb enfrenta desafios de metais como vanádio (V), titânio (Ti), molibdênio (Mo), tungstênio (W) e tântalo (Ta), os quais, seja de maneira isolada ou em combinações específicas, podem conferir propriedades ao produto que se assemelham àquelas alcançadas pelo Nb. Esses elementos, quando utilizados em diferentes proporções, são capazes de proporcionar características similares, desafiando a singularidade do Nb em determinadas aplicações. Assim, a escolha entre esses metais depende das exigências específicas de cada aplicação, que deve levar em consideração as propriedades desejadas e os requisitos técnicos do produto (Souza, 2012, p. 27).

### **2.1.3 Ferros fundidos com a incorporação de nióbio**

A incorporação de Nb em ligas ferrosas, como nas fundições de ferro fundido, geralmente é realizada por meio do uso de ferro-nióbio comercial fragmentado, que é um ferro-liga contendo cerca de 65 % de Nb, com Alumínio (Al), Ti e Si. Alternativas incluem o emprego de ferro-nióbio carburado em pó, nióbio metálico e briquetes exotérmicos que contêm ferro nióbio em pó, para os quais técnicas específicas de adição são aplicadas na incorporação do Nb em ligas ferrosas (Silva, 2000, apud Souza, 2012, p. 43).

Os carbonetos de Nióbio podem aparecer no ferro fundido tanto como carbonetos primários poligonais quanto como eutéticos, e ressalta, adicionalmente com outros autores, a importância do controle da morfologia desses carbonetos para

melhorar as propriedades mecânicas do material. A aglomeração e a formação de carbonetos grosseiros são consideradas indesejáveis, podendo ser evitadas por meio do controle da temperatura da liga, das condições de resfriamento, do tratamento de inoculação, da forma de adição e do tipo de ferro-nióbio empregado. Embora o ferro-nióbio seja uma forma de adição mais comum, também foram estudadas alternativas como o nióbio metálico, ferro-nióbio carburado em pó e briquetes exotérmicos com nióbio em pó (Silva, 2000, apud Souza, 2012, p. 46).

O ferro-nióbio apresenta uma dissolução mais lenta em ferros fundidos do que em aço, devido à temperatura mais baixa de produção e à menor solubilidade do carboneto de nióbio nesse tipo de liga. Além disso, em banhos com alto teor de carbono, forma-se uma camada de carbonetos de nióbio na superfície, o que dificulta sua incorporação à liga (Silva, 2000, apud Souza, 2012, p. 46).

Nylén (2007, p. 72) cita que a indústria automotiva, o nióbio é aplicado em componentes como cabeçotes de cilindros, anéis para pistões e discos de freio para caminhões. A capacidade do nióbio, comum aos elementos dos grupos 4 e 6 da tabela periódica, reside na formação de carbonetos duros, dispersos e estáveis, como o NbC, conferindo às aplicações resistência eficaz ao desgaste.

Nylén (2007, p. 77) aborda que ao adicionar uma quantidade significativa de nióbio a uma solução ferrosa líquida com elevado teor de carbono, ocorre a criação de partículas de NbC em temperaturas relativamente elevadas. As propriedades fundamentais do NbC estão detalhadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Algumas propriedades físicas do NbC

Propriedades físicas	Valores	Comentários
Densidade, g/cm <sup>3</sup>	7,6	7,82 g/cm <sup>3</sup> teórica
Microdureza Vickers	2400	
Estrutura cristalina	Cúbica	Estrutura do NaCl
Temperatura <i>liquidus</i> (°C)	3575	

Fonte: adaptado de Nylén (2007)

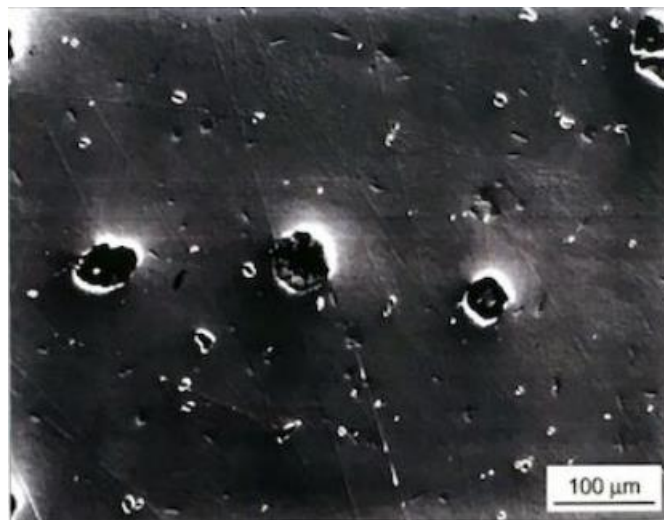
O NbC se destaca por possuir uma densidade próxima à do ferro líquido, conferindo-lhe uma dureza muito alta. Na sua forma típica, o NbC tende a se organizar em partículas dispersas que precipitam no ferro líquido, separando-se e não se integrando à solidificação eutética. Além disso, o nióbio apresenta uma solubilidade baixa na austenita, sem interferir de maneira significativa ou desfavoravelmente na

distribuição de carbonetos e grafita no ferro fundido. Em contrapartida, os carbonetos de outros elementos (Cr, V, Mo, W, Ti) apresentam propriedades consideravelmente distintas em relação ao nióbio, que abrangem diferenças em densidade, influência na distribuição de carbonetos e grafita, bem como solubilidade na austenita (Nylén, 2007, p. 74).

A introdução de nióbio em uma solução ferrosa com alto teor de carbono resulta na precipitação de partículas de NbC a temperaturas superiores à temperatura nominal de fusão da liga base. Esse fenômeno assemelha-se a uma dissolução rápida do ferro-nióbio e, por isso, é importante controlar esse processo para evitar aglomerações e a perda de NbC para as escórias do forno e da panela. Tal controle também é essencial para preservar o rendimento do nióbio adicionado e impedir prejuízos na eficácia do processo metalúrgico (Nylén, 2007, p. 74).

Na Figura 5 apresenta-se a microestrutura de um ferro fundido nodular com nióbio usado em cilindros de trabalho para laminação à quente.

Figura 5 - Ferro fundido nodular com adições de nióbio e mostrando pequenas e discretas partículas de NbC homogeneamente distribuídas.



Fonte: Nylén (2007).

Nylén (2007, p. 75) aborda que é fundamental implementar cuidadosos procedimentos de carregamento (seleção de materiais) e fusão (temperatura, tempos de fusão), juntamente com técnicas de fundição, a fim de garantir uma distribuição eficaz das partículas de NbC.

Em relação à fusão do ferro-nióbio (com 60 % de Nb), observa-se que seu ponto de fusão, situado em torno de 1500 °C – 1510 °C, é inferior à temperatura do ferro líquido. Assim, é possível fundir o ferro-nióbio no ferro líquido, o que resulta na formação de um soluto contendo nióbio. Conforme a temperatura do ferro líquido decresce, ocorre a combinação entre os solutos nióbio e carbono, o que dá origem ao composto NbC, que apresenta uma estrutura cúbica face centrada (Wang, et al., 2022, p. 4).

Wang *et al.* (2022, p. 1) mencionam que, de acordo com suas descobertas, o Nb tem o efeito de deteriorar a morfologia da grafita, reduzir a nodularidade e o número de nódulos, ao passo que exerce uma influência limitada no diâmetro da grafita.

Na microestrutura da matriz, a adição de Nb aumenta o teor de perlita, diminui o espaçamento lamelar da perlita e tem pouco efeito no diâmetro da ferrita (Wang, et al., 2022, p. 1).

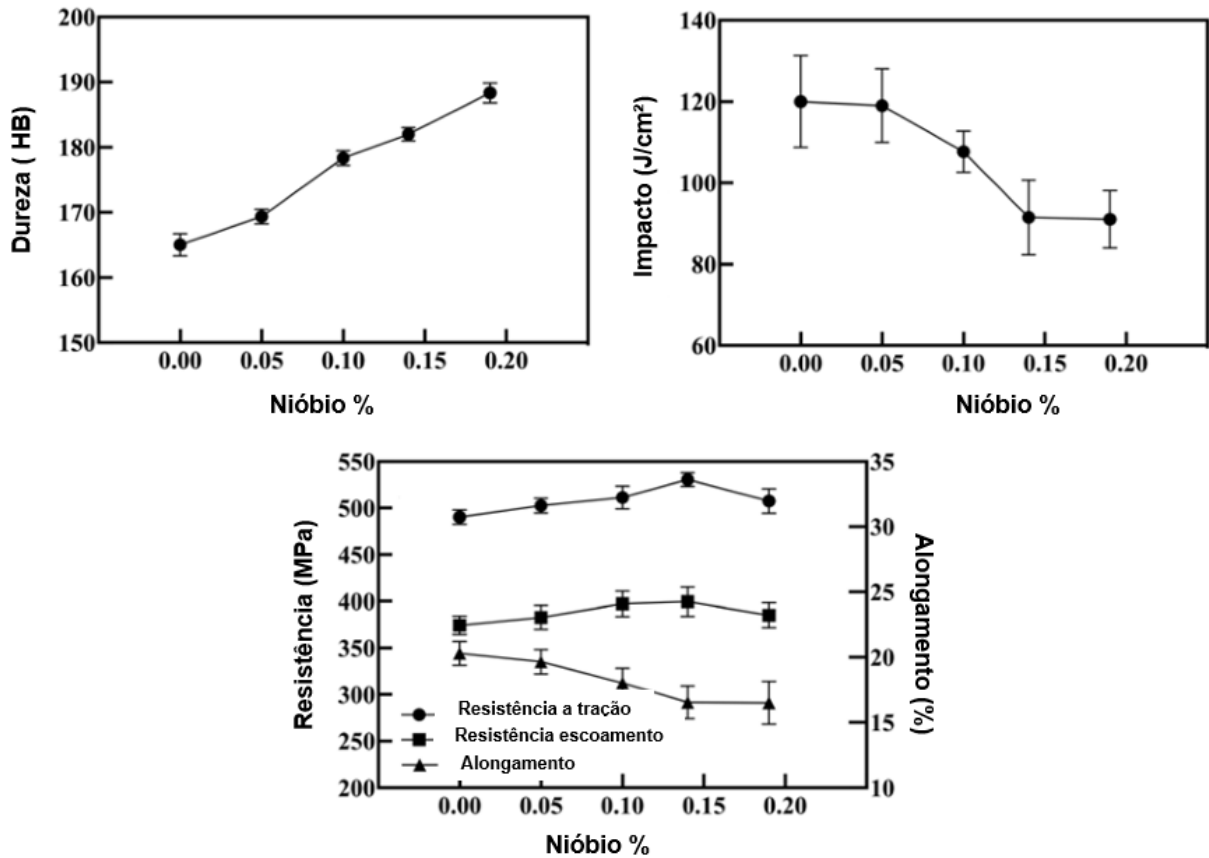
A adição de nióbio no ferro fundido nodular pode reduzir as contagens de nódulos, o que aumenta a distância de difusão do carbono. Por outro lado, a adição de nióbio diminui a temperatura da reação eutetóide, o que provoca uma redução na taxa de difusão do carbono (Wang, et al., 2022, p. 8).

#### **2.1.4 Propriedades mecânicas do ferro fundido com nióbio**

A adição de nióbio no ferro fundido dúctil aumenta a resistência mecânica e dureza, enquanto diminui a resistência ao impacto e o alongamento. O aumento da dureza e diminuição da tenacidade com a adição de Nb ao ferro fundido nodular é atribuído à formação de perlita e de NbC (Wang, et al., 2022, p. 8).

Na Figura 6 são demonstrados os resultados obtidos por Wang *et al.* (2022) em seu estudo.

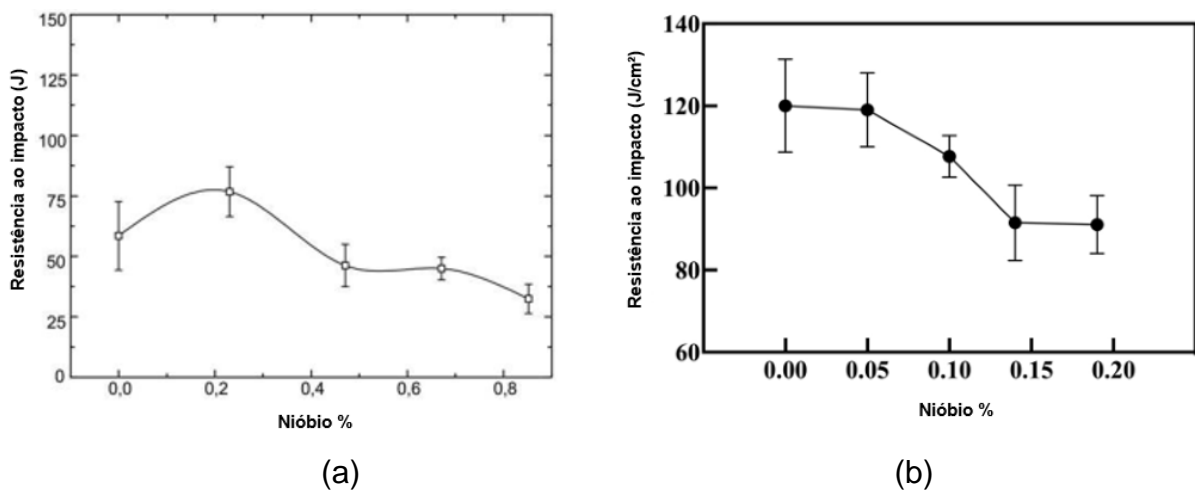
Figura 6 - Resultados de propriedades mecânicas com adição de Nb.



Fonte: Adaptado de Wang (2022).

Na Figura 7 (a) e 7 (b) são exibidos os resultados de resistência ao impacto nos estudos de Souza (2012) e Wang *et al* (2022) respectivamente.

Figura 7 – Resultados de resistência ao impacto.



Fonte: Adaptado de Souza (2012) (a) e Wang *et al* (2022) (b).

Nota-se no trabalho de Souza (2012), uma maior resistência ao impacto para a composição contendo 0,23 % de nióbio, seguida pela tendência de diminuição da resistência ao impacto com o aumento do teor de nióbio nos diferentes níveis analisados. Essa redução na energia absorvida em função dos maiores teores de nióbio parece estar associada à presença mais significativa de perlita, um constituinte menos tenaz em comparação com a ferrita, nos ferros fundidos com adição de nióbio (Souza, 2012, p. 117).

Souza (2012, p. 101), em sua pesquisa, evidenciou que o aumento do teor de nióbio resulta no aumento da fração de volume de perlita, ao mesmo tempo em que se observa uma redução no número de esferoides de grafita, ao passo que a proporção de ferrita varia inversamente em relação a essa alteração. Esse cenário se traduz em um aumento na resistência à tração, dureza e redução do alongamento.

No decorrer de sua pesquisa, Souza (2012, p. 92) notou que a análise do teor de nióbio nos ferros fundidos indicou que a granulometria do FeNb afeta o seu grau de dissolução com a mesma proporção adicionada no fundo de cada panela de vazamento. Nessas condições, a granulometria menor que 2 mm apresentou uma melhor dissolução, visto que o material particulado mais fino se caracteriza por ter maior área específica e, conseqüentemente, maior reatividade.

Experimentos conduzidos por Souza (2012, p. 62) revelaram que a adição direta de nióbio na panela de vazamento houve um ligeiro ganho de incorporação, quando comparada à adição no forno. Contudo, apesar da melhoria, o valor obtido ficou aquém do teor alvo, o que indica um rendimento inferior do ferro-liga adicionado, devido às dificuldades na incorporação.

Souza (2012, p. 93) adicionou FeNb diretamente no forno e elevou a temperatura até 1500 °C, na tentativa de aprimorar a dissolução. Mesmo com a temperatura mais elevada, foi necessário realizar uma agitação do ferro-liga sobre o banho metálico para otimizar a dissolução, por meio da geração de turbulência.

Na Tabela 6 são apresentados os valores obtidos no trabalho de Souza (2012, p. 94). Para essas condições foi avaliada influência do teor de Nb na microestrutura e nas propriedades mecânicas, conforme resumido a seguir.

Tabela 6 - Composição química com e sem Nióbio ( % em massa)

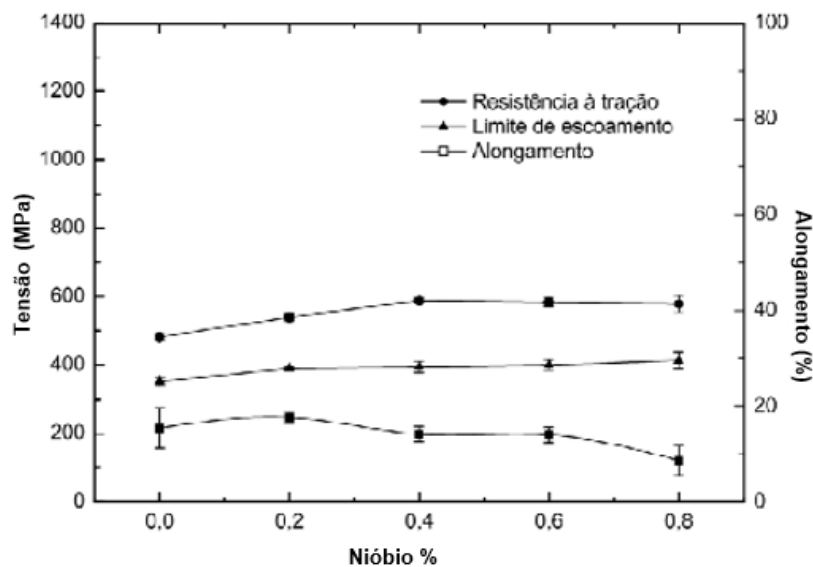
C %	Si%	Mn%	P%	S%	Mg%	Nb%	Fe%
3,74	2,67	0,23	0,096	0,013	0,038	0,001	restante
3,39	2,76	0,24	0,101	0,016	0,04	0,23	restante
3,63	2,64	0,25	0,092	0,009	0,039	0,471	restante
3,64	2,62	0,23	0,089	0,009	0,037	0,671	restante
3,32	2,57	0,23	0,085	0,008	0,034	0,852	restante

Fonte: Adaptado de Souza (2012).

A introdução de nióbio não compromete o processo de obtenção de ferro fundido nodular, conforme evidenciado pela presença de grafita esferoidal e matriz ferrítica-perlítica, independentemente da concentração desse elemento (Souza, 2012, p. 99). No ANEXO D são demonstrados mais detalhadamente os resultados obtidos pela autora.

Os resultados obtidos indicam que o teor de nióbio exerce influência significativa na resistência à tração, alongamento e limite de escoamento do ferro nodular. Verifica-se que a adição de nióbio resulta em um aumento tanto no limite de escoamento quanto na resistência à tração do ferro fundido nodular. Em linhas gerais, constata-se que a magnitude do teor de nióbio está positivamente correlacionada com os valores do limite de escoamento e de resistência à tração (Souza, 2012, p. 104). Na Figura 8 são exibidos os resultados do ensaio de tração do estudo dessa autora.

Figura 8 - Resultados de ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de Souza (2012).

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios obtidos por Souza em seu trabalho.

Tabela 7 – Valores médios obtidos com adição de nióbio

% nióbio	Resistência a tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Grau de nodularização (%)	Número de Esferoides/ mm <sup>2</sup>
0	481	353	15	91	412
0,23	594	392	17	80	278
0,47	589	392	14	85-90	170
0,67	589	402	14	85-90	150
0,85	579	412	8	85-90	160

Fonte: Adaptado de Souza (2012).

De acordo com Haicheng *et al.* (2015, p. 1) em seus experimentos com adições de nióbio abaixo de 0,1 % observou-se que com o incremento na quantidade de nióbio, ocorreu um aumento na dispersão do diâmetro da grafita, na média do diâmetro e na circularidade, ao passo que o número de nódulos diminuiu levemente.

De acordo com Ahmed *et al.* (2021, p. 1) em análise metalográfica, é possível inferir que a introdução de uma concentração de nióbio de 0,1 % na liga resultou em um incremento no número de células eutéticas e em um refinamento da perlita. Adicionalmente, houve um leve aumento na contagem de nódulos, porém observou-se uma diminuição na nodularidade conforme a quantidade de nióbio aumentava.

A adição de nióbio ocorreu previamente ao processo de vazamento, utilizando-se uma granulometria de 1-3 mm. Esta medida foi adotada com o propósito de prevenir a formação de pequenos fragmentos de FeNb nas peças fundidas. Isso se deve ao fato de que o nióbio possui um alto ponto de fusão, tanto no *solidus* quanto no *liquidus*, e apresenta uma elevada afinidade com o carbono, resultando na formação de carbonetos de nióbio em altas temperaturas, os quais podem segregar-se no material fundido ou até mesmo se combinar com a escória (Ahmed *et al.*, 2021, p. 3).

De acordo com Ahmed *et al.* (2021, p. 20), as partículas nanométricas de NbC foram observados na liga com 0,05 % de nióbio. Ao aumentar o teor de nióbio para 0,1%, constatou-se um aumento tanto no tamanho quanto na fração volumétrica das referidas partículas de NbC.

A composição química estudada por Ahmed *et al.* (2021, p. 5) é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Composição química ( % em massa)

<b>Amostra</b>	<b>% C</b>	<b>% Si</b>	<b>% Mn</b>	<b>% Ni</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Nb</b>	<b>% Al</b>	<b>% Ti</b>	<b>% Ce</b>	<b>% P</b>	<b>% S</b>	<b>% Mg</b>	<b>Fe</b>
DI-1	3,62	2,69	0,13	0,75	0,49	0	0,01	0,004	0,02	0,014	0,014	0,039	Bal
DI-2	3,59	2,65	0,12	0,89	0,45	0,05	0,01	0,006	0,02	0,018	0,013	0,041	Bal
DI-3	3,48	2,63	0,11	0,85	0,44	0,1	0,01	0,005	0,02	0,019	0,014	0,049	Bal

Fonte: Adaptado de Ahmed *et al* (2021)

De acordo com Rivera *et al.* (2016, p. 7), as suas análises não revelaram um efeito substancial do teor de nióbio na contagem de nódulos, nodularidade e refinamento de perlita. No entanto, observou-se uma diminuição na proporção de ferrita, que passou de 76 % para 64 %, enquanto a quantidade de perlita aumentou de 6 % para 15 %. Além disso, houve um aumento nas propriedades de resistência ao escoamento, resistência à tração e dureza do material, ao mesmo tempo em que foi registrada uma redução na sua capacidade de alongamento. A composição química é apresentada na Tabela 9.

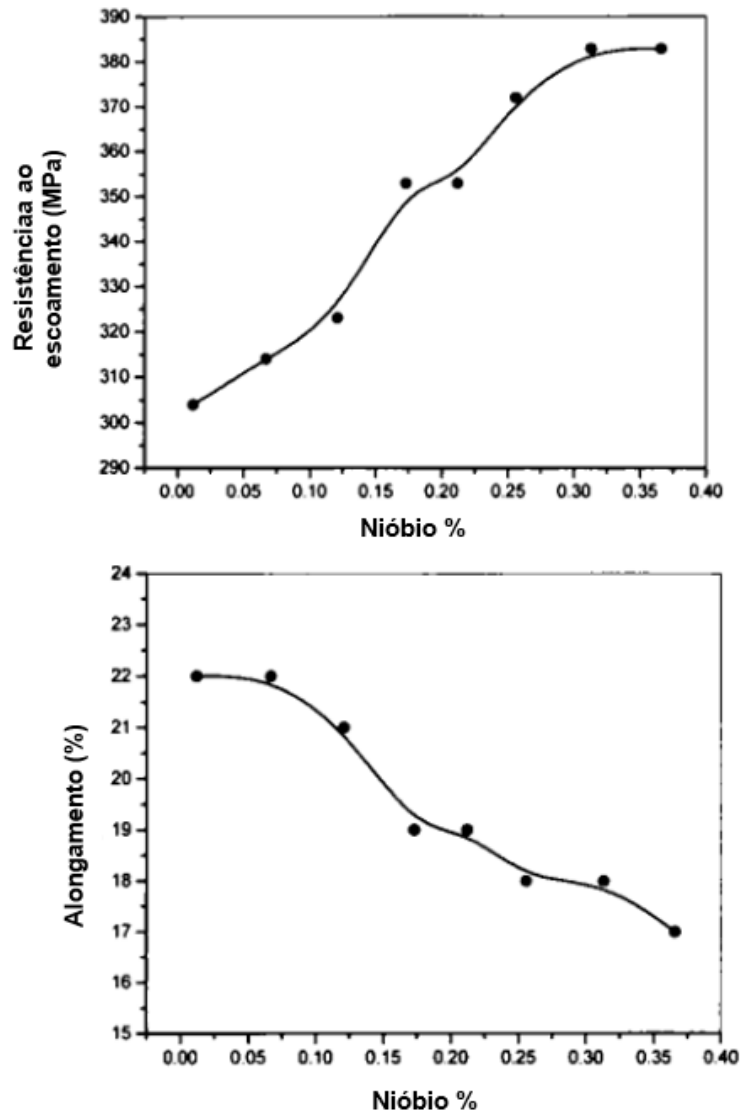
Tabela 9 – Composição química ( % em massa)

<b>Amostra</b>	<b>% C</b>	<b>% Si</b>	<b>% P</b>	<b>% S</b>	<b>% Nb</b>
1	3,58	2,3	0,027	0,017	0,012
2	3,6	2,4	0,020	0,018	0,067
3	3,64	2,41	0,020	0,016	0,121
4	3,6	2,48	0,021	0,016	0,173
5	3,51	2,38	0,019	0,019	0,212
6	3,41	2,40	0,021	0,014	0,256
7	3,51	2,44	0,021	0,013	0,313
8	3,59	2,38	0,02	0,014	0,366

Fonte: Adaptado de Rivera (2016).

Na Figura 9 são demonstrados os valores de propriedades mecânicas obtidos nos estudos de Rivera.

Figura 9 - Resultados de ensaios mecânicos de ligas com adição de Nb



Fonte: Adaptado de Rivera (2016).

De acordo com Souza *et al.* (2014, p. 3), suas pesquisas mostram que a partir da análise dos corpos de prova, foi constatado que o aumento do teor de nióbio resulta em um incremento na fração volumétrica da perlita, refletindo em aumentos nos valores de resistência ao escoamento, resistência à tração e dureza. Além disso, observou-se que a adição de nióbio até 0,7 % favorece o aumento da quantidade de perlita, porém, acima desse valor, especificamente em 0,8 % de nióbio, ocorre uma queda nesse aspecto.

Segundo a análise realizada, o nióbio foi introduzido na granulometria variando entre 3 a 6 mm e em temperaturas de 1360 °C, sendo o processo conduzido com agitação manual intensa (Souza *et al.* 2014, p. 2).

De acordo com a análise conduzida, a fração volumétrica de carbonetos permaneceu relativamente estável em níveis abaixo de 1 %, até aproximadamente 0,4 % de nióbio. Em seguida, aumentou para 5,3 % com teores de nióbio em torno de 0,6 %, para então diminuir novamente para 1,1 % com a adição de 0,8 % de nióbio. Esse fenômeno, conforme indicado no estudo, é atribuído à formação de outros tipos de carbonetos (Souza *et al.* 2014, p. 2).

A incorporação de carbonetos de nióbio em ferro fundido nodular, utilizado na fabricação de anéis de pistão, melhora a resistência ao desgaste ao permitir a precipitação de carbonetos a partir do estado líquido, sem a necessidade de alterar os parâmetros de tratamento térmico comparado a ligas sem nióbio. Essa adição resulta em uma redução do desgaste devido ao bloqueio do processo de riscamento, o que foi confirmado por medidas que indicaram um aumento de 20 % na vida útil dos anéis, para matrizes martensíticas com o mesmo nível de dureza (Vatavuk; Villar, 2002, p. 1).

A afinidade do nióbio pelo carbono facilita a formação de carbonetos NbC bem distribuídos e com morfologia compacta, o que é benéfico para aumentar a resistência ao desgaste de ferros fundidos nodulares. Este elemento de liga é amplamente utilizado para melhorar a resistência ao desgaste, especialmente em anéis de óleo para aplicações veiculares (Vatavuk; Villar, 2002, p. 14).

Em sua pesquisa, Pereira *et al* (2006, p. 5;6;7) sobre a adição de nióbio em concentrações de 0,2 %, 0,4 %, 0,6 %, 0,8 % e 1,0 % revelaram que as amostras com nióbio possuem matriz predominantemente perlítica com teores residuais de ferrita, sendo observada uma tendência à diminuição do número de nódulos com o aumento do teor de nióbio, atingindo um mínimo de 95 nódulos/mm<sup>2</sup> na amostra com 0,6 % de nióbio. Para teores mais elevados de nióbio, de 0,8 % e 1 %, houve uma leve tendência ao aumento do número de nódulos na matriz e o grau de nodularização das ligas variou entre 89 % e 95 %.

Entre as amostras com adição de nióbio, aquelas com 0,6 % e 1,0 % apresentaram frações volumétricas de ferrita mais elevadas, sendo 8 % e 6 %, respectivamente. A amostra com 0,6 % de nióbio teve esse resultado devido ao baixo carbono equivalente (CE = 4,19), enquanto na amostra com 1,0 % de nióbio, a maior

fração de ferrita foi atribuída ao maior número de nódulos. Com o aumento do teor de nióbio, a fração volumétrica de partículas de Nb(C, N) também aumentou, atingindo cerca de 1 % na amostra com 1,0 %. Geralmente, a resistência mecânica tende a diminuir com teores crescentes de nióbio, exceto nas amostras com 0,2 % e 0,4 % de nióbio, que apresentaram maior resistência devido às frações de perlita e ao efeito endurecedor das partículas de Nb(C, N) finas e homogêneas. A resistência das amostras com 0,6 % de nióbio foi similar à do ferro base devido à alta fração de ferrita, e entre 0,6 % e 1,0 % houve um ligeiro aumento na resistência, mas ainda inferior à resistência das amostras com até 0,4 % de nióbio. Nas amostras com 0,8 % e 1,0 %, a distribuição heterogênea e a maior dimensão das partículas de Nb(C, N) causaram uma redução na resistência (Pereira *et al*, 2006, p. 7).

A adição crescente de nióbio resulta em redução da ductilidade e aumento da dureza das ligas. Uma exceção é a amostra com 0,6 % de nióbio, que apresenta um alongamento próximo a 7 % devido à maior fração de ferrita. Já a amostra com 1,0 % de nióbio, embora também contenha uma elevada fração de ferrita, possui o menor alongamento, atribuído à alta fração de partículas de Nb(C, N). A dureza das ligas variou entre 222 e 239 HB, mostrando um aumento geral com a adição de nióbio. As propriedades de impacto das ligas diminuem com a adição de nióbio, com uma redução de aproximadamente 40 % na energia de impacto absorvida para 0,2 % de nióbio, e uma redução de cerca de 55 % para a liga com 1,0 % de nióbio em comparação ao ferro base (Pereira *et al*, 2006, p. 9).

Na Tabela 10 são apresentados os valores obtidos no estudo de Pereira *et al* (2006).

Tabela 10 - Resultados de ensaios mecânicos

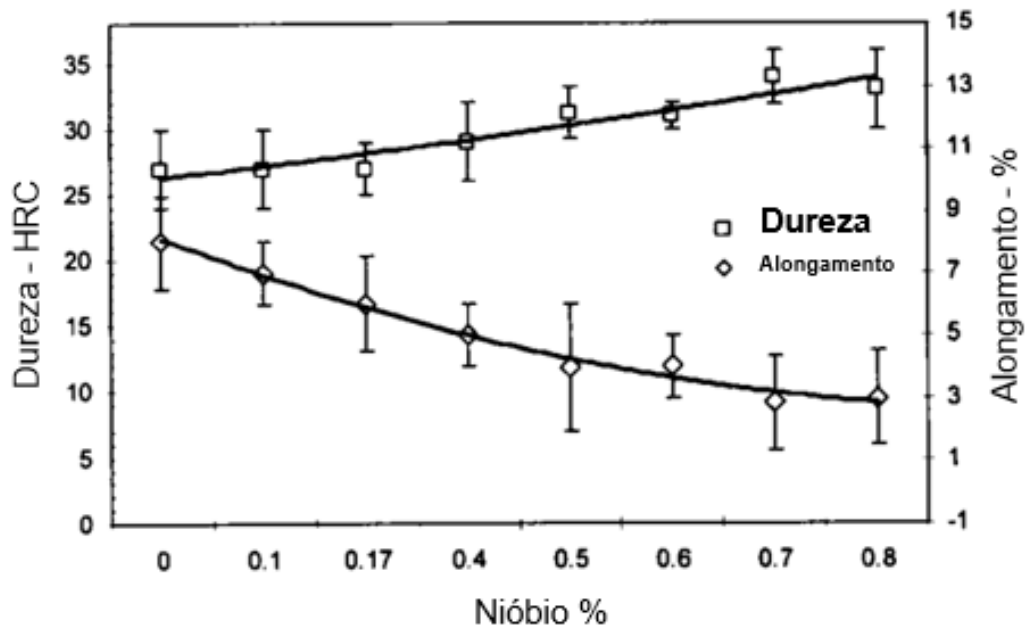
% Nb	LRT (MPa)	LE (MPa)	A (%)	Dureza Brinell (HB)	Impacto (J)
Ferro base	732	421	7,9	222	49
0,2	779	444	6,2	222	28
0,4	780	456	5,8	229	34
0,6	738	447	6,8	229	25
0,8	752	438	5,3	229	23
1,0	765	456	5,2	239	23

Fonte: Adaptado de Pereira (2006).

Estudos realizados relataram que a adição de até 0,8 % de nióbio aumenta a resistência à tração dos ferros fundidos nodulares. Esse aumento é atribuído ao refinamento da estrutura devido à formação de austenita-Nb(C, N) eutéticas antes da formação de austenita-grafita, à presença de partículas duras de Nb(C, N) distribuídas

de forma homogênea e ao aumento da fração de perlita na matriz das ligas (Bedolla-Jacuinde; Solis; Hernandez, 2003, p. 8). Na Figura 10 são demonstrados os valores obtidos no estudo dos citados autores.

Figura 10 - Valores de perlita e ferrita



Fonte: Adaptado de Bedolla-Jacuinde; Solis; Hernandez (2003).

O níbio, quando adicionado a ligas, tem uma alta afinidade pelo carbono e forma carbonetos do tipo NbC. Mesmo em concentrações baixas, esses carbonetos são encontrados e ajudam a fortalecer a matriz das ligas. Isso resulta em aumento de dureza, resistência à tração, com um impacto significativo na resistência ao desgaste. (Bedolla-Jacuinde, 2016, p. 187).

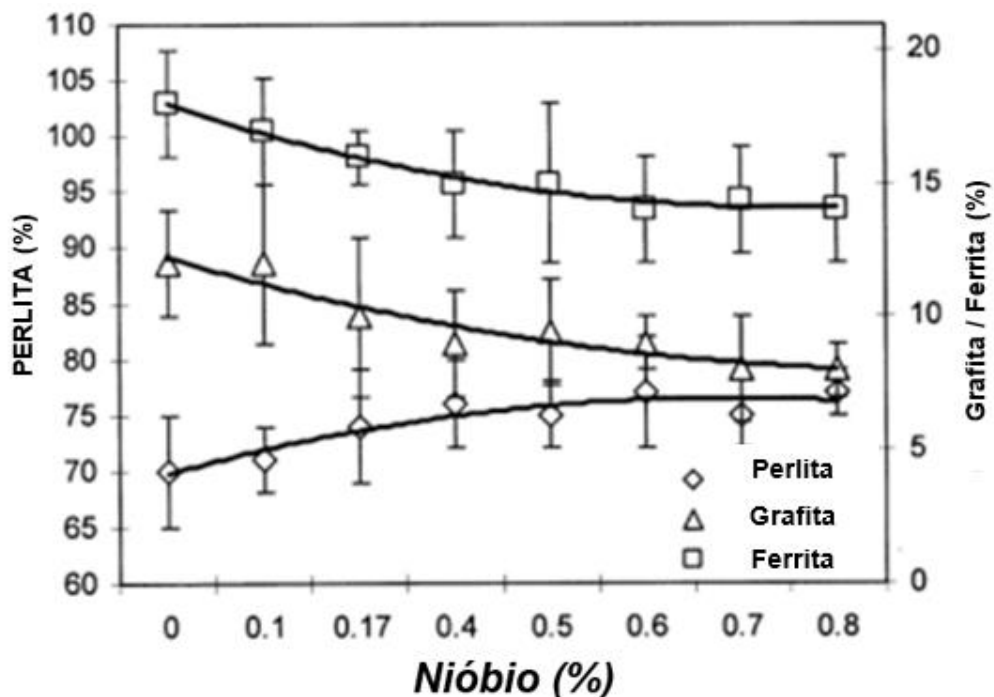
A adição de níbio ao ferro fundido líquido com alto teor de carbono causa a precipitação de carbonetos de níbio sólidos antes da solidificação da liga. Essa precipitação pode levar à segregação e aglomeração dessas partículas, que podem ser removidas se incorporadas à escória. Portanto, recomenda-se adicionar o níbio nas etapas finais do processo de fusão para evitar esses problemas (Bedolla-Jacuinde, 2016, p. 198).

A adição de níbio ajuda a refinar o tamanho dos grãos de austenita durante a solidificação devido à formação de carbonetos de níbio, que retardam o crescimento dos grãos de austenita. Esses carbonetos, formados em altas temperaturas, podem atuar como núcleos para a precipitação de austenita proeutética e possivelmente de

colônias eutéticas. O nióbio aumenta a fração de volume da austenita eutética, pois reduz a quantidade de carbono que precipita como grafite durante a solidificação eutética. Entretanto, outros elementos da liga, como silício e fósforo, também influenciam o teor de carbono eutético, alterando a quantidade de austenita proeutética (Bedolla-Jacuinde, 2016, p. 199).

A presença de nióbio no ferro fundido aumenta a quantidade de perlita na matriz e a uma diminuição na fração de volume de grafite. Embora a maior parte do nióbio forme NbC, uma pequena quantidade dissolve-se na matriz, promovendo a formação de perlita. Como os carbonetos de nióbio se formam antes da solidificação eutética, eles consomem parte do carbono disponível para a formação de nódulos de grafite, resultando em uma redução do volume de grafite após a solidificação eutética (Bedolla-Jacuinde, 2016, p. 200). Na figura 11 são ilustrados os percentuais de perlita, ferrita e grafita obtidos pelo autor em seu trabalho.

Figura 11 – Resultados percentuais de microestruturas conforme teor de Nb.



Fonte: Adaptado de Bedolla-Jacuinde(2016).

Estudos com adições de 0,5 % e 2 % de nióbio em peso mostraram um aumento na resistência à tração, atribuído à formação de carbonetos de nióbio e uma perlita mais fina. Além disso, observou-se um aumento na resistência ao impacto e na dureza. As conclusões indicam que o nióbio promove uma estrutura de perlita lamelar

e ferrita com carbonetos de nióbio poligonais, em vez da formação de nódulos de grafite cercados por ferrita e perlita. Assim, uma maior porcentagem de nióbio resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas, como resistência mecânica, impacto e dureza. (Alias *et al.* 2012, p. 4). Na Tabela 11 é demonstrado o resultado de composição química obtido por Alias *et al.*

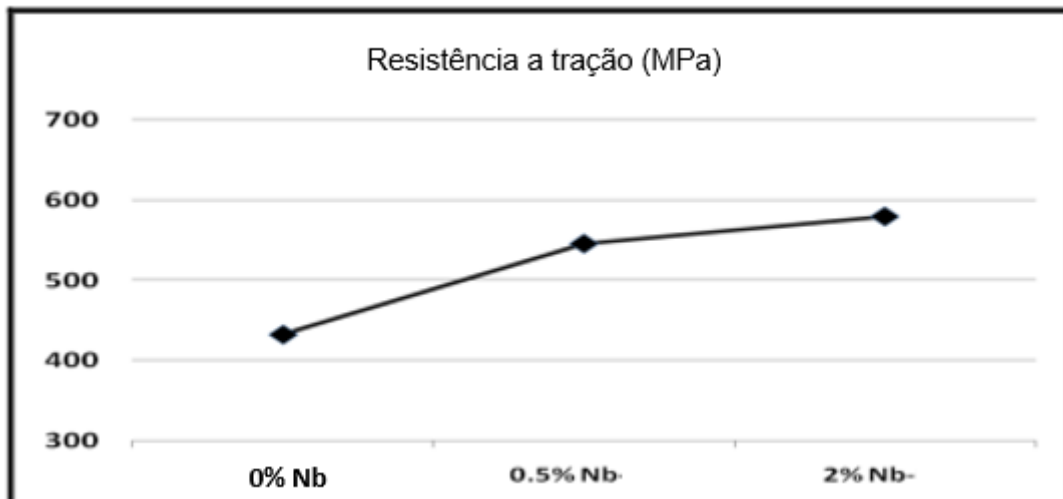
Tabela 11 – Resultados de composição química (% em massa)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	Fe
0% Nb	3,04	1,7	0,48	0,024	0,007	0,013	0,014	0,013	0	93,6
0,5 Nb	3,15	1,85	0,418	0,061	0,015	0,59	0,54	0,014	0,5	94,8
2% Nb	3,24	1,93	0,396	0,068	0,016	0,58	0,54	0,54	0,11	94,3

Fonte: Adaptado de Alias *et al* (2012).

Na Figura 12, são apresentados os resultados de resistência à tração, onde se observa que maiores adições de nióbio tendem a aumentar os valores obtidos nesse ensaio.

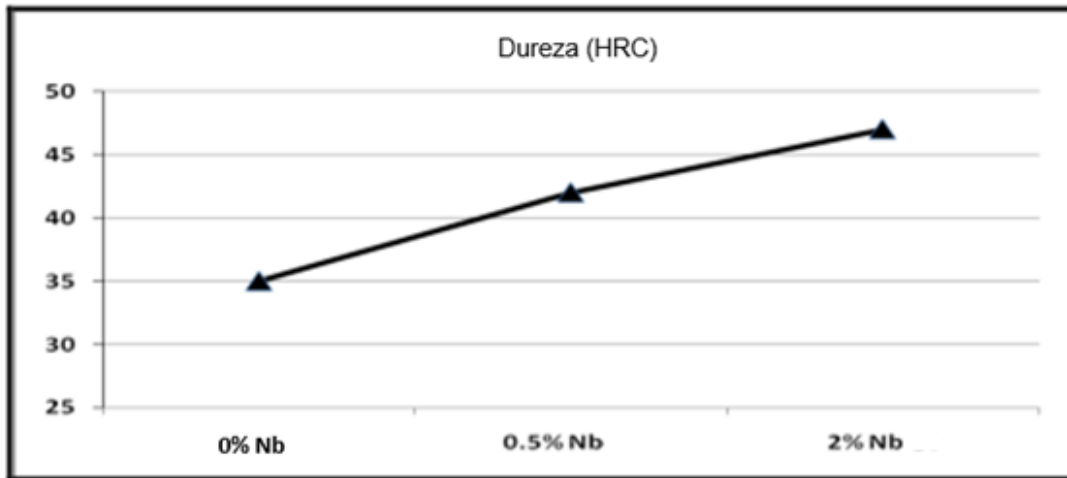
Figura 12 – Resultados de Resistência a tração



Fonte: Adaptado de Alias *et al* (2012).

Na Figura 13, são apresentados os resultados de dureza, onde se observa que maiores adições de nióbio tendem a aumentar os valores obtidos nesse ensaio.

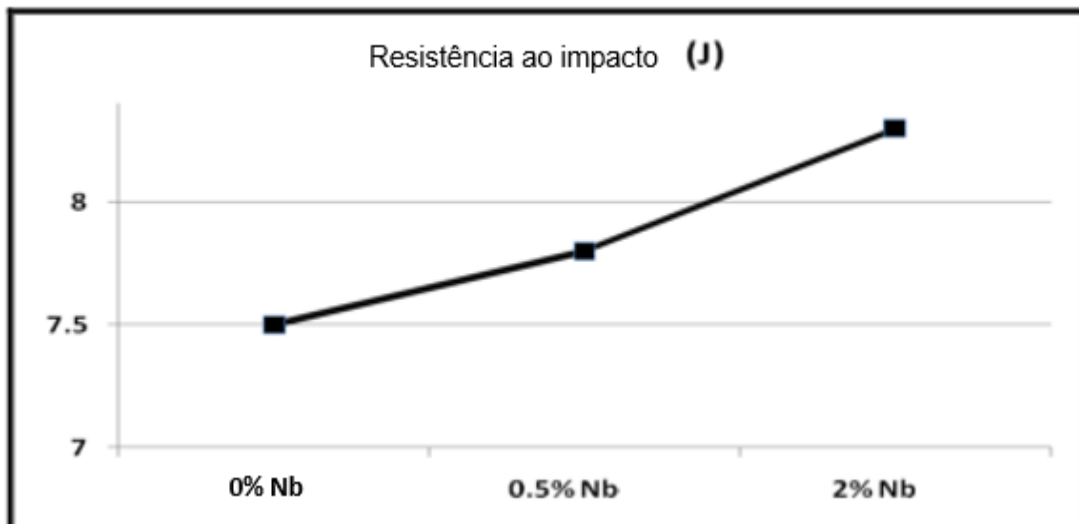
Figura 13 – Resultado de dureza



Fonte: Adaptado de Alias *et al.* (2012).

Na Figura 14, são apresentados os resultados de resistência ao impacto, onde se observa que maiores adições de nióbio tendem a aumentar os valores obtidos nesse ensaio.

Figura 14 – Resultado resistência ao impacto

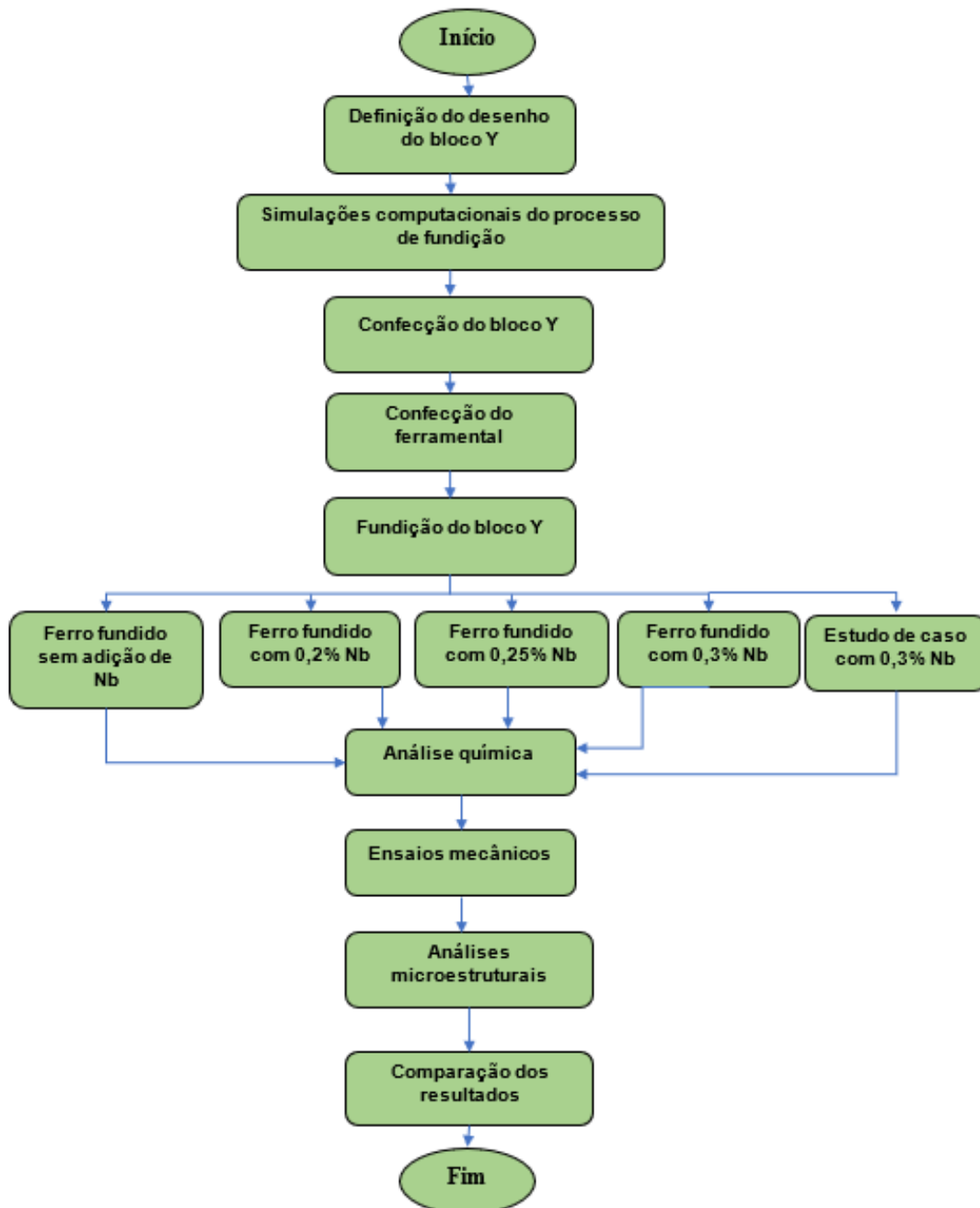


Fonte: Adaptado de Alias *et al.* (2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são descritas as etapas experimentais essenciais para alcançar o objetivo deste trabalho, focado na produção e caracterização do ferro fundido dúctil bruto de fusão GGG50 com adição de diferentes teores de nióbio. Essas etapas experimentais são indicadas no fluxograma apresentado na Figura 15.

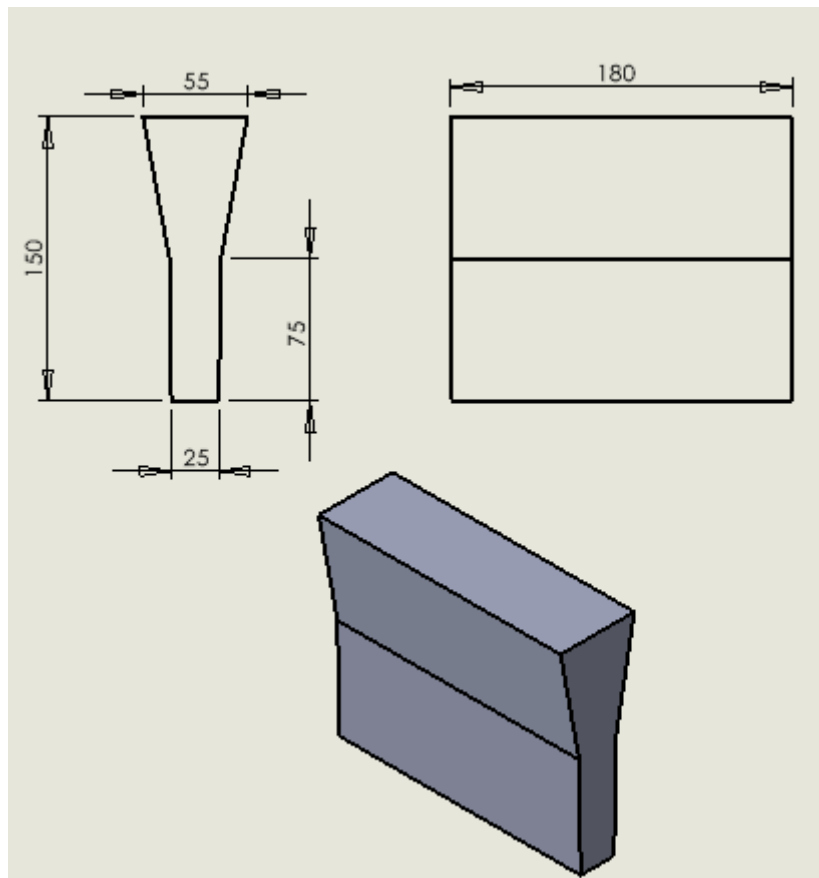
Figura 15 – Fluxograma das etapas experimentais do trabalho



### 3.1 MATERIAIS

Para determinar as propriedades mecânicas de tração da liga base GGG50, com e sem incorporação de Nb, foram produzidos blocos Y, com geometria e dimensões, em milímetros, recomendadas pela norma ASTM A 897/A897M-06, conforme imagem da Figura 16.

Figura 16 – Dimensões do bloco Y ( Dimensões em mm)

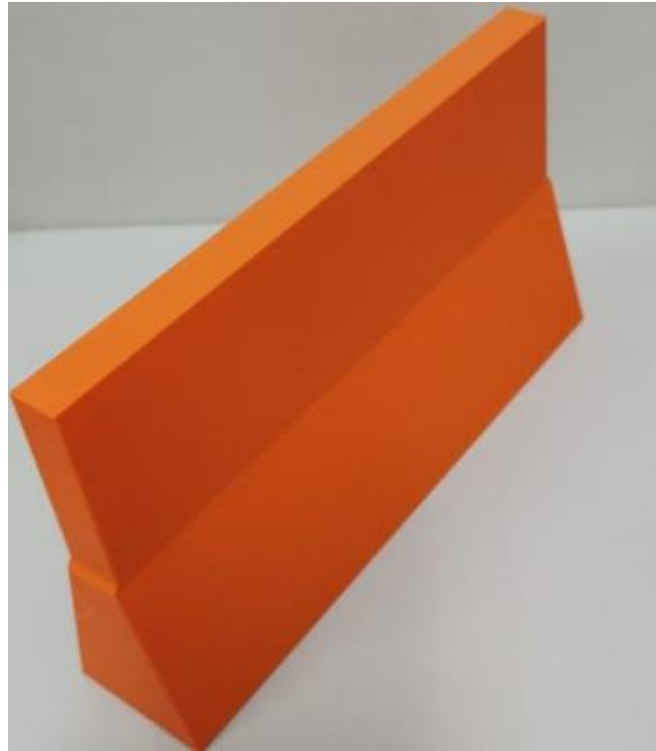


Fonte: Adaptado de ASTM A 897/ A897M-06.

Inicialmente, o bloco Y foi desenhado por meio da modelagem 3D com o auxílio do software CAD Solidworks®<sup>1</sup> versão 2022 e, em seguida, foram produzidos utilizando uma impressora 3D, da marca Wishbox, modelo Ultimaker 2 com precisão de 0,2 micrometros (Figura 17).

<sup>1</sup> SolidWorks é marca registrada da Dassault Systèmes.

Figura 17 – Modelo impresso do bloco Y



Fonte: O autor (2023).

A modelagem 3D do bloco Y foi prosseguida por várias etapas essenciais para a fabricação por fundição, que incluíram: a confecção do ferramental, moldagem, fusão, nodularização e inoculação das ligas e desmoldagem. Essas etapas foram executadas na empresa Rio (Metalúrgica Riosulense S.A.)

Durante o processo de fabricação dos modelos, foi desenvolvido um ferramental composto por seis cavidades (Figura 18), com um espaçamento de 60 mm no eixo X e 20 mm no eixo Y, entre os modelos. Adicionalmente, foi estabelecido um espaçamento de 100 mm nas quatro laterais, com o intuito de prevenir vazamentos na divisão do modelo e garantir a resistência adequada do molde, o que evitaria desmoldagens prematuras.

Devido à baixa produção, os modelos de fundição foram produzidos em resina, enquanto as placas, canais de alimentação foram executadas em madeira de cedro, conforme a imagem da Figura 18.

Figura 18 – Modelo com 6 cavidades



Fonte: O autor (2023).

No processo de moldagem, foi utilizado o método de cura a frio, em que foi utilizada areia de sílica revestida com resina fenólica uretânica. A escolha desse método se baseou na necessidade de garantir que o molde fosse rígido, o que evitaria variações dimensionais e potenciais defeitos de contração que poderiam prejudicar as propriedades mecânicas das peças. Isso assegurou a precisão e a qualidade das peças produzidas e a sua qualidade para as avaliações subsequentes das propriedades mecânicas. Para a fabricação dos moldes de areia foi utilizado um misturador contínuo da marca MSP, modelo HST-20.

Para a fusão das ligas GGG50 (liga base e com adições de Nb), foi utilizado ferro gusa, sucata de aço, FeSi 75%, grafite carburante, sucata de cobre picotada, retorno de GGG50 e FeNb. A composição química de cada um desses materiais está detalhada na Tabela 12.

A composição do retorno de GGG50 e da sucata de aço foi analisada utilizando um espectrômetro ótico marca AMETEK, modelo SPECTROMAX, enquanto os demais elementos foram avaliados com base em seus certificados correspondentes e são demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Porcentagem de materiais e elementos utilizados na carga metálica  
( % em massa)

Material	% C	% Si	% Mn	% Cu	% P	% S	% Mg	% Al	% Nb
Gusa	4,266	0,61	0,041	-	0,0869	0,012	-	-	-
Sucata Aço	0,12	0,09	0,43		0,011	0,02			
FeSi 75%	0,09	75,4			0,012	0,018		0,68	
Grafite Carburante	99,66					0,44			
Sucata cobre picotado			0,0005	99,02	0,046				
Retorno GGG50	3,5	2,4	0,32	0,35	0,04	0,014	0,045	-	-
FeNb	0,158	2,76	-		0,186	0,06		1,83	64,478

Material	% Cinzas	% Material volátil	Umidade	N(ppm)	Ca	Pb	Sn	Granulometria
Gusa	-	-	-	-	-	-	-	-
Sucata Aço								
FeSi 75%					0,61			
Grafite Carburante	0,21	0,13	0,26	2200				
Sucata de cobre picotada						0,0369	0,007	
Retorno GGG50	0,045	-	-	-	-	-	-	-
FeNb								10x50 mm

Fonte: O autor (2023).

A quantidade em massa e porcentagens dos materiais da carga utilizada para a produção são mostradas na Tabela 13.

Tabela 13 – Carga utilizada na fusão

Material	Quantidade (kg)	%
Gusa	200	32,5 %
Sucata Aço	350	56,8 %
FeSi 75%	8	1,3 %
Grafite Carburante	5	0,8 %
Sucata de cobre picotada	8	1,3 %
Retorno GGG50	40	6,5 %
FeNb	5	0,8 %
<b>Total</b>	<b>616</b>	<b>100 %</b>

Fonte : O autor (2023)

A Tabela 14 demonstra a liga GGG50, na qual o Nb foi incorporado.

Tabela 14 – Composição química da liga base GGG50 (% em massa)

% C	% Si	% Mn	% Cu	% P	% S	% Mg	% Al
3,4-3,5	2,3-2,4	0,3-0,4	0,4-,05	0-0,04	0,08-0,012	0,04-0,05	0,02-0,08

Fonte: O autor (2023).

O tratamento do metal líquido após a fusão foi realizado com inoculante e nodularizante FeSiMg, cuja composição química é indicada na Tabela 15. Foi utilizada uma panela de 500 kg para nodularização.

Tabela 15 – Composição dos ferros liga (% em massa)

Material	% Si	% Mg	% TR	% Ba	% Zr	% Mn	% Al	% Ca
FeSiMg	43,27	6,71	0,96				0,86	1,26
Inoculante	62,4			0,54	3,5	3,59	1,19	1,4

Fonte: O autor (2023).

A distribuição granulométrica da liga FeSiMg indica que 3,6 % fica retido na peneira de 12,7 mm, 92,2 % na peneira de 6,35 mm, enquanto o restante é encontrado no fundo. Quanto ao inoculante, sua granulometria é inferior a 3 mm.

Para se obter o ferro fundido nodular GGG50 com adição de Nb, foi utilizado o FeNb com diferentes granulometrias. Na fusão com adição de 0,18 % de Nb, optou-se por empregar a granulometria do FeNb, conforme fornecido pelo fabricante, com dimensões de (10x50) mm. A composição química do FeNb é exibida na Tabela 16, conforme especificado em certificado (ANEXO A).

Tabela 16 – Composição química do FeNb (% em massa)

% Nb	% Si	% P	% C	% S	% Al
64,78	2,76	0,186	0,158	0,06	1,83

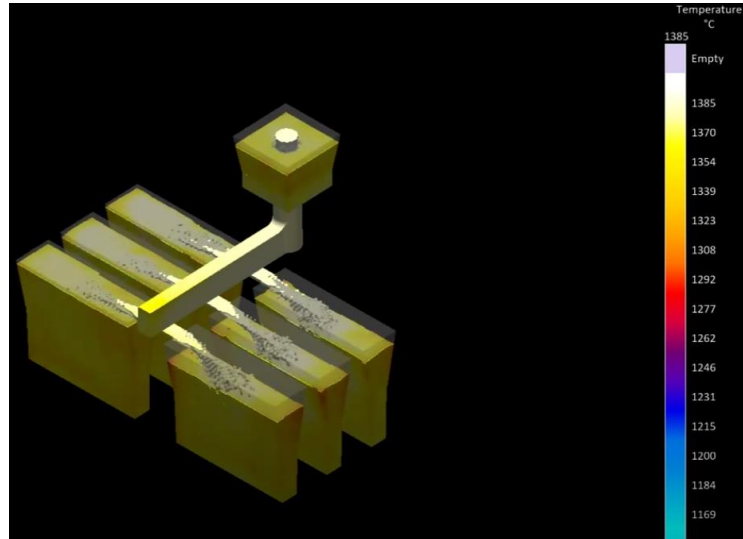
Fonte: adaptado de SaintSteel (2023).

Nas fusões com adições de 0,25 % e 0,34 % de Nb, optou-se por uma granulometria inferior a 8 mm, buscando dissolução mais eficaz do material.

### 3.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Para avaliar o processo de enchimento e solidificação do metal e identificar potenciais falhas recorrentes que possam afetar negativamente os ensaios mecânicos, foram realizadas simulações computacionais para modelar o processo de fundição, para isso foi empregado o software MAGMASOFT® 6.0<sup>2</sup>. Essa escolha estratégica visa a qualidade e integridade do resultado, minimizando riscos de defeitos prejudiciais. O software MAGMASOFT® 6.0 desempenha um papel fundamental ao proporcionar valiosos resultados sobre o comportamento do metal durante o processo de fundição, permitindo assim otimizar as condições de produção e prevenir problemas antes que ocorram. Dessa forma, esta abordagem computacional buscou assegurar que os blocos Y fossem produzidos com máxima qualidade e confiabilidade, o que asseguraria resultados de ensaios mecânicos mais precisos e representativos. Na Figura 19, é exibida a simulação de temperatura de enchimento do metal.

Figura 19 – Temperatura de enchimento do MAGMASOFT®



Fonte: O autor (2023).

### 3.3 CONFECÇÃO DO FERRAMENTAL

Para a fabricação do modelo de fundição do bloco Y, foi criado um molde com 6 cavidades, com um sistema de alimentação integrado em molde de areia. Essa

<sup>2</sup> MAGMASOFT® é marca registrada de empresa MAGMA Giessereitechnologie GmbH.

escolha foi feita com o objetivo de minimizar a influência de variáveis externas no processo de resfriamento. Isso é particularmente importante, porque os blocos Y utilizados na produção são moldados como peças únicas, sem a presença de canais de alimentação.

Essa abordagem permite um controle mais preciso das condições de solidificação e resfriamento durante o processo de fundição. Também, assegura que cada cavidade do molde seja preenchida de maneira uniforme e que as propriedades do material sejam consistentes em todas as seis peças produzidas simultaneamente. Ao se eliminarem as variáveis externas de resfriamento, garante-se que os blocos Y atendam aos padrões de qualidade desejados.

### 3.4 MOLDAGEM

Durante a fase de moldagem, foi realizada uma análise preliminar da areia conforme os valores apresentados na Tabela 17. Essa avaliação é importante, já que a qualidade da areia influencia diretamente nos moldes, contribuindo para um processo de moldagem estável e confiável.

Tabela 17 – Ensaio da areia

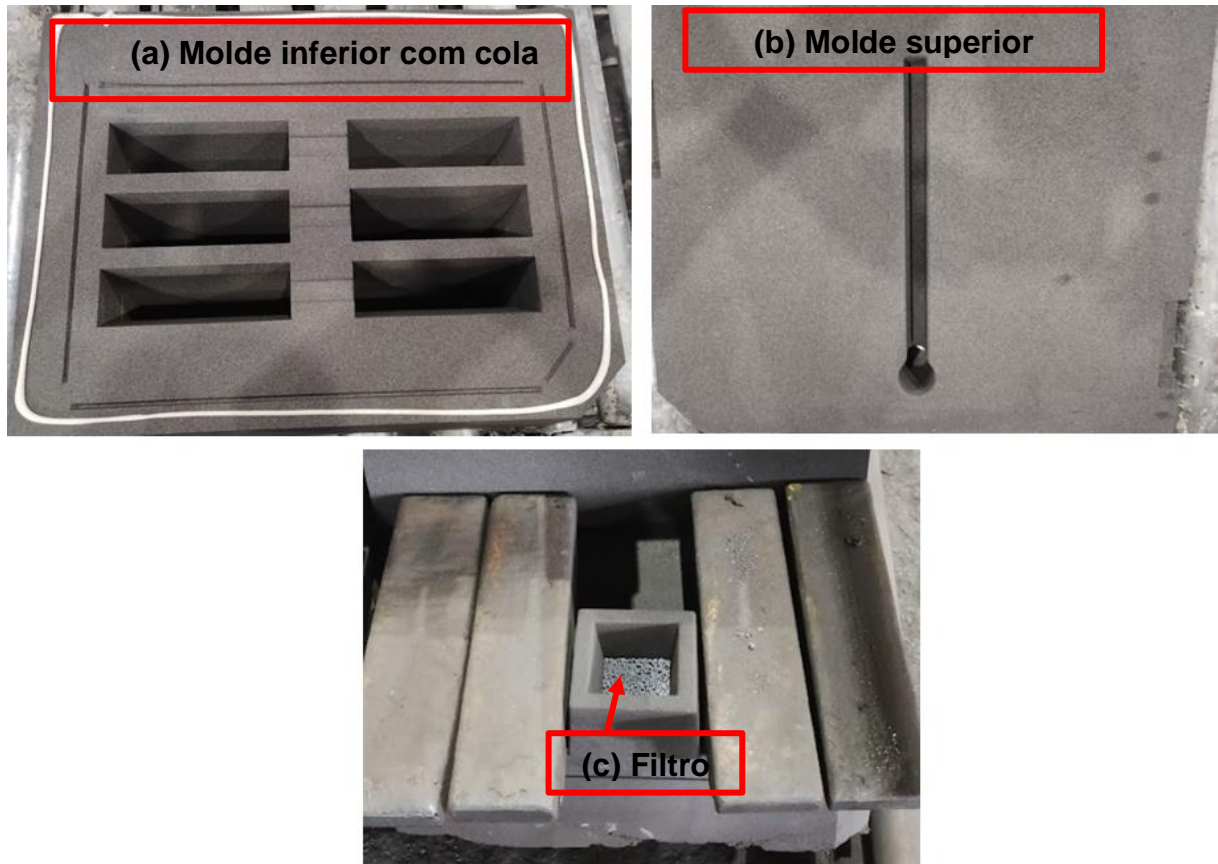
<b>Ensaio</b>	<b>Valor</b>
Potencial hidrogeniônico	6,9 a 7,10
Perda por ignição	2 %
Valor demanda ácida	< 10 ml
Resistência a tração	120 - 150 N/cm <sup>2</sup>
Granulometria	53 - 56 AFS
Teor Finos	0,5 -0,9 %

Fonte: O autor (2023).

Após a extração do molde de areia, foram realizadas operações de limpeza com ar comprimido, colocação de cola e filtro. A aplicação de cola teve como objetivo proporcionar uma aderência firme e estável entre o molde inferior e superior, enquanto o filtro contribui para evitar inclusões indesejadas contidas no metal líquido, além de controlar a turbulência do metal.

Na Figura 20 é mostrado: (a) o molde inferior com cola aplicada no contorno; (b) o molde superior e (c) o molde já fechado com as 2 partes e o filtro.

Figura 20 – Molde inferior com cola, molde superior e filtro



Fonte : O autor (2023)

Os moldes foram transferidos para a linha de vazamento e para evitar risco de abertura indesejada e, conseqüentemente o vazamento de metal pela divisão, foram adicionados quatro lastros, cada um com peso de 25 kg, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Molde com lastros



Fonte : O autor (2023)

### 3.5 FUSÃO E VAZAMENTO

A fusão da liga com os materiais mencionados foi conduzida de acordo com os procedimentos internos da empresa Rio para a produção de ferro fundido. Nesse processo, a incorporação do FeNb foi realizada diretamente no forno, mantendo uma temperatura de 1500 °C. Para cada uma das proporções estabelecidas de Nb, foram necessárias três fusões distintas. Com o objetivo de otimizar a dissolução do FeNb, adotou-se um procedimento específico. Antes da adição do FeNb ao forno, aproximadamente 30 % do metal base foi transferido para uma panela. Em seguida, o FeNb foi introduzido no forno e o metal, previamente retirado, foi reintegrado ao processo. Para garantir a precisão e a qualidade, retirou-se uma amostra inicial do metal já líquido para verificar a composição química e possíveis correções, se necessário. Uma vez confirmada a composição desejada, o material foi liberado para transferência às panelas de tratamento. A Figura 22 mostra o metal líquido no forno.

Figura 22 – Metal líquido no forno



Fonte: O autor (2023).

Após a obtenção do metal em estado líquido, procedeu-se à sua transferência para uma panela de nodularização previamente aquecida. Dentro dessa panela, foi incorporada 5 kg de uma liga de FeSiMg, essencial para promover a formação do ferro fundido nodular. Esse procedimento empregou uma técnica conhecida como *sandwich*. Nessa abordagem técnica, a liga nodularizante foi colocada na parte inferior da panela e, em seguida, coberta por pequenas moedas de aço. Essa disposição foi adotada para criar uma configuração que propiciasse a nodularização controlada do material. Na Figura 23 é exibida a panela de nodularização.

Figura 23 – Tratamento de nodularização em panela

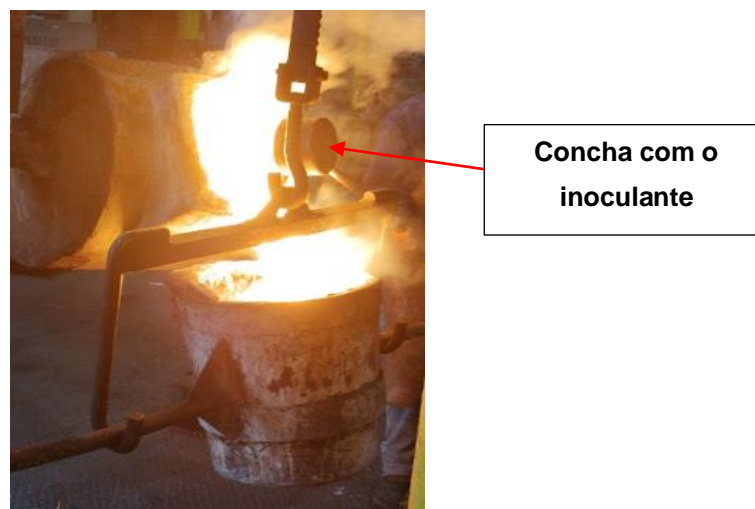


Fonte: O autor (2023).

Após concluir o processo de nodularização, foi realizada a transferência do metal nodularizado para panelas de vazamento previamente aquecidas com gás. Nesse estágio, foi realizada a inoculação no jato de metal com 0,5 kg de inoculante (equivalente a 0,5 %) por panela. Antes do vazamento foi feita uma limpeza para remover escórias e mediu-se a temperatura do metal com um pirômetro de imersão, marca Italterm, modelo Fornero Net.

As panelas de vazamento utilizadas apresentam uma capacidade de 100 kg, que permitiu a realização do vazamento de dois moldes por ciclo. Cada molde, por sua vez, tinha um peso total de 48 kg. Na Figura 24 é mostrada a etapa de inoculação.

Figura 24 – Tratamento de inoculação



Fonte: O autor (2023)

Os moldes, preparados, foram preenchidos com o metal fundido a uma temperatura inicial de 1380 °C. O processo de vazamento teve um tempo médio de enchimento de 14 segundos por molde. Na Figura 25 é mostrada a medição de temperatura para iniciar o vazamento dos moldes.

Figura 25 – Vazamento dos moldes



Fonte: O autor (2023)

Após o vazamento do último molde, foram retiradas amostras. A primeira amostra foi coletada para a validação da composição química final do material produzido em coquilhas de cobre. Essa etapa foi fundamental para garantir que o ferro fundido atendesse às especificações de composição desejadas, assegurando sua qualidade.

A segunda amostra foi reservada para avaliar o grau de nodularização do ferro fundido. Esse processo de avaliação foi essencial, pois a presença de nódulos é um indicador crítico da qualidade do material.

Na Figura 26 é mostrada a amostra para análise da composição química e o corpo de prova para avaliação da nodularização.

Figura 26 – (a) Amostra final destinada à análise da composição química (b) Corpo de prova para avaliação da nodularização



Fonte: O autor (2023).

### 3.6 INCORPORAÇÃO DO NIÓBIO

A incorporação do nióbio foi realizada diretamente no forno durante a fusão da carga metálica, sendo o nióbio adicionado ao metal já líquido para obter um maior rendimento. Na primeira fusão, com um teor planejado de 0,2 % em massa de nióbio, foi utilizada uma granulometria de 10 mm x 50 mm, conforme o material recebido e certificado. Nas fusões subsequentes, com teores planejados de 0,25 % e 0,3 % de nióbio, foi utilizada uma granulometria inferior a 8 mm.

Para todas as fusões, a adição do nióbio foi realizada conforme o procedimento descrito abaixo, visando uma melhor dissolução do material. Após o metal líquido estar no forno, cerca de 30 % são transferidos para a panela de nodularização, com o objetivo de aquecer a panela. Em seguida, adiciona-se o nióbio ao restante do metal dentro do forno. Após a adição do nióbio, o metal da panela é reintegrado ao forno, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Transferência do metal da panela para o forno



Fonte: O autor (2024)

### 3.7 DESMOLDAGEM

Após o processo de vazamento dos moldes, foi realizada uma pausa de 12 horas antes de proceder com a desmoldagem (Figura 28). Essa pausa é essencial para evitar qualquer variação nos resultados dos ensaios, que poderiam ser influenciados pela desmoldagem, enquanto a peça ainda se encontrasse em alta temperatura.

Figura 28 – Peças desmoldadas



Fonte: O autor (2023)

### 3.8 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

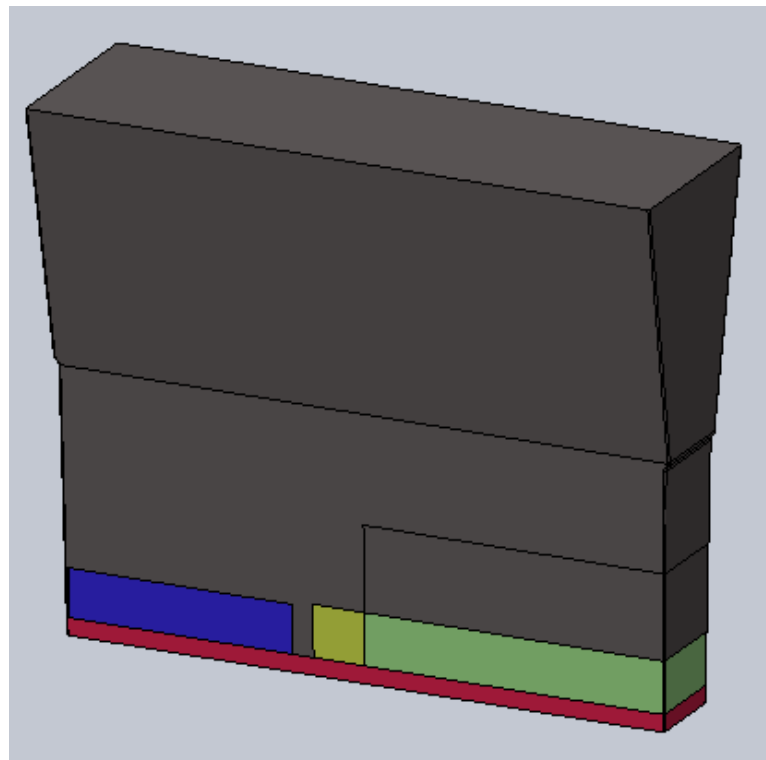
Considerando o bloco Y da Figura 16, é importante destacar que apenas a seção útil de 75 mm foi utilizada, enquanto a porção restante acima dessa medida desempenhou a função de alimentador, também conhecido como massalote. Essa configuração específica foi adotada com a finalidade de prevenir potenciais defeitos causados pela contração durante o resfriamento do material, o que poderia impactar adversamente nos resultados dos ensaios mecânicos a serem realizados posteriormente.

O corte seguiu conforme mostrado na Figura 29, descartando o primeiro corte de 5 mm para evitar influência no resultado, região indicada em vermelho.

Do segundo corte foi retirado um corpo de prova na região destacada em verde com 20 mm de altura e para o ensaio de impacto Charpy foi retirado o corpo de prova na região destacada em azul.

Para o ensaio de dureza e metalografia foi extraída uma amostra de 15 mm x 15 mm na área destacada em amarelo. Na Figura 29 está ilustrado o Bloco Y.

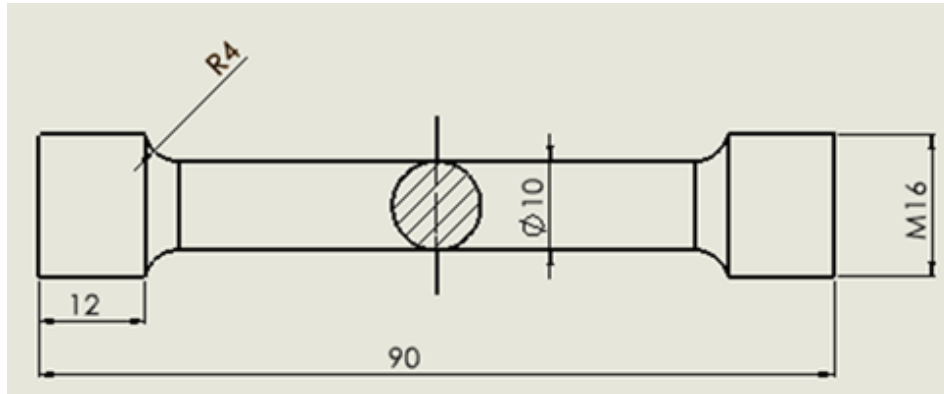
Figura 29 – Corte do Bloco Y



Fonte: O autor (2023).

Para os ensaios de resistência a tração, resistência ao escoamento e alongamento foram usinados 20 corpos de prova, conforme o desenho da Figura 30 (dimensões em milímetros).

Figura 30 – Corpo de prova para tração



Fonte: Adaptado de ABNT NBR ISO 6892.

### 3.9 ESTUDO DE CASO

Para analisar as propriedades mecânicas de uma peça utilizada no setor automotivo, foi adicionado 0,34 % em massa de nióbio à sua composição química, mantendo-se os demais elementos conforme a composição química do Bloco Y referente a esse percentual de Nióbio. As propriedades mecânicas da peça, conforme estabelecido na norma especificada no desenho técnico do cliente, estão apresentadas na Tabela 18.

A escolha desta peça para a adição de nióbio foi visando investigar como o nióbio impacta diretamente a resistência, dureza, resistência ao escoamento e ductilidade do material. Esta peça específica, que compartilha uma composição química comum com diversas outras, foi selecionada devido à crescente necessidade de componentes mais duráveis no mercado. A adição de nióbio tem o potencial de aumentar significativamente a vida útil das peças, onde o desgaste, a abrasão e a temperatura são fatores críticos, o que responde à demanda do mercado por soluções com maior durabilidade. A proposta inclui avaliar o desempenho das peças com nióbio, com o objetivo de oferecer um produto que não apenas supera a concorrência, mas também se posiciona como uma alternativa viável para aplicações que exigem alta resistência ao desgaste.

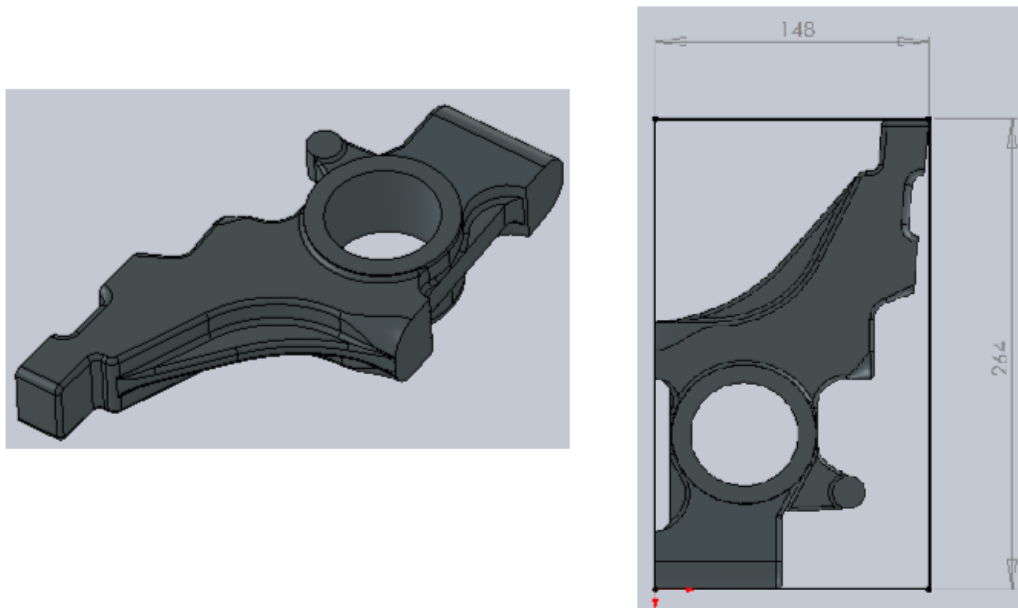
Tabela 18 - Propriedades mecânicas especificadas para a peça

Resistência a tração	Resistência ao escoamento	Alongamento	Dureza	Matriz
>500 MPa	>350 MPa	>7%	200-250 Hb	Perlita-Ferrita

Fonte: O autor (2024).

A peça é um suporte aplicado no motor de caminhões Mercedes, com massa de 5 kg e dimensões em mm, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Peça utilizada no estudo de caso

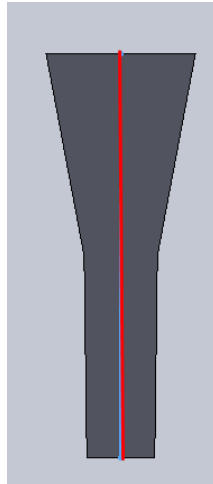


Fonte: O autor (2024).

### 3.10 AVALIAÇÃO DE DEFEITOS

As peças foram direcionadas ao laboratório para passarem por procedimentos preliminares. Inicialmente, ocorreu o corte das peças com serra fita, preparando-as para análises subsequentes. O corte foi executado conforme a Figura 32 indicado na linha em vermelho para avaliar a sanidade do fundido (inexistência de defeitos na região onde serão retirados os corpos de prova).

Figura 32 – Local do corte com serra fita no bloco Y para análise de sanidade



Fonte: O autor (2024).

Em seguida, utilizou-se a técnica de ultrassom para identificar eventuais defeitos internos (não superficiais), para avaliar a integridade das peças. Nesse ensaio foi utilizado o equipamento OLYMPUS, modelo EPOCH LT. Por fim, realizou-se a usinagem dos corpos de prova.

### 3.11 ANÁLISE QUÍMICA DAS LIGAS FUNDIDAS

A análise química das ligas fundidas foi realizada com um espectrômetro ótico da marca AMETEK, modelo SPECTROMAX, disponível na empresa Rio para a avaliação da qualidade do material. Amostras para análise química com formato de moedas foram preparadas em retífica plana de perfil, disponível na empresa Rio.

### 3.12 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DAS LIGAS FUNDIDAS

Para a caracterização da microestrutura dos materiais, foram preparadas amostras metalográficas no Laboratório de Ensaio Mecânicos da empresa Rio. O procedimento de preparação metalográfica incluiu etapas sequenciais de corte, lixamento, polimento e ataque químico. As amostras foram cortadas com uma cortadeira metalográfica, por meio de um disco de carbeto de silício (SiC). Na sequência, as amostras embutidas foram lixadas manualmente em um suporte, usando lixas de carbeto de silício (SiC), com diferentes granulometrias na sequência: #120, #220, #320, #500, #800 e #1200. Em seguida, as amostras foram polidas

utilizando panos com suspensões de diamante de 6  $\mu\text{m}$  e 3  $\mu\text{m}$ , em sequência. O ataque químico das amostras polidas foi realizado por imersão em reagente Nital 3 %.

A microestrutura das amostras metalográficas foi avaliada por microscopia óptica (MO) no LAMEC-UCS. Também foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) e Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS). Na análise por MEV\_FEG, foi utilizado o microscópio modelo MIRA3, da marca Tescan, instalado no Laboratório Central de Microscopia Professor Israel Baumvol (LCMIC) da UCS. Na análise por EDS, foi utilizado o detector modelo X-Max50, marca Oxford acoplado ao microscópio eletrônico de varredura. A avaliação visou a identificação da fase matriz, os nódulos de grafite e carbonetos presentes nas ligas de ferro fundido nodular, com e sem adição de Nb.

### 3.13 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na pesquisa, utilizou-se o método estatístico de Análise de Variância (ANOVA) para avaliar se a adição de diferentes concentrações de nióbio (0,2 %, 0,25 % e 0,34 %) afetaria de forma significativa as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular.

O teste ANOVA, amplamente utilizado em estatística, serve para verificar se amostras provêm de populações com médias distintas. Sua aplicação é ideal quando se deseja comparar a média de duas ou mais populações por meio de suas amostras. Embora seu nome se refira à análise da variância, o foco do teste está em comparar as médias das populações. Isso é feito a partir do desvio-padrão das amostras que, ao ser elevado ao quadrado, resulta na variância. Dessa forma, ANOVA utiliza a variância como uma medida para avaliar a diferença entre as médias (Virgillito, 2017, p. 255).

Especificamente, o teste de Fischer (teste F) foi empregado como parte do processo de ANOVA para determinar se as variações observadas entre os grupos experimentais são estatisticamente significativas ou se podem ser atribuídas ao acaso.

O teste exato de Fisher é utilizado para verificar a associação entre duas variáveis qualitativas nominais dispostas em uma tabela de contingência  $2 \times 2$ . Para que o teste seja válido, as amostras precisam ser aleatórias e independentes, de modo que cada observação pertença apenas a uma das categorias analisadas. Os totais

das linhas e colunas na tabela são fixos. A hipótese nula do teste é a de que não há relação entre as variáveis, ou seja, a posição de um indivíduo em uma linha não afeta sua posição na coluna correspondente, enquanto a hipótese alternativa sugere que existe uma associação entre elas (Vieira, 2023, p. 29).

A coleta de dados foi realizada em quatro grupos de amostras, cada um correspondente a uma concentração específica de nióbio, e as propriedades mecânicas avaliadas incluíram resistência à tração, dureza, resistência ao escoamento, alongamento e resistência ao impacto. Os resultados obtidos foram, posteriormente, submetidos ao teste F, que compara a variabilidade entre as médias dos grupos com a variabilidade dentro de cada grupo.

Convencionalmente, o limite para rejeitar a hipótese nula é previsto em  $p = 0,05$ . Esse valor implica que, na ausência de diferença real, a ocorrência de um valor tão extremo para a estatística de teste é esperada em menos de 5 % (Ferreira & Patino, 2015, p. 1).

Portanto um valor de  $p$  inferior a 0,05 é considerado como indicação de uma diferença significativa, confirmando que a adição de nióbio exerce um impacto mensurável nas propriedades do material. Dessa forma, a aplicação desses métodos estatísticos permite validar ou refutar a hipótese de que o nióbio influencia as características mecânicas do ferro fundido nodular.

Em estatística, o nível alfa (ou nível de significância) é uma medida que se usa para determinar se os resultados de um experimento ou estudo são significativos, ou seja, pode-se dizer com confiança que não ocorreram apenas por acaso, um valor  $p$  pequeno indica que os dados observados são raros, dado que a hipótese nula seja verdadeira. Como há a tendência de desconfiar de eventos raros, conclui-se que esses dados não ocorreram por acaso e, portanto, rejeita-se a hipótese nula. Esse resultado é chamado de estatisticamente significativo, e a probabilidade limite para decidir pela rejeição ou não a hipótese nula é o nível alfa ( $\alpha$ ). Valores comuns de  $\alpha$  são 0,10; 0,05 e 0,01, cuja escolha do nível adequado depende do contexto. Por exemplo, para questões de segurança, como *airbags*, um nível alfa menor é preferível, enquanto para preferências alimentares, um valor maior pode ser suficiente (Norean R, Richard D, & Paul F., 2011, p. 320).

### 3.14 AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LIGAS

Blocos Y foram preparados para a medição das propriedades mecânicas indicadas a seguir. O número de corpos de prova preparados está indicado na Tabela 19.

Tabela 19 – Quantidades de bloco Y fundidos e corpos de provas para análise

<b>Amostra</b>	<b>Quantidade de blocos Y fundidos</b>	<b>Quantidade de corpos de prova para ensaios de tração, dureza, escoamento, alongamento, impacto</b>
Corpo prova com 0 % Nb	24	20
Corpo prova com 0,18 % Nb	24	20
Corpo prova com 0,25 % Nb	24	20
Corpo prova com 0,34 % Nb	24	20

Fonte: O autor (2024).

As propriedades mecânicas selecionadas para avaliação são aquelas fundamentais e estabelecidas pelas normas específicas para ferro fundido nodular, sendo importantes para garantir o desempenho adequado do produto em sua aplicação final. A escolha desses parâmetros se baseia na necessidade de assegurar que o material modificado com nióbio atenda ou exceda aos requisitos normativos, como resistência à tração, resistência ao escoamento, dureza e ductilidade.

Além disso, optou-se por realizar ensaio mecânico de impacto para avaliar como o nióbio influencia essa propriedade. A seleção desses ensaios visa obter um entendimento abrangente do comportamento do material, permitindo identificar melhorias significativas nas propriedades mecânicas que justifiquem a introdução do nióbio na liga.

Uma população é composta por todos os elementos que fazem parte do universo de estudo e que podem ser observados sob as mesmas condições, enquanto a amostra representa uma parte desses elementos e a amostragem é o processo de seleção dessa amostra (Barbetta, Reis, & Bornia, 2010, p. 170).

Durante o planejamento de uma pesquisa, é comum calcular o tamanho da amostra necessário para garantir uma precisão desejada, que é definida pelo erro amostral máximo tolerado e pelo nível de confiança adotado no processo de estimativa (Barbetta, Reis, & Bornia, 2010, p. 192).

O cálculo do tamanho da amostra apresenta dificuldades operacionais, pois depende da variância populacional, que geralmente é desconhecida. Para contornar

essa limitação, a variância pode ser estimada a partir de estudos anteriores, da experiência do pesquisador ou por meio de uma amostragem piloto, em que a variância da amostra obtida é utilizada como substituta (Barbetta, Reis, & Bornia, 2010, p. 192).

O poder de um teste estatístico é a probabilidade de rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) quando ela é, de fato, falsa. Isso significa que o poder do teste corresponde a 1 menos a probabilidade de cometer um erro tipo II ( $\beta$ ). Assim, quanto maior o poder, menor a chance de não detectar um efeito verdadeiro no experimento, tornando o teste mais eficiente em identificar diferenças significativas (Barbetta, Reis, & Bornia, 2010, p. 225).

Neste estudo, utilizou-se o *software* G\*Power<sup>3</sup> e a plataforma online Cálculo Amostral para determinar o número adequado de amostras a serem utilizadas no experimento. No APÊNDICE V apresenta os parâmetros específicos inseridos no *software*, como tamanho do efeito, nível de significância e poder do teste, para a definição do valor  $n$ . Foi utilizado o desvio padrão de 15, sendo calculado de um lote piloto da amostra sem adição de nióbio no cálculo do número de amostras. No cálculo do número de amostras, foi utilizado um valor mínimo de 17 como a diferença esperada entre os grupos com diferentes teores de nióbio. Esse valor representa a menor variação a ser identificada entre os grupos e foi determinado com base em uma diferença inferior àquela observada entre as médias dos valores de resistência à tração. Os valores médios do desvio padrão dos ensaios de resistência a tração, escoamento, alongamento e dureza foram de 18; 11; 0,85 e 7,6 respectivamente. Isso contribui que o estudo tenha poder estatístico suficiente para identificar variações significativas nas propriedades mecânicas em função da adição de nióbio.

### 3.14.1 Dureza

A dureza das amostras foi determinada pelo ensaio de indentação Brinell, sendo utilizado um indentador esférico e durômetro, modelo RG-280, marca YADOYA no Laboratório de Ensaios Mecânicos (Rio). Foram realizadas 3 indentações em cada amostra.

---

<sup>3</sup> Desenvolvido na Heinrich-Heine-University, Düsseldorf

### **3.14.2 Resistência à tração**

Para avaliar a resistência mecânica dos corpos de provas, foram conduzidos ensaios de tração uniaxial em uma máquina universal de ensaios, marca ARMS-FIND, modelo Arotec, com capacidade de 200 kN do Laboratório de Ensaios Mecânicos (Rio).

### **3.14.3 Resistência ao impacto**

Para avaliar a resistência ao impacto, foram conduzidos ensaios em uma máquina da marca VEB *Werkstoffprüfmaschinen* Leipzig do LAMEC-UCS. Para todos os corpos de prova de 10mm x 10mm x 55 mm, o ensaio foi realizado sem entalhe e o método de ensaio atendeu à norma ABNT NBR ISO 148-1<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Apesar da Norma ABNT NBR ISO 148-1:2021 (Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy, Parte 1 – Método de Ensaio, determinar entalhe tipo V ou tipo U, optou-se por corpos de prova sem entalhe, em vista da baixa tenacidade usual dos ferros fundidos.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados obtidos, com base na metodologia exposta no capítulo anterior, estão apresentados.

### 4.1 SANIDADE DO FUNDIDO POR ANÁLISE VISUAL

O resultado de sanidade é apresentado na Tabela 20, sendo essa análise realizada diretamente no bloco Y.

Tabela 20 – Resultado análise de sanidade

Amostra	Quantidade de blocos Y	Resultado
Bloco Y com 0 % Nb	3	Aprovado, não identificado porosidade visual
Bloco Y com 0,18 % Nb	3	Aprovado, não identificado porosidade visual
Bloco Y com 0,25 % Nb	3	Aprovado, não identificado porosidade visual
Bloco Y com 0,34 % Nb	3	Aprovado, não identificado porosidade visual

Fonte: O autor (2024).

Na Figura 33, observa-se o bloco Y cortado, sem defeitos visuais aparentes. O defeito destacado é um rechupe localizado no topo da peça indicado no contorno em vermelho. Esse tipo de defeito é esperado, pois essa região funciona como massalote, garantindo a integridade das áreas inferiores (região destacada em verde) de onde são retirados os corpos de prova para ensaios.

Figura 33 – Bloco Y cortado, sem a presença de defeitos visuais.



Fonte: O autor (2024).

## 4.2 SANIDADE DO FUNDIDO POR ULTRASSOM

O resultado do ultrassom dos corpos de prova analisados é apresentado na Tabela 21. A análise foi realizada no corpo de prova já extraído nas regiões onde se efetuou o corte, como mostrado na figura 29.

Tabela 21 – Resultado análise de ultrassom

Amostra	Quantidade de Blocos Y	Resultado
Bloco Y com 0 % Nb	3	Aprovado, não identificado defeitos
Bloco Y com 0,18 %Nb	3	Aprovado, não identificado defeitos
Bloco Y com 0,25 %Nb	3	Aprovado, não identificado defeitos
Bloco Y com 0,34 %Nb	3	Aprovado, não identificado defeitos

Fonte: O autor (2024).

## 4.3 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL FUNDIDO

A Tabela 22 apresenta os resultados da composição química obtida por meio de espectrometria óptica nos testes realizados. Os valores inicialmente planejados de Nb eram de 0 %, 0,2 %, 0,25 % e 0,3 %, porém na prática os teores tiveram pequena variação, o que é normal para o processo de fundição, pois se trabalha com valor mínimo e máximo. Para determinação do carbono equivalente (CE) foi utilizada a equação 1.

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \dots\dots\dots (1)$$

Tabela 22 – Composição química

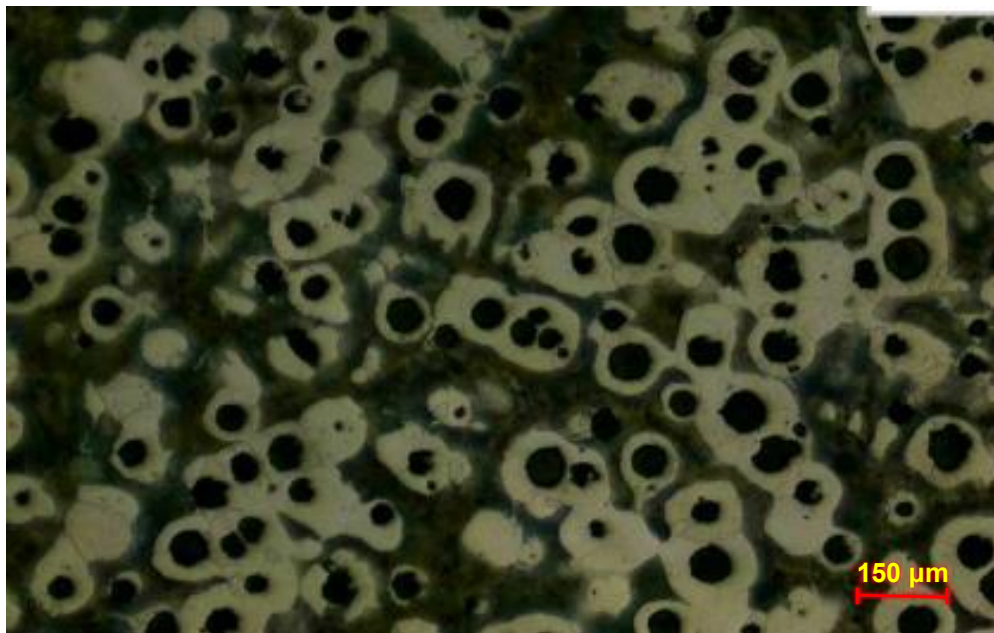
Lote	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Cu	% P	% S	% Sn	% Mg	% Nb	% Al	% CE	% Fe
1	3,77	2,49	0,38	0,027	0,4	0,014	0,015	0,02	0,045	<b>0</b>	0,014	4,60	Restante
2	3,49	2,64	0,31	0,036	0,31	0,049	0,015	0,001	0,046	<b>0,18</b>	0,03	4,39	Restante
3	3,57	2,61	0,32	0,045	0,34	0,04	0,015	0,002	0,045	<b>0,25</b>	0,022	4,45	Restante
4	3,73	2,38	0,35	0,107	0,32	0,049	0,012	0,012	0,05	<b>0,347</b>	0,11	4,54	Restante

Fonte: O autor (2024)

#### 4.4 ANÁLISE MICROGRÁFICA DO MATERIAL FUNDIDO

A Figura 34 mostra a microestrutura do ferro fundido sem a adição de Nióbio, onde é observada a presença de nódulos de grafita, perlita (escura) e ferrita (clara).

Figura 34 – Microestrutura do ferro fundido nodular sem nióbio



Fonte: O autor (2024)

Nos APÊNDICE A e APÊNDICE B são mostradas todas as avaliações realizadas de contagem de nódulos e os resultados quantitativos da amostra sem adição de Nióbio.

As análises dos corpos de prova com teores de nióbio de 0,18 %, 0,25 % e 0,34 % são apresentadas nos apêndices C, D, E, F, G e H exibidos a partir da página 117.

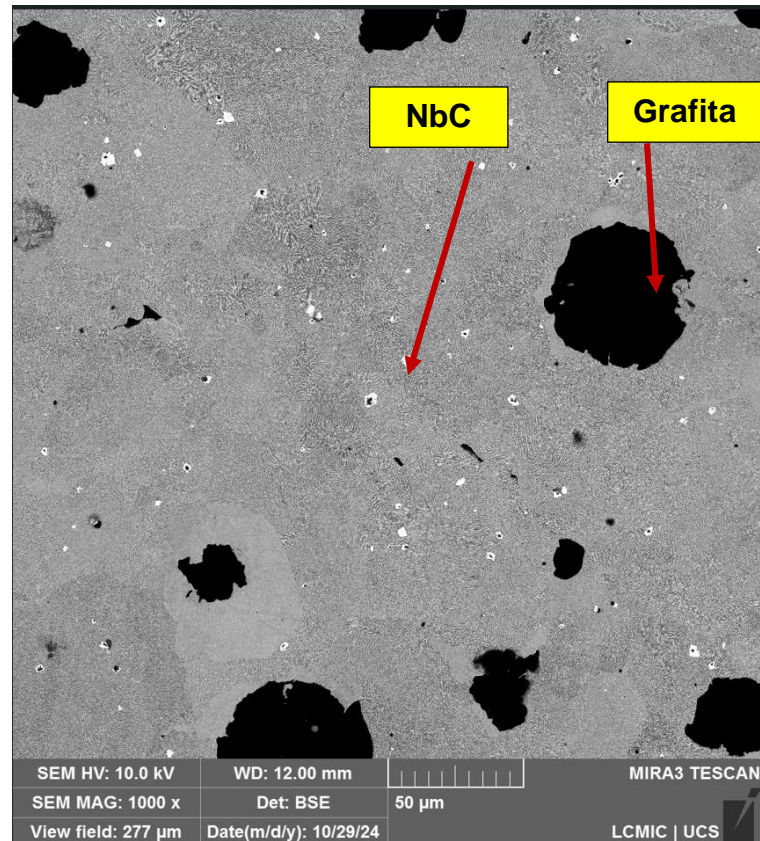
A Figura 35 apresenta uma microestrutura típica de amostras de ferro fundido nodular contendo nióbio, obtida por meio de um microscópio eletrônico de varredura, onde é observada a grafita, a matriz e os precipitados de carbeto de nióbio.

As formas trapezoidais e retangulares observadas nos precipitados ricos em nióbio e carbono são consistentes com as descrições encontradas na literatura (Bedolla-Jacuinde; Solis; Hernandez, 2003, p. 1).

Estes precipitados são comumente identificados como carbeto de nióbio (NbC). A formação de tais precipitados é importante para melhorar algumas

propriedades mecânicas, como a dureza e a resistência ao desgaste das ligas metálicas.

Figura 35 – Microestrutura típica de ferro fundido nodular com nióbio



Fonte: O autor (2024)

Os resultados com análise do MEV e EDS nas amostras com nióbio são mostrados do apêndice I ao N, a partir da página 123.

#### 4.4.1 Resultados da análise microscópica óptica

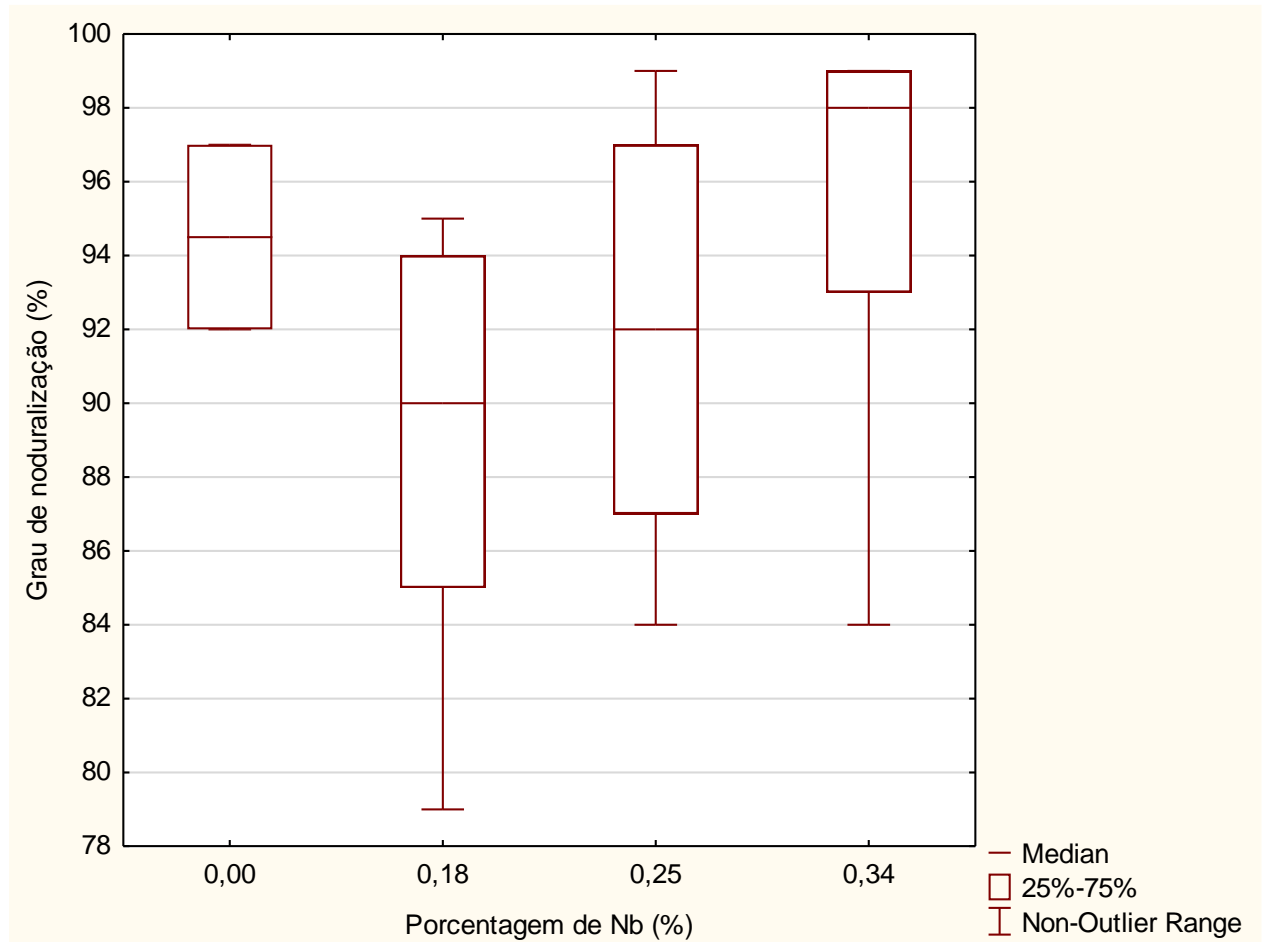
A caracterização das fases e constituintes dos ferros fundidos com os teores de nióbio, utilizando microscopia óptica, é apresentada a seguir.

Os dados indicam que a adição de Nióbio não prejudicou a formação do ferro fundido nodular, evidenciada pela presença de grafita esferoidal e matriz perlítica-ferrítica nas amostras analisadas, independentemente do teor desse elemento.

Na Figura 36 é ilustrado o grau de nodularização obtido com a microscopia óptica através do software Digimet Plus 5G e a faixa de variabilidade pela análise em várias regiões de cada amostra. Facilmente se observa que ao considerar estas

faixas, não é possível afirmar que haja influência do grau de nodularização com a adição de nióbio.

Figura 36 – Grau de nodularização



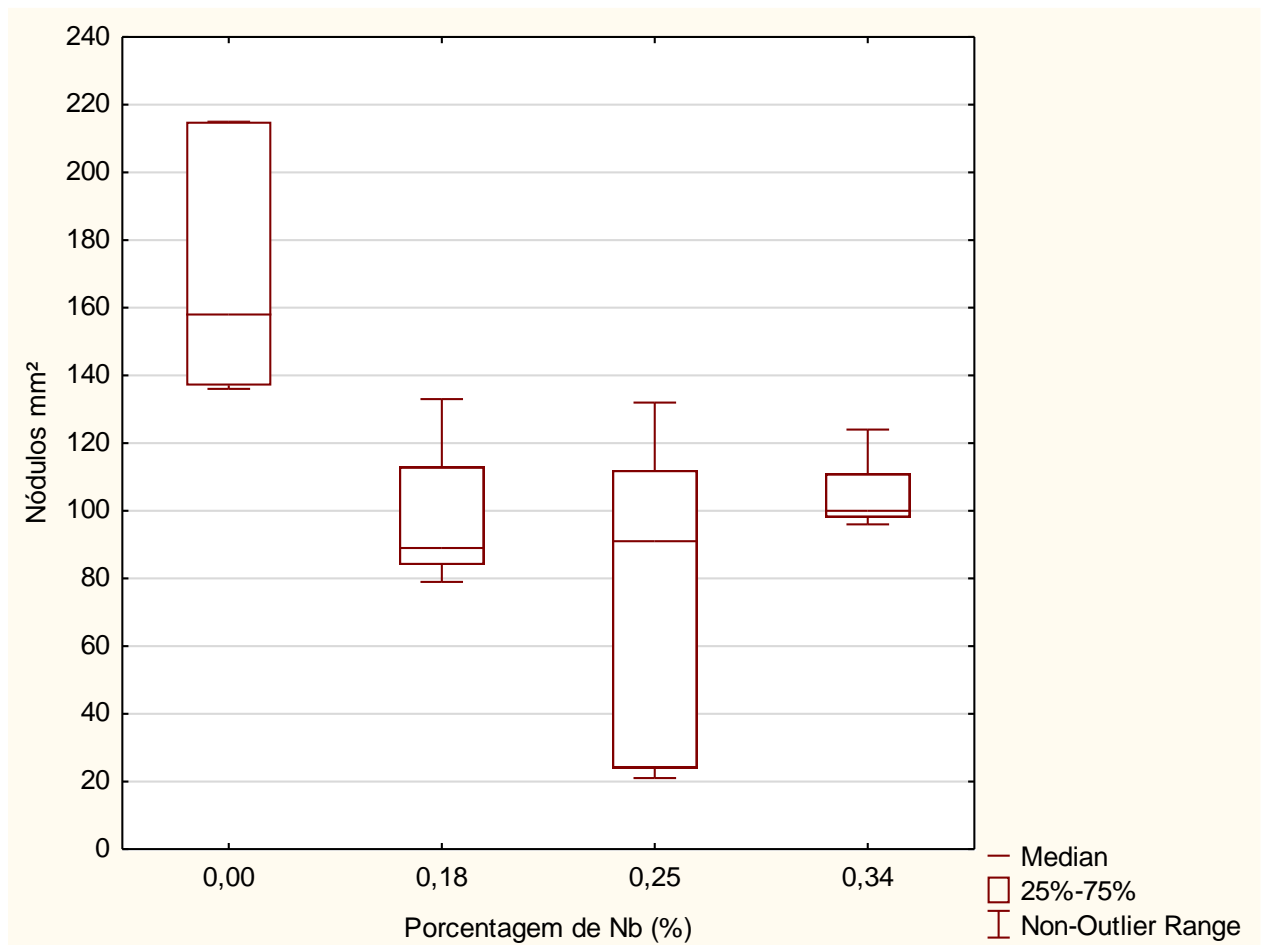
Fonte: O autor (2024)

Souza (2012, p.100), em seu estudo, evidenciou a variação do grau de nodularização e quantidade de esferoides com a variação do nióbio. Wang *et al.* (2022, p.9) também observaram que, com maiores adições de nióbio, a nodularidade foi reduzida.

Na Figura 37 são ilustrados os valores de nódulos por mm<sup>2</sup> para cada faixa de nióbio. Os valores médios de nódulos por mm<sup>2</sup> mostram que ocorre uma queda com a adição de nióbio, em comparação com a liga sem nióbio. De fato, pode estar relacionado à precipitação de carbonetos de nióbio durante a solidificação, pois pode reduzir a quantidade de carbono para formar grafita. Contudo, não foi possível afirmar que há uma tendência de aumento do número de nódulos por mm<sup>2</sup> à medida que aumenta o teor de nióbio, pois as faixas de variabilidade se confundem.

Por outro lado, o aumento no número de nódulos na liga com 0,34 % de Nb pode estar relacionado ao maior valor de carbono equivalente. Souza (2012, p.100), em seu estudo, evidenciou um aumento no número de esferoides na liga com maior quantidade de nióbio, porém com um carbono equivalente maior. Wang *et al.* (2022, p.5), ao contrário, observou uma queda dos números de esferoides com maiores adições de nióbio.

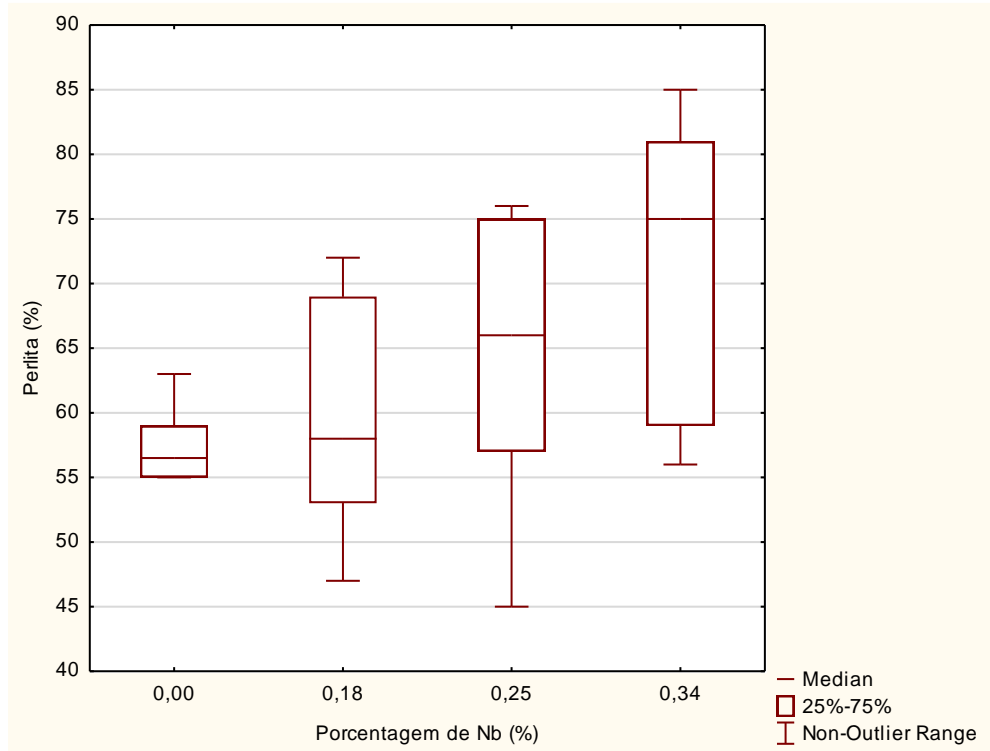
Figura 37 – Nódulos por mm<sup>2</sup>



Fonte: O autor (2024)

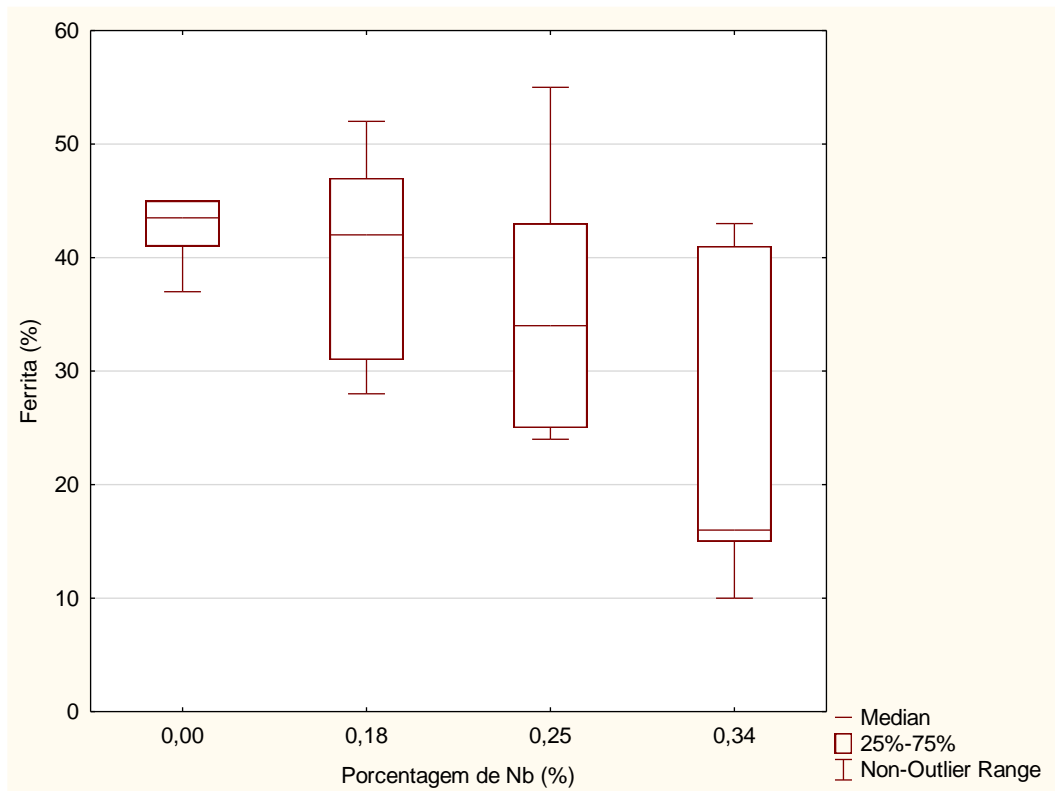
Com o aumento do Nb pode-se concluir que ocorre um aumento da quantidade de perlita e, conseqüente, redução da ferrita, conforme é mostrado nas Figuras 38 e 39, através dos valores médios. Wang *et al.* (2022, p.9), em seu estudo, também evidenciaram o aumento de perlita com adição de nióbio e redução da ferrita. Apesar de ser evidente esta tendência nos gráficos, as análises realizadas em várias regiões mostram alta variabilidade, não discutida em trabalhos anteriores.

Figura 38 – Fração de Perlita



Fonte: O autor (2024)

Figura 39- Fração de Ferrita



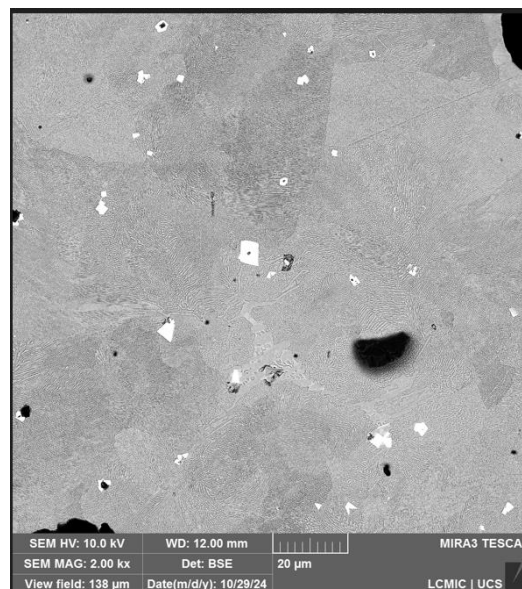
Fonte: O autor (2024)

#### 4.4.2 Resultados da análise em MEV e por EDS

Nos resultados obtidos através da utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e da análise por Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), foi possível identificar a formação de carbonetos de nióbio nas amostras de ferro fundido nodular contendo o elemento de liga. As imagens de MEV evidenciaram a presença de precipitados com característica morfológica, atribuídas aos carbonetos de nióbio, os quais se destacam devido ao seu contraste em relação à matriz perlítica do material. Essa morfologia, que aparece sempre precipitada na fase perlítica, corrobora a expectativa de que a adição de nióbio possa influenciar as propriedades mecânicas.

A análise de EDS confirmou a presença de nióbio nos precipitados observados. Nos espectros de EDS, picos significativos foram obtidos na região correspondente ao nióbio, comprovando sua incorporação nos carbonetos formados. Esses resultados são fundamentais para entender a contribuição do nióbio na formação de fases duras dentro da microestrutura do ferro fundido nodular. A confirmação da presença de nióbio não apenas valida a adição do elemento, mas também sugere uma dispersão dos carbonetos, melhorando significativamente o desempenho do material em aplicações que exigem maior dureza da matriz e resistência ao desgaste. Na Figura 40 é exibida uma imagem da microestrutura obtida por MEV da liga com 0,34 % de nióbio.

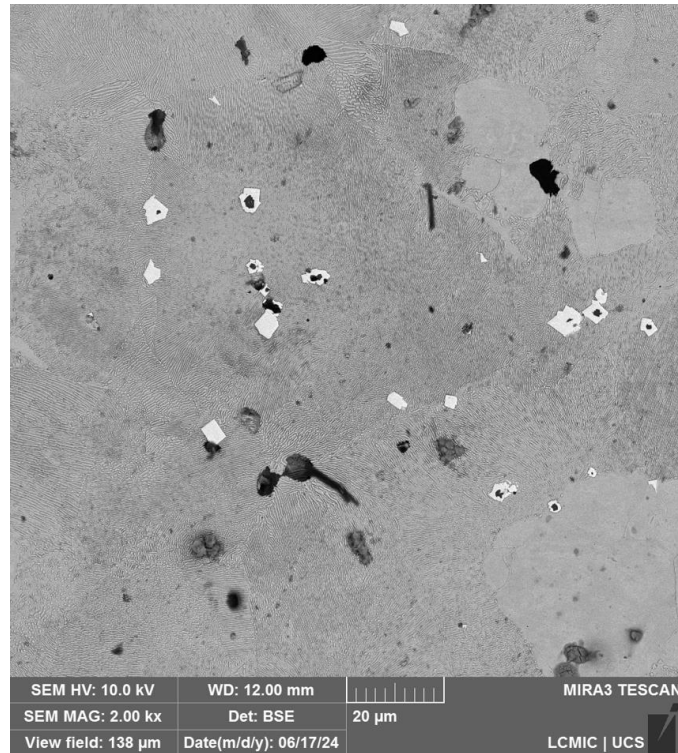
Figura 40 – Microestrutura do ferro fundido nodular com 0,34 % de nióbio



Fonte: O autor (2024)

Na Figura 41 é ilustrada a análise de MEV com 0,25 % de nióbio

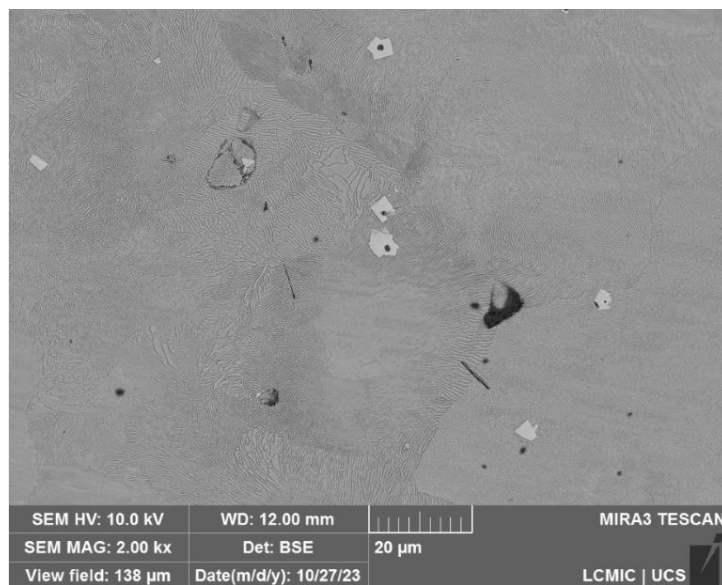
Figura 41 – Microestrutura com nióbio de 0,25 %



Fonte: O autor (2024)

Na Figura 42 é ilustrada a análise de MEV com 0,18 % de nióbio.

Figura 42 – Microestrutura com nióbio de 0,18 %



Fonte: O autor (2024)

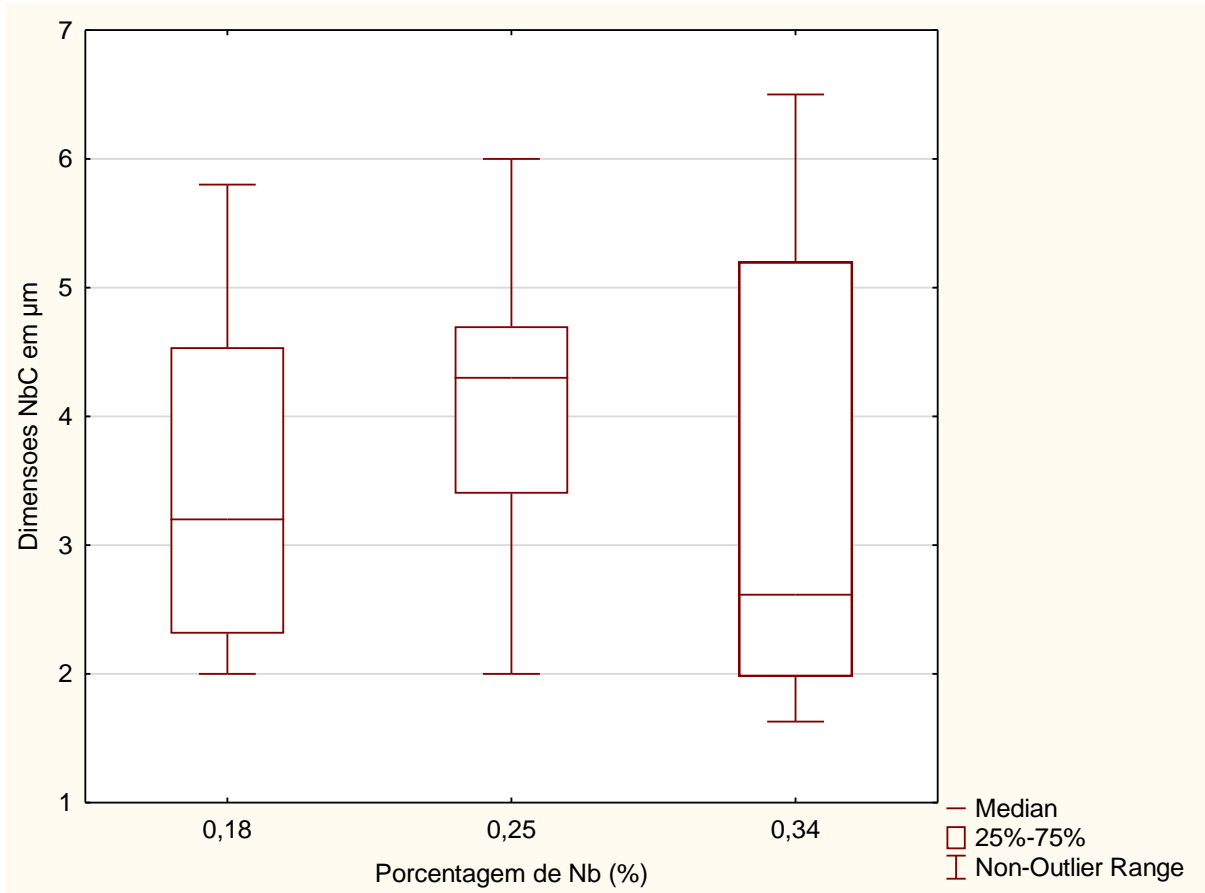
Embora as diferenças visuais nas imagens sejam discretas, não foi possível estabelecer uma relação clara entre as microestruturas observadas e os diferentes teores de nióbio adicionados ao ferro fundido nodular. As imagens apresentaram características muito similares, sem variações evidentes que pudessem ser diretamente atribuídas à variação nas concentrações de nióbio (0,18 %, 0,25 % e 0,34 %). Isso sugere que as possíveis influências do nióbio na microestrutura podem ser sutis demais para serem detectadas apenas pela análise visual, indicando a limitação dessa abordagem para esse propósito. Além disso, não foi identificado nenhum padrão consistente relacionado ao tamanho dos NbC. Portanto, com base apenas nas imagens obtidas, não é possível concluir se há ou não impacto direto das concentrações de nióbio sobre as microestruturas apresentadas. Estudos complementares, como análises quantitativas e testes mecânicos, foram necessários para avaliar os reais efeitos do nióbio nas propriedades do material.

Foram feitas medições do tamanho dos carbonetos de nióbio em amostras contendo as diferentes faixas de nióbio (0,18 %, 0,25 % e 0,34 %). Entretanto, os dados obtidos indicaram que não é possível estabelecer uma relação clara entre o tamanho dos carbonetos e a quantidade de nióbio adicionada ao material. Isto sugere que à medida que aumenta o teor de nióbio, deve haver maior número de precipitados na matriz, muito embora haja uma tendência de acúmulo de carbonetos em *clusters*. Contudo, não foi feita análise para comprovar esta hipótese.

Na Figura 43 ilustram-se os tamanhos medidos de carbonetos em cada liga com nióbio.

Nas amostras analisadas, observou-se a presença de nódulos de grafita, matriz perlítica-ferrítica e precipitados. No entanto, com a análise em EDS não foi possível observar a presença de nióbio na matriz, o que pode ser explicado pela baixa solubilidade desse elemento na matriz metálica como relatado por Nylén (2007), Bedolla-Jacuinde; Solis; Hernandez (2003) e Souza (2012).

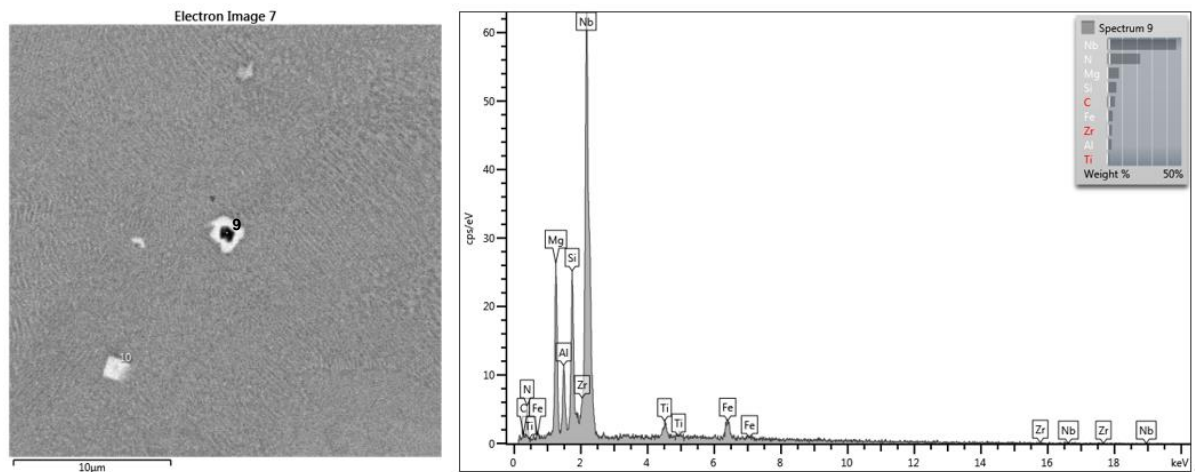
Figura 43 – Tamanho dos carbonetos



Fonte: O autor (2024)

A Figura 44 ilustra uma das análises de EDS obtidas.

Figura 44 – Partículas de Níobio e elementos presentes analisados por EDS.



Fonte: O autor (2024)

Na Figura 45 são identificados outros elementos químicos, como magnésio, silício, alumínio, zircônio e carbono, os quais podem ser atribuídos à presença desses elementos na carga metálica e nos ferros-ligas utilizados. No ANEXO B e ANEXO C é ilustrado a composição química do FeSi e FeSiMg.

Os precipitados ricos em nióbio e carbono apresentaram formas trapezoidais e retangulares, semelhantes às já relatadas na literatura, como por Bedolla-Jacuinde; Solis; Hernandez, (2003) e Souza (2012).

Nos apêndices I até N, a partir da página 123, são apresentadas as análises de MEV e EDS realizadas para cada faixa de estudo de liga com nióbio.

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os resultados de resistência à tração, resistência de escoamento, alongamento, dureza e resistência ao impacto obtidos nos ferros fundidos sem e com Nióbio estão ilustrados nas tabelas a seguir.

Na Tabela 23 são apresentados os resultados de resistência a tração.

Na Figura 45 é ilustrado o gráfico de resistência à tração (MPa) *versus* a quantidade de nióbio utilizada, com clara observação que o aumento do teor de nióbio provoca o aumento da resistência mecânica à tração. Wang *et al* (2022, p.9), em seu estudo, observaram o aumento na resistência a tração com adições de nióbio, da mesma forma que observado por Souza (2012, p.100).

Uma análise de variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar a significância dos efeitos das diferentes concentrações de nióbio (0 %, 0,18 %, 0,25 % e 0,34 %) na Resistência à Tração. Os resultados indicaram um valor F elevado, superior ao valor crítico de F para o nível de significância adotado (0,05), destacando diferenças significativas entre as médias de resistência nas diferentes concentrações de nióbio. Além disso, o valor-p calculado foi menor que 0,05, indicando que essas diferenças são estatisticamente significativas. No APÊNDICE Q é demonstrada a análise completa de ANOVA.

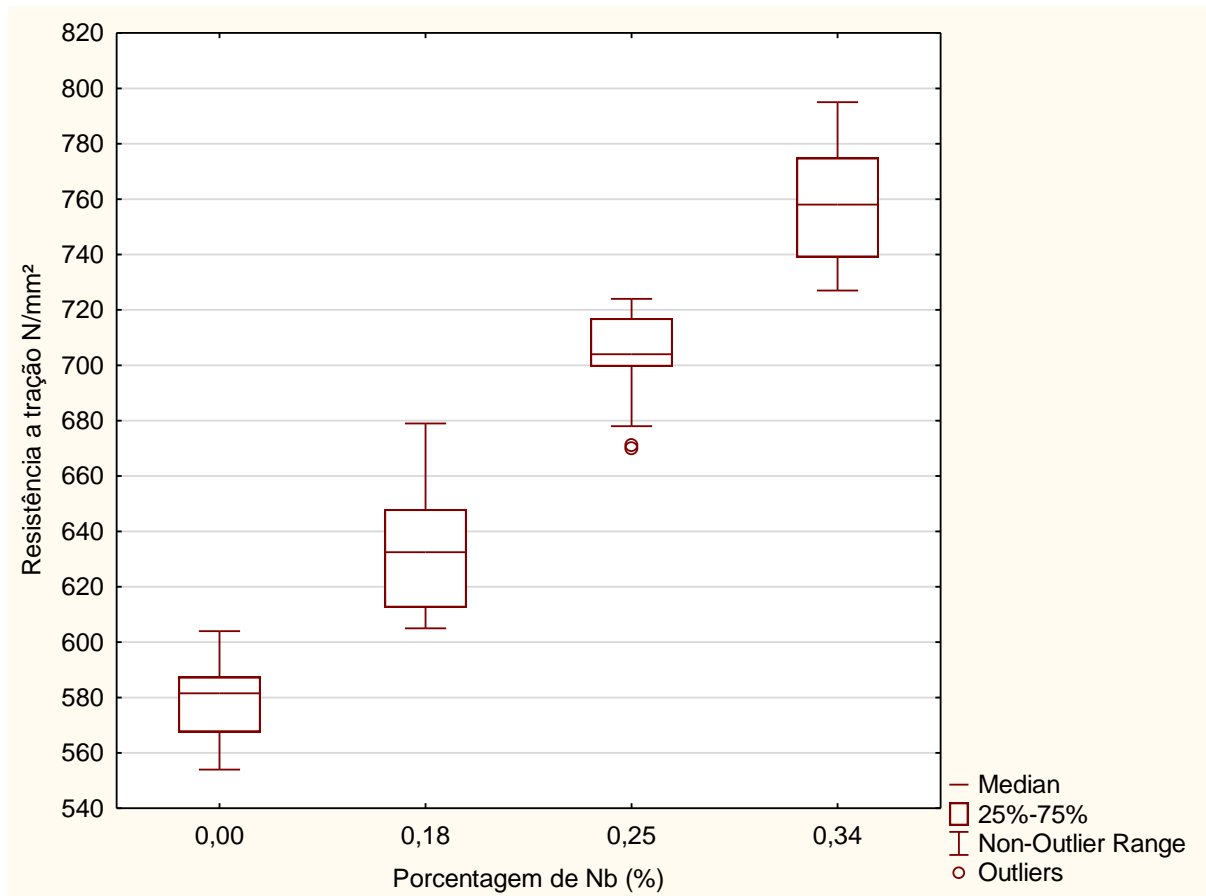
Tabela 23 – Resultados de Resistência à Tração

<b>Resistência à Tração (MPa)</b>			
<b>0,0 %Nb</b>	<b>0,18 %Nb</b>	<b>0,25 %Nb</b>	<b>0,34 %Nb</b>
602	612	698	738
578	611	702	727
573	630	701	728
554	632	670	750
592	650	671	764
570	633	705	769
592	613	703	795
570	608	704	775
585	609	678	730
588	646	708	775
585	622	704	740
587	605	678	765
572	648	708	740
554	643	704	779
555	674	717	791
554	629	719	783
604	648	717	743
565	679	724	752
585	674	720	729
587	646	719	769

Fonte: O autor (2024).

O teste de Fisher foi aplicado para verificar a significância das diferenças nas médias na Resistência à Tração nas diferentes concentrações de nióbio (0 %, 0,18 %, 0,25 % e 0,34 %). Os resultados indicaram valores de p iguais a 0, o que confirma, com alta confiabilidade, a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Esse valor de p igual a 0 sugere que as diferenças observadas em resistência mecânica à tração são altamente improváveis de ocorrerem apenas por acaso.

Figura 45 – Resistência à Tração com variação da quantidade de nióbio.



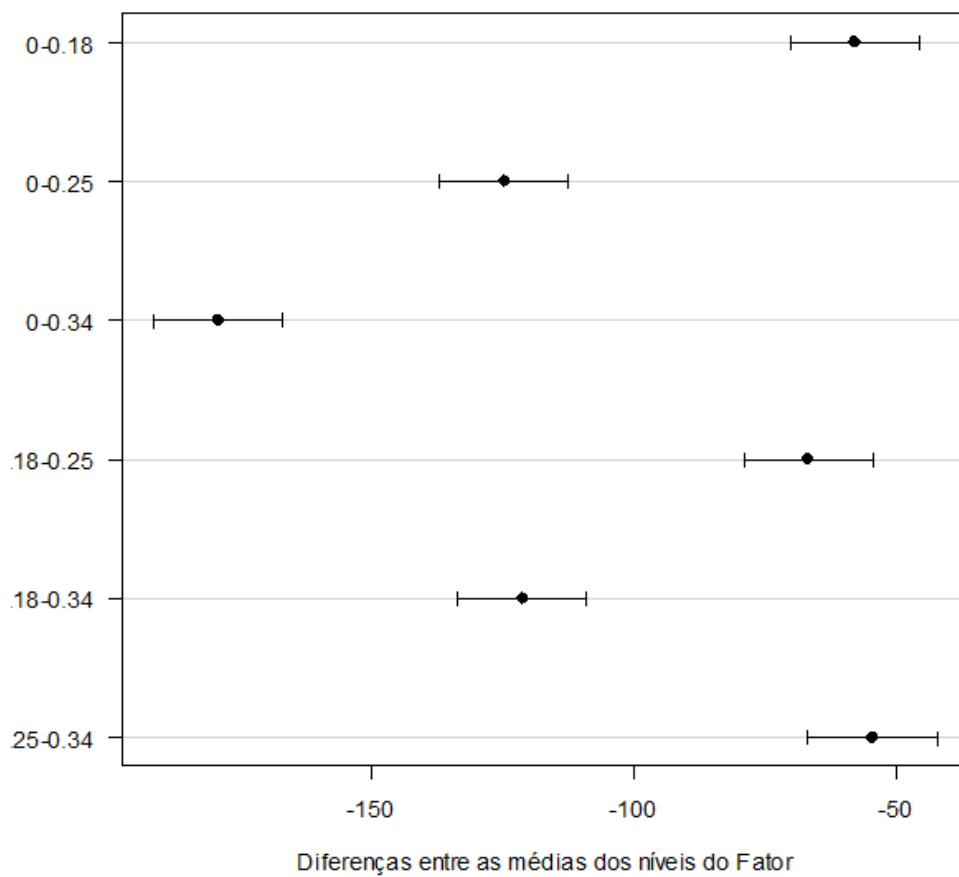
Fonte: O autor (2024)

Na Figura 46 é demonstrado o teste de Fisher de Resistência à Tração (MPa).

Figura 46 - Teste de Fisher para Resistência à Tração

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
0-0.18	-58	-70,3	-45,7	0
0-0.25	-124,9	-137,2	-112,6	0
0-0.34	-179,5	-191,8	-167,2	0
0.18-0.25	-66,9	-79,2	-54,6	0
0.18-0.34	-121,5	-133,8	-109,2	0
0.25-0.34	-54,6	-66,9	-42,3	0

Intervalos de Confiança (95%)



Fonte: O autor (2024)

Na Tabela 24 são apresentados os resultados de resistência ao escoamento.

Tabela 24 – Resultados de resistência ao escoamento

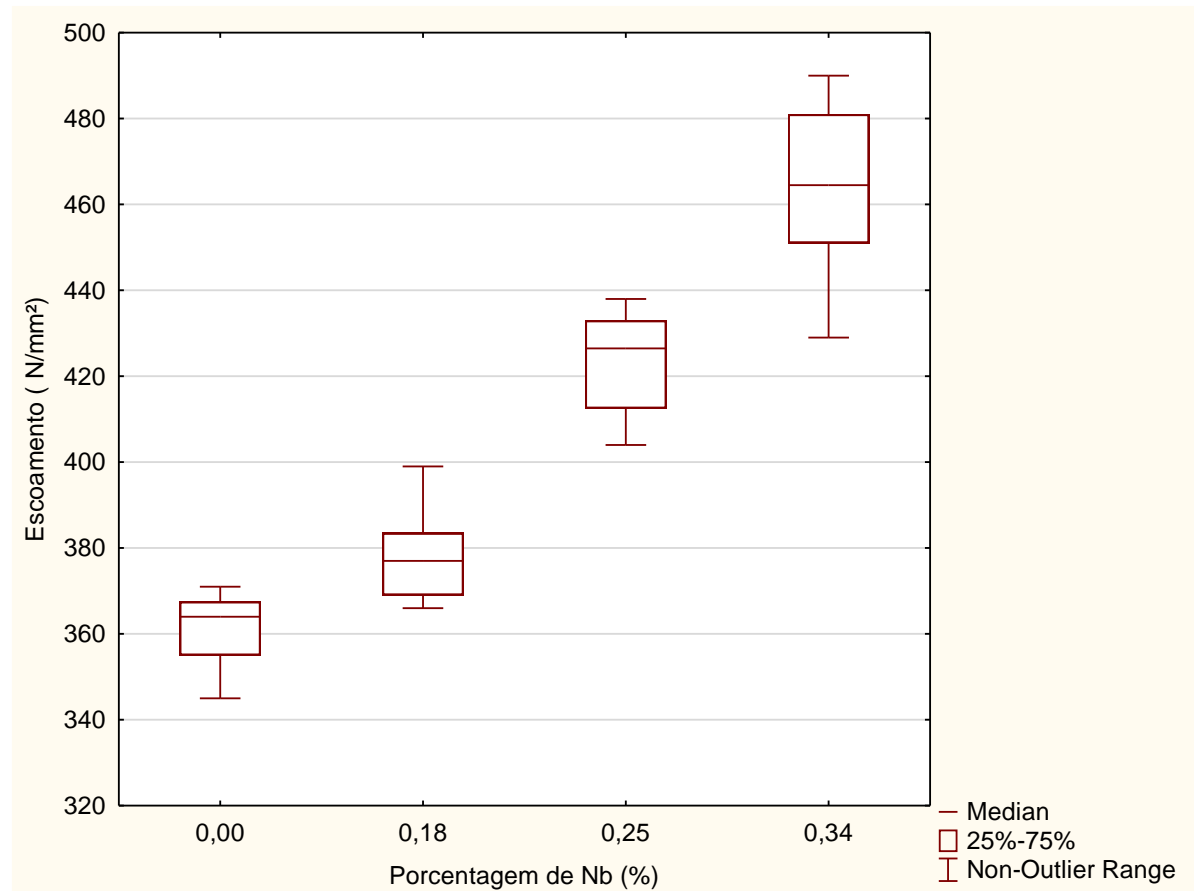
<b>Resistência ao Escoamento (MPa)</b>			
0,0 %Nb	0,18 %Nb	0,25 %Nb	0,34 %Nb
367	380	438	438
368	368	426	430
351	373	426	429
364	382	405	448
362	390	432	470
351	398	432	459
351	381	410	490
371	366	437	459
366	399	437	477
362	387	434	470
365	377	404	483
364	369	405	487
368	385	427	450
364	369	412	456
370	375	438	479
366	382	430	490
370	377	413	455
351	376	431	476
345	369	414	483
359	369	419	452

Fonte: O autor (2024)

Wang *et al* (2022, p.9), em seu estudo, observaram o aumento na resistência ao escoamento com adições de nióbio. O mesmo efeito foi observado por Souza (2012, p.100) e por Pereira *et al* (2006, p.3). No entanto, é importante ressaltar que os valores dos ensaios mecânicos para composições com adições similares de nióbio podem variar em função da presença e interação de outros elementos químicos na liga.

Na Figura 47 é ilustrado o gráfico de resistência ao escoamento *versus* a quantidade de nióbio utilizada.

Figura 47 – Resistência ao escoamento com variação da quantidade de nióbio.



Fonte: O autor (2024)

Para avaliar a influência das diferentes concentrações de nióbio (0%, 0,18%, 0,25 % e 0,34%) na resistência ao escoamento, foi realizada uma análise de variância (ANOVA). Os resultados apresentaram um valor de F superior ao valor crítico de F, com diferenças importantes entre as médias de resistência ao escoamento para as concentrações apresentadas. Portanto quando o valor-p for menor que 0,05 indica que a hipótese nula (igualdade entre as médias) não é estatisticamente significativa para uma confiança de 95 % estabelecida. No APÊNDICE R é demonstrada a análise completa de ANOVA.

O teste de Fisher foi realizado para comparar a resistência ao escoamento entre as diferentes concentrações de nióbio (0 %, 0,18 %, 0,25 % e 0,34 %) no ferro fundido nodular. Os resultados revelaram valores de p iguais a 0 em todas as comparações, indicando que as diferenças entre as médias das concentrações são estatisticamente significativas, o que demonstra que essas variações não variam por acaso.

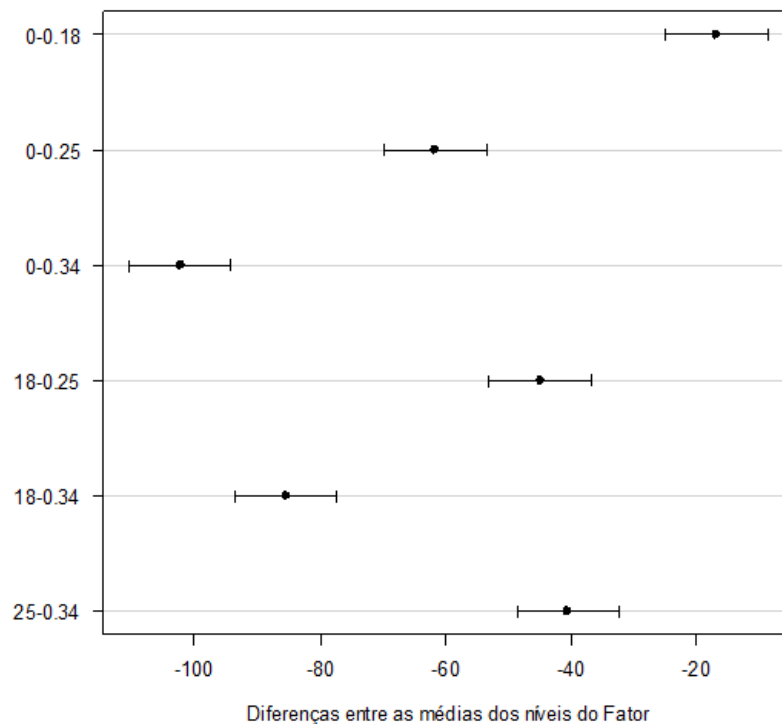
Além disso, as comparações apontaram para uma região negativa no gráfico, indicando uma tendência específica nos efeitos do nióbio sobre a resistência ao escoamento. Esses resultados indicam que o aumento na concentração de nióbio promove uma alteração significativa e consistente na propriedade de resistência ao escoamento do material, reforçando o papel desse elemento na melhoria da resistência mecânica do ferro fundido nodular. Assim, o teste de Fisher complementa os achados da ANOVA, confirmando a influência relevante do nióbio nessa propriedade essencial para aplicações estruturais.

Na Figura 48 é demonstrado o teste de Fisher para resistência ao escoamento.

Figura 48 - Teste de Fisher para Resistência ao Escoamento

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
0-0.18	-16,85	-25	-8,7	0,0001
0-0.25	-61,75	-69,9	-53,6	0
0-0.34	-102,3	-110,45	-94,15	0
0.18-0.25	-44,9	-53,05	-36,75	0
0.18-0.34	-85,45	-93,6	-77,3	0
0.25-0.34	-40,55	-48,7	-32,4	0

Intervalos de Confiança (95%)



Fonte: O autor (2024)

Na Tabela 25 são apresentados os resultados de alongamento medidos após a ruptura do corpo de prova.

Tabela 25 – Resultados de alongamento após fratura

Alongamento (%)			
0,0 %Nb	0,18 %Nb	0,25 %Nb	0,34 %Nb
11,90	10,3	6,7	5,9
11,80	9,6	6,3	6,8
14,00	9,1	6,9	6,8
10,00	10,9	6	6,6
12,60	10,5	6,2	5,1
14,00	9,2	6,4	6,6
11,00	10,9	5,8	5,1
13,80	10,8	6	5,9
13,00	10,5	6,8	5,1
13,20	10,2	6,8	5,4
13,30	10,9	6,8	5,8
14,20	10,7	7,8	6,8
11,40	9,4	6,8	6,0
10,60	9,0	6,4	6,9
14,70	10,7	6,8	6,1
11,50	10,2	7,3	6,2
12,40	9,4	7,6	5,4
9,60	10,6	6,9	6,5
9,70	10,6	6,5	6,3
9,70	10,6	7,7	6,7

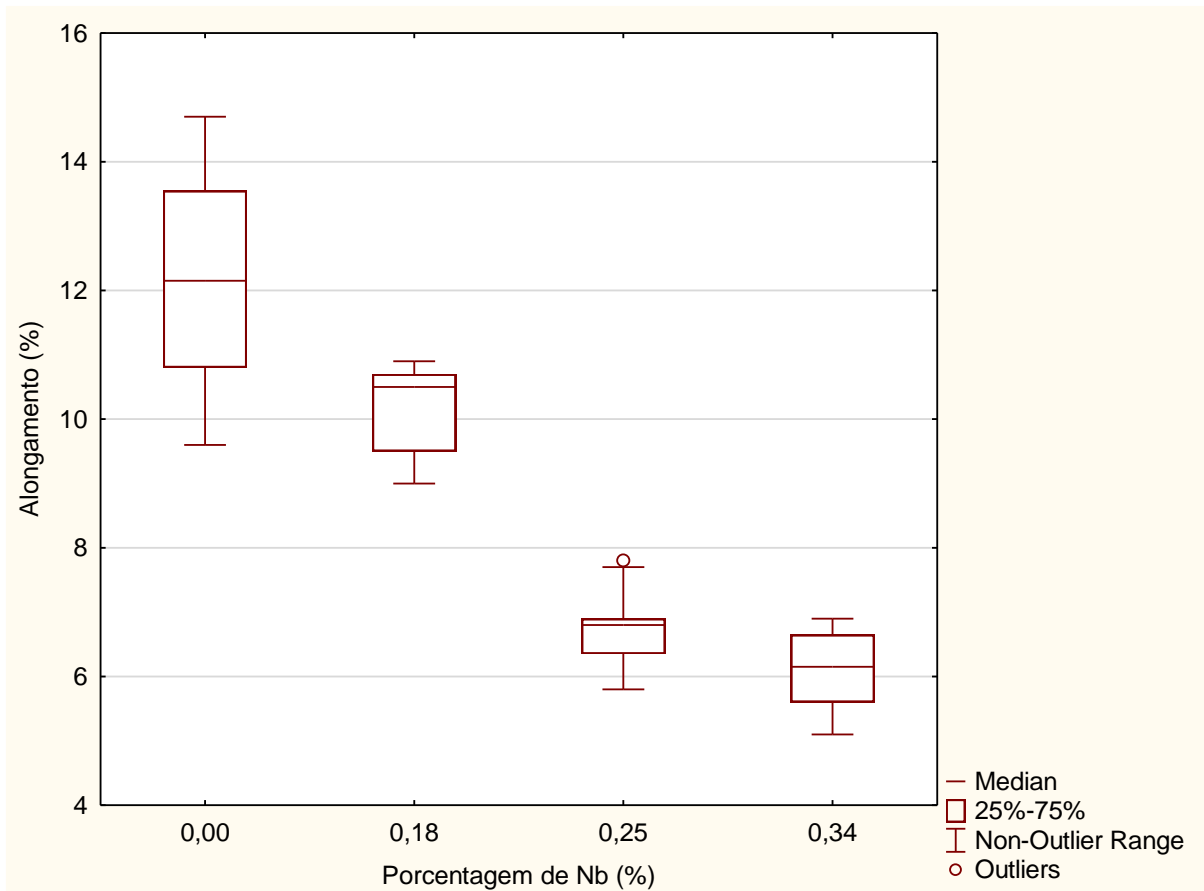
Fonte: O autor (2024)

Wang *et al* (2022, p.9), em seu estudo, observaram a redução do alongamento (medido após a fratura) com adições de nióbio, da mesma forma que Souza (2012, p.100).

O ferro fundido nodular é amplamente utilizado em aplicações que exigem alta tenacidade ou ductilidade, enquanto a presença de carbonetos maciços é indesejável nessa liga. Observa-se, de maneira geral, que o aumento da resistência do material está frequentemente associado a uma redução em sua ductilidade ou tenacidade, estabelecendo um equilíbrio crítico entre essas propriedades (Bedolla-Jacuinde, 2016, p. 200).

Na Figura 49 é ilustrado o gráfico de alongamento *versus* a quantidade de nióbio utilizada.

Figura 49 - Alongamento com variação da quantidade de nióbio



Fonte: O autor (2024)

Uma análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar a influência das diferentes concentrações de nióbio (0 %, 0,18 %, 0,25 % e 0,34 %) para o parâmetro alongamento. Os resultados indicaram um valor F superior ao valor crítico de F, evidenciando diferenças significativas entre as médias de alongamento das amostras com concentrações específicas de nióbio. Além disso, o valor-p foi inferior a 0,05, reforçando a eliminação da hipótese nula e diminuindo que as variações de nióbio, impactam significativamente o alongamento do material. No APÊNDICE S é demonstrada a análise completa de ANOVA.

Com os resultados, foi possível observar que a adição de nióbio influencia, de forma consistente e significativa, na capacidade de deformação do ferro fundido nodular com nióbio. As diferenças observadas nas taxas de alongamento indicam que o nióbio contribui para alterar as propriedades de ductilidade do material.

O teste de Fisher foi utilizado para avaliar a significância das diferenças no alongamento das amostras com concentrações de nióbio de (0 %, 0,18 %, 0,25 % e

0,34 %). Os resultados indicaram valores de  $p$  iguais a 0 para a maioria das comparações, demonstrando diferenças estatisticamente significativas entre essas concentrações, o que confirma que o efeito do nióbio no alongamento é real e dificilmente atribuível ao acaso. No entanto, para a comparação específica entre as concentrações de 0,25 % e 0,34 %, o valor- $p$  foi de 0,048, muito próxima ao nível de significância de 0,05, comparando que a diferença entre essas concentrações também é significativa, mas menos acentuada. Esse resultado sugere que a adição de nióbio no ferro fundido nodular pode ter algum efeito nas propriedades de alongamento, mas a significância não é suficientemente robusta para confirmar a influência nas faixas de 0,25 % a 0,34 % com confiança total. Assim, é necessário interpretar esses dados com cautela, considerando possíveis variabilidades experimentais e a proximidade ao limite de significância.

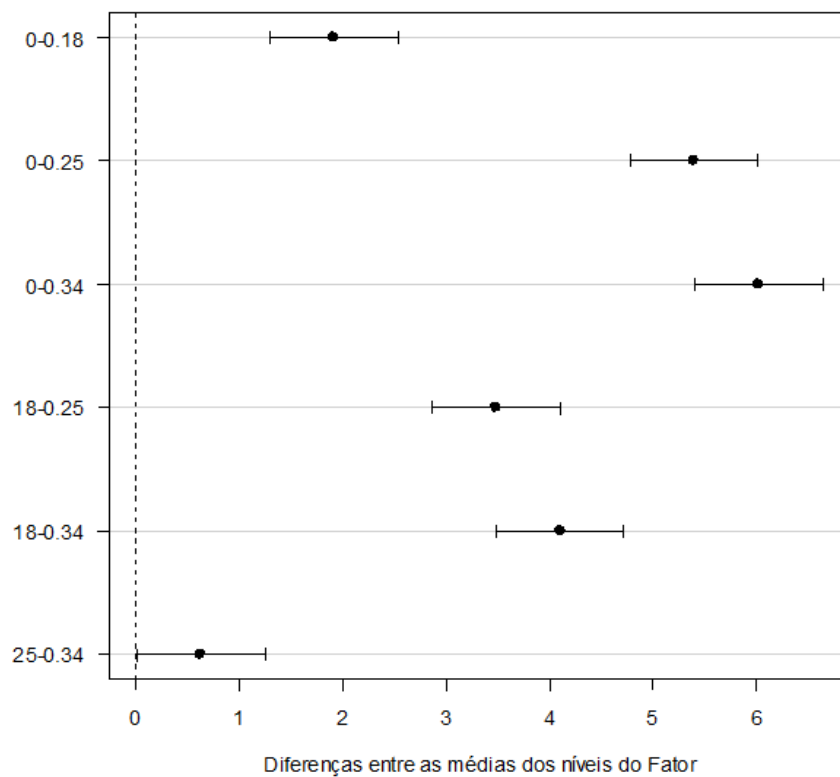
Na Figura 50 é demonstrado o teste de Fisher para a medida de alongamento.

Os resultados demonstram que há uma tendência de redução do alongamento com o aumento da concentração de nióbio, embora o efeito seja menos pronunciado entre 0,25 % e 0,34 %. O teste de Fisher, portanto, confirma a influência consistente e significativa do nióbio sobre os alongamentos do ferro fundido nodular, demonstrando que, à medida que a concentração de nióbio aumenta, ocorre uma redução na ductilidade do material.

Figura 50 – Teste de Fisher para alongamento pós-ruptura

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
0-0.18	1,915	1,3	2,53	0
0-0.25	5,395	4,8	6,01	0
0-0.34	6,02	5,4	6,64	0
0.18-0.25	3,48	2,9	4,1	0
0.18-0.34	4,105	3,5	4,72	0
0.25-0.34	0,625	0	1,24	0,048

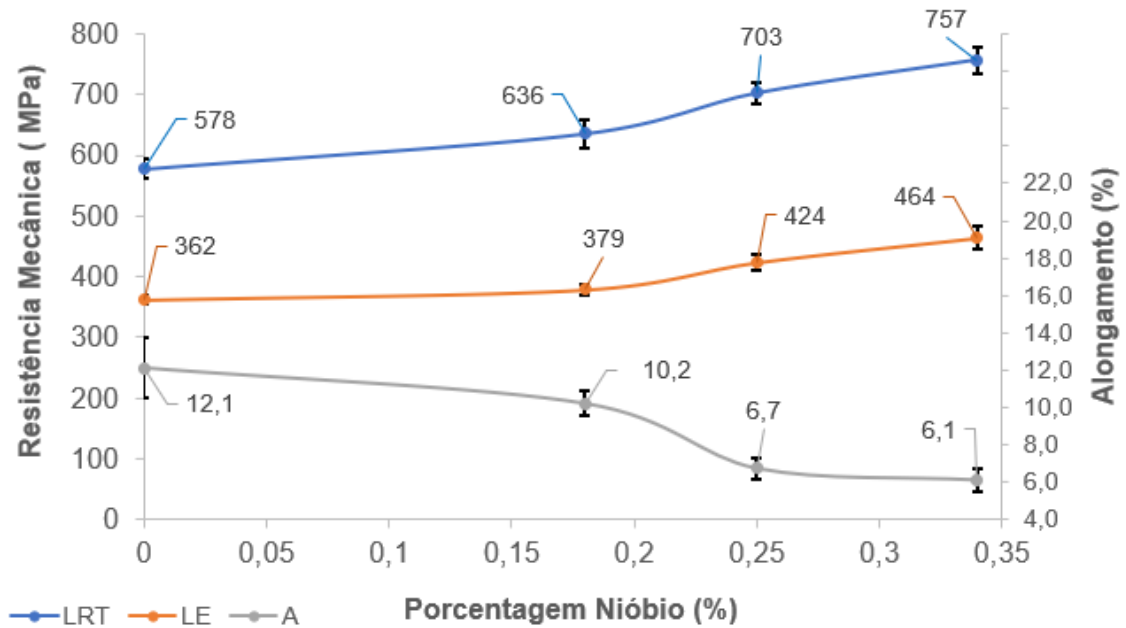
Intervalos de Confiança (95%)



Fonte: O autor (2024)

A Figura 51 mostra os valores médios obtidos de resistência a tração, resistência ao escoamento e alongamento da liga sem e com Nióbio, para ter mais clareza das tendências das propriedades obtidas.

Figura 51 - Resistência à tração, Resistência ao escoamento e Alongamento



Fonte: O autor (2024).

Os valores absolutos obtidos para resistência à tração, resistência ao escoamento e alongamento apresentam diferenças em relação aos encontrados na literatura. Essa variação ocorre, principalmente, devido às diferenças na composição química das ligas avaliadas, uma vez que a presença e a concentração de outros elementos, além do nióbio, influenciam significativamente as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. Fatores como o teor de carbono equivalente, a microestrutura resultante do processo de solidificação e a interação entre os elementos de liga podem impactar diretamente os resultados dos ensaios mecânicos.

Na Tabela 26 são apresentados os resultados de dureza Brinell.

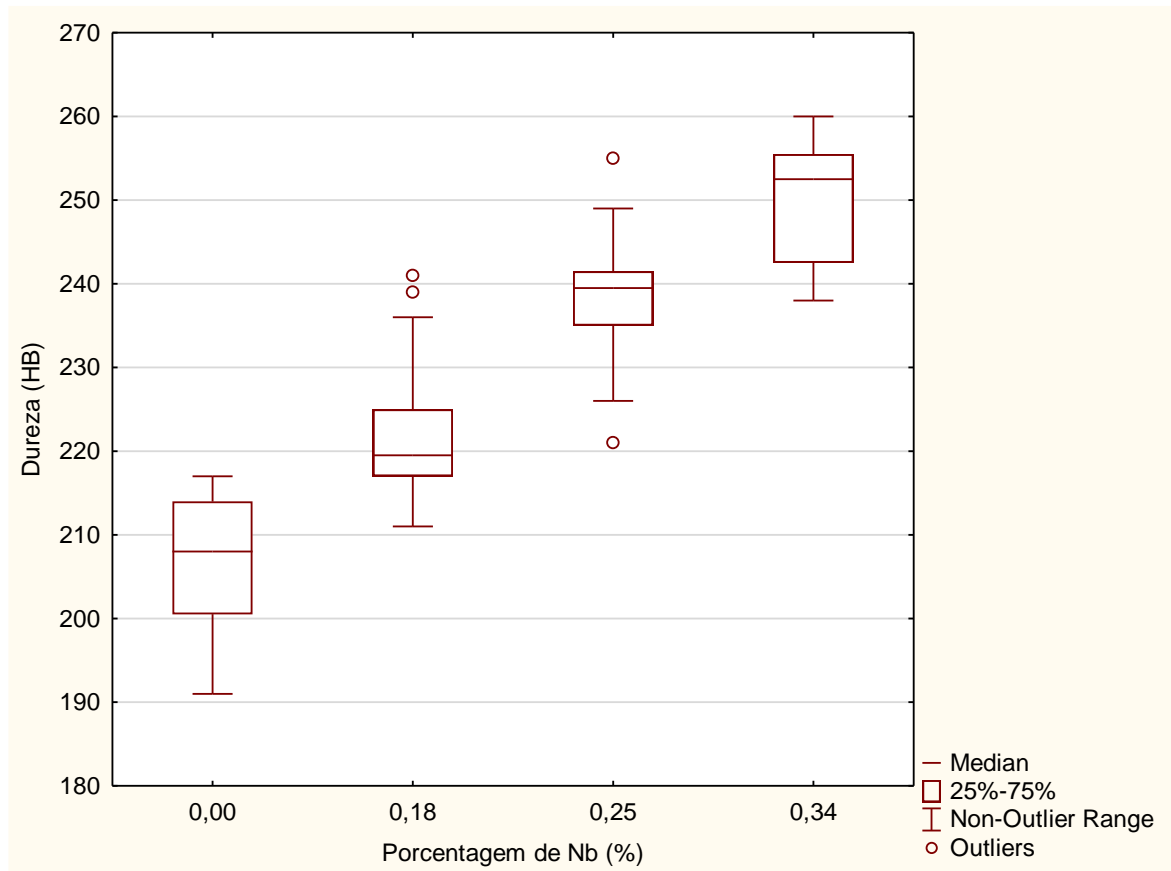
Tabela 26 – Resultados de dureza Brinell

Dureza (HB)			
0,0 %Nb	0,18 %Nb	0,25 %Nb	0,34 %Nb
215	215	241	260
217	217	242	255
215	217	245	255
213	219	240	256
207	215	221	239
213	217	234	242
211	219	234	239
207	222	236	260
209	219	236	255
195	220	239	251
197	241	249	256
204	223	255	243
207	222	226	253
209	224	229	254
191	211	238	256
195	215	240	239
197	236	241	246
204	239	242	252
215	226	239	243
217	229	241	238

Fonte: O autor (2024).

Wang *et al* (2022, p.9), em seu estudo, observaram o aumento na dureza com adições de nióbio, da mesma forma que Souza (2012, p.100). A Figura 52 mostra o gráfico com os resultados de dureza médios em relação à composição da liga com e sem Nióbio. No gráfico *boxplot* da dureza HB, foram identificados alguns pontos *outliers*, indicando valores significativamente diferentes da distribuição central dos dados. Esses *outliers* podem estar relacionados a variações microestruturais no material, diferenças na distribuição dos elementos de liga, segregação de fases ou até pequenas inconsistências no processo de medição. Além disso, fatores como a presença de carbonetos, heterogeneidade na grafitização ou variações na taxa de resfriamento durante a solidificação podem influenciar localmente a dureza, resultando nesses desvios.

Figura 52 - Resultado de dureza x porcentagem de nióbio



Fonte: O autor (2024).

Para avaliar a influência das diferentes concentrações de nióbio (0 %, 0,18 %, 0,25 % e 0,34 %) na dureza Brinell, foi aplicada uma análise de variância (ANOVA). Os resultados obtidos mostraram um valor F superior ao valor crítico de F, com diferenças significativas entre as médias de dureza para as concentrações apresentadas. Além disso, os valores de p foram inferiores a 0,05, reforçando a eliminação da possibilidade nula e demonstrando que a variação nas concentrações de nióbio afeta significativamente a dureza do material. No APÊNDICE T é demonstrada a análise completa de ANOVA.

Com os resultados, foi possível observar que o aumento na concentração de nióbio contribui para o aprimoramento da dureza Brinell, com diferenças claras entre as amostras. A ANOVA confirma, assim, a hipótese de que o nióbio influencia de forma significativa essa propriedade mecânica.

O teste de Fisher foi aplicado para analisar as diferenças na dureza Brinell entre as concentrações de nióbio (0 %, 0,18 %, 0,25 % e 0,34 %). Os resultados obtiveram

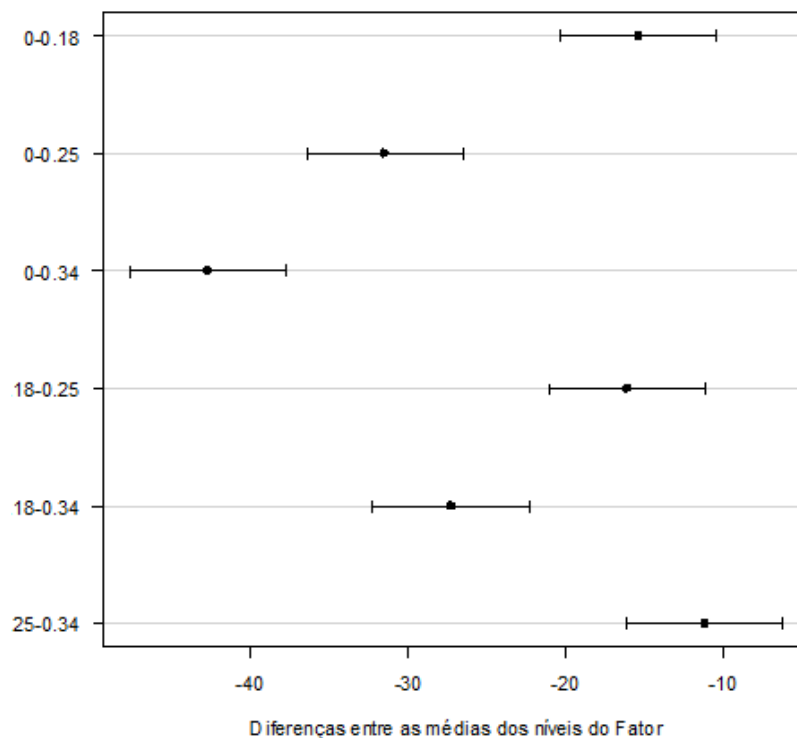
valores de p iguais a 0 em todas as comparações, indicando que as diferenças entre as médias das concentrações são estatisticamente significativas, o que sugere que essas variações na dureza não ocorrem por acaso. A significância estatística observada confirma a influência real do nióbio sobre a dureza do material.

Além disso, as comparações de Fisher situaram-se em uma região negativa no gráfico, diminuindo uma tendência consistente nos efeitos do aumento do teor de nióbio sobre a dureza Brinell. Esses resultados sugerem que o acréscimo de nióbio está associado a um aumento da dureza. Na Figura 53 é demonstrado o teste de Fisher de dureza HB.

Figura 53 – Teste de Fisher Dureza Brinell

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
0-0.18	-15,4	-20,36	-10,44	0
0-0.25	-31,5	-36,46	-26,54	0
0-0.34	-42,7	-47,66	-37,74	0
0.18-0.25	-16,1	-21,06	-11,14	0
0.18-0.34	-27,3	-32,26	-22,34	0
0.25-0.34	-11,2	-16,16	-6,24	0

Intervalos de Confiança (95%)



Fonte: O autor (2024).

A Tabela 27 ilustra os valores obtidos de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy.

Tabela 27 – Resultados de Resistência ao Impacto Charpy

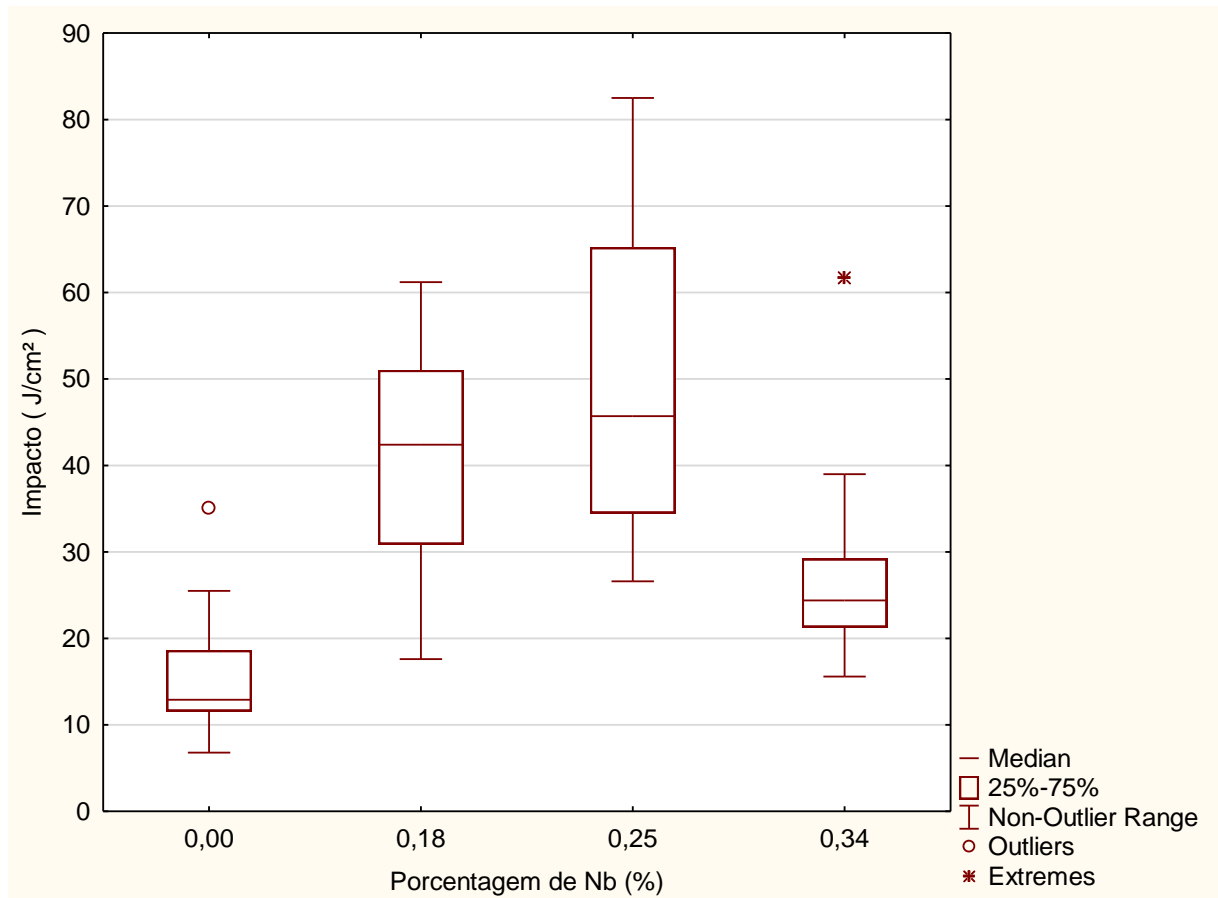
<b>Energia Absorvida (J/cm<sup>2</sup>)</b>			
0,0 % Nb	0,18% Nb	0,25% Nb	0,34% Nb
9,8	26,4	55,2	31,2
20,6	47	82,5	15,6
11,9	53,5	58,7	29,2
25,5	56,7	34,5	21,3
14,7	51	67,4	26,2
10,7	61,2	36,3	21,6
18,6	17,6	40,6	26,9
6,8	42,4	31,2	27,3
14,1	37,6	57,7	22,6
12,2	22,1	31,3	22,6
21,3	32,2	44,1	38,7
12,9	17,6	45,7	24,4
14,2	43,6	65,2	21,2
11,2	53,1	76,5	16,7
11,7	46,2	28,6	39
11,6	35	26,6	17,7
35,1	30,9	77,6	61,7

Fonte: O autor (2024).

A Figura 54 mostra o gráfico com os resultados de impacto *versus* a quantidade de nióbio utilizada.

O aumento do teor de nióbio no ferro fundido pode influenciar diretamente a energia absorvida pelo material. Observou-se que, até um teor de 0,25 % de nióbio, houve um aumento na energia de impacto, indicando uma possível melhora nas propriedades mecânicas. No entanto, a partir desse limite, a energia absorvida começou a diminuir. Essa redução pode estar relacionada ao aumento da quantidade de perlita na microestrutura, um constituinte menos tenaz que a ferrita, o que torna o material mais suscetível à fratura. Além disso, a formação de carbonetos de nióbio em excesso pode contribuir para a fragilização do material, reduzindo sua capacidade de absorver energia. Dessa forma, a substituição parcial da ferrita pela perlita e a possível influência dos carbonetos explicam a queda na tenacidade em teores mais elevados de nióbio (Souza, 2012, p.117).

Figura 54 - Resultado do ensaio Charpy x porcentagem de nióbio



Fonte: O autor (2024).

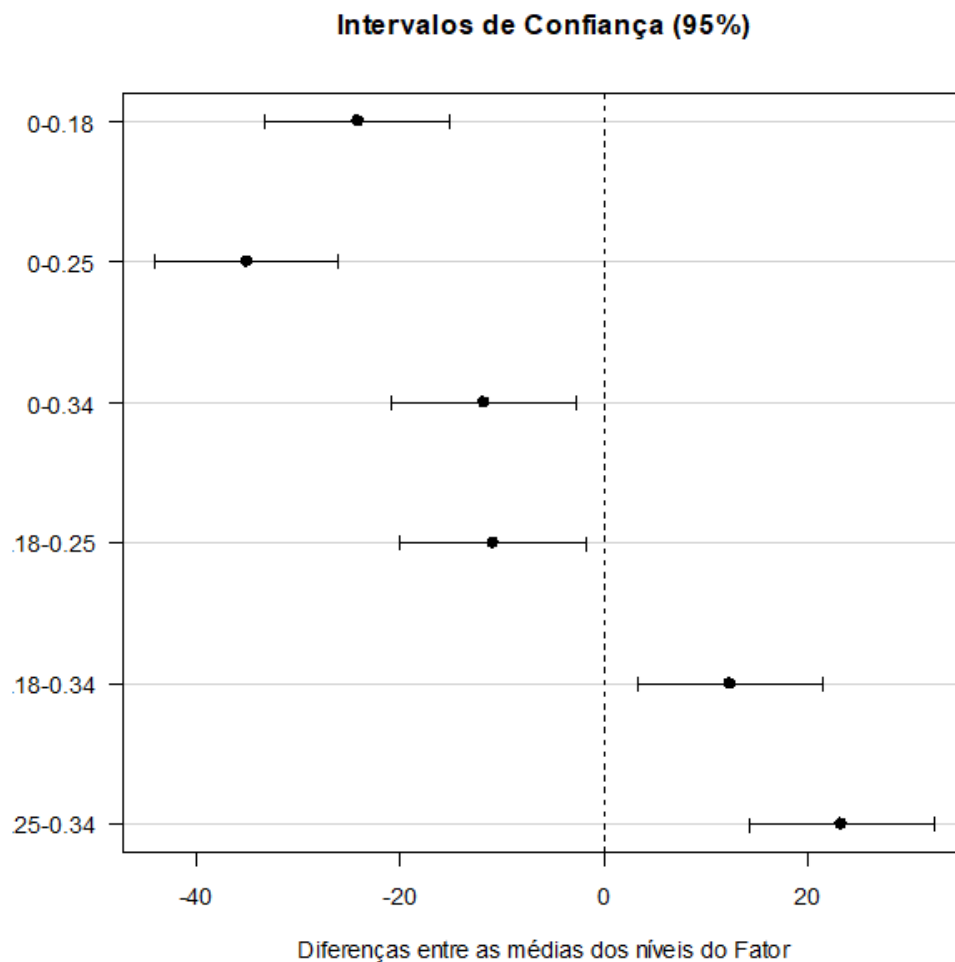
Segundo Pereira *et al.* (2006, p. 2723), a introdução de nióbio em ligas de ferro fundido tende a reduzir suas propriedades de impacto, com uma queda acentuada na energia absorvida. Em uma adição de 0,2 % de nióbio, os autores observaram que a energia de impacto diminuiu cerca de 40 % em comparação com o ferro fundido base. No entanto, teores superiores a 0,2 % não se produziu uma variação significativa nessa propriedade, até que se atingissem concentrações mais altas. Não está claro o motivo de ter ocorrido esta discrepância desse trabalho com o aumento da resistência ao impacto em teores até 0,25 % em comparação aos citados autores. Influência na inoculação, na composição química do ferro fundido base e na distribuição homogênea dos precipitados podem ter influência nessa discrepância observada.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar a influência das diferentes concentrações de nióbio (0 %, 0,18 %, 0,25 % e 0,34 %) na resistência ao impacto. Os resultados demonstraram um valor F de 22, superior ao valor crítico de F (2,74), indicando que as diferenças entre as médias das concentrações de nióbio são

estatisticamente significativas. Além disso, os valores de p foram inferiores a 0,05, reforçando a contaminação da hipótese nula e evidenciando que as variações nas concentrações de nióbio afetam de maneira significativa a resistência ao impacto. No APÊNDICE U é exposta a análise completa de ANOVA.

Figura 55 – Teste de Fisher para energia absorvida no ensaios de Impacto Charpy

<i>Diferença entre Níveis</i>	<i>Média</i>	<i>LI</i>	<i>LS</i>	<i>P-Valor</i>
0-0.18	-24,18823529	-33,26	-15,12	0
0-0.25	-35,10588235	-44,18	-26,03	0
0-0.34	-11,82352941	-20,9	-2,75	0,0114
0.18-0.25	-10,91764706	-19,99	-1,85	0,0191
0.18-0.34	12,36470588	3,29	21,44	0,0083
0.25-0.34	23,28235294	14,21	32,35	0



Fonte: O autor (2024).

O teste de Fisher foi realizado para investigar quais especificações específicas de nióbio (0 %, 0,18 %, 0,25 % e 0,34 %) causam diferenças significativas na resistência ao impacto. Na Figura 55 é demonstrado o teste de Fisher de Resistência ao impacto Charpy.

A seguir, são apresentados os valores obtidos para cada faixa de comparação entre as concentrações de nióbio:

- 0 % e 0,18 % de nióbio: Valor de  $p = 0$ , indicando diferença estatisticamente significativa.
- 0 % e 0,25 % de nióbio: Valor de  $p = 0$ , reforçando uma diferença altamente significativa.
- 0 % e 0,34 % de nióbio: Valor de  $p = 0,0114$ , indicando diferença estatisticamente significativa.
- 0,18 % e 0,25 % de nióbio: Valor de  $p = 0,0191$ , apontando diferença estatisticamente significativa.
- 0,18 % e 0,34 % de nióbio: Valor de  $p = 0,0083$ , confirmando uma diferença estatisticamente significativa.
- 0,25 % e 0,34 % de nióbio: Valor de  $p = 0$ , indicando diferença altamente significativa.

Esses resultados mostram que as concentrações de nióbio impactam significativamente a resistência ao impacto em todas as comparações realizadas, com valores de  $p$  abaixo de 0,05 para todos os pares analisados.

#### 4.6 RESULTADOS DE PROPRIEDADES DO ESTUDO DE CASO

O item do estudo de caso é uma peça produzida com frequência, cujos resultados médios de análise estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados do estudo de caso sem adição de Nióbio

<b>Alongamento (%)</b>	<b>Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Resistência ao Escoamento (MPa)</b>	<b>Dureza (HB)</b>
9	560	380	215
10	555	375	218
10	565	373	220
8	552	372	223
7	551	374	225

Fonte: O autor (2024)

Em aplicações que requerem tenacidade ou ductilidade, o ferro fundido nodular é frequentemente utilizado, pois a presença de carbonetos maciços é indesejável para essa liga. Geralmente, observa-se que um aumento na resistência do material tende a reduzir sua ductilidade ou tenacidade (Bedolla-Jacuinde, 2016, p. 200).

Com a adição do nióbio em 0,34 % em massa a composição química final foi a mesma da amostra 4 citada na

Tabela 22 e, conforme esperado, o alongamento foi afetado. Porém a resistência à tração, resistência de escoamento e dureza aumentaram e os resultados são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Resultados do estudo de caso com adição de 0,34 % de Nióbio

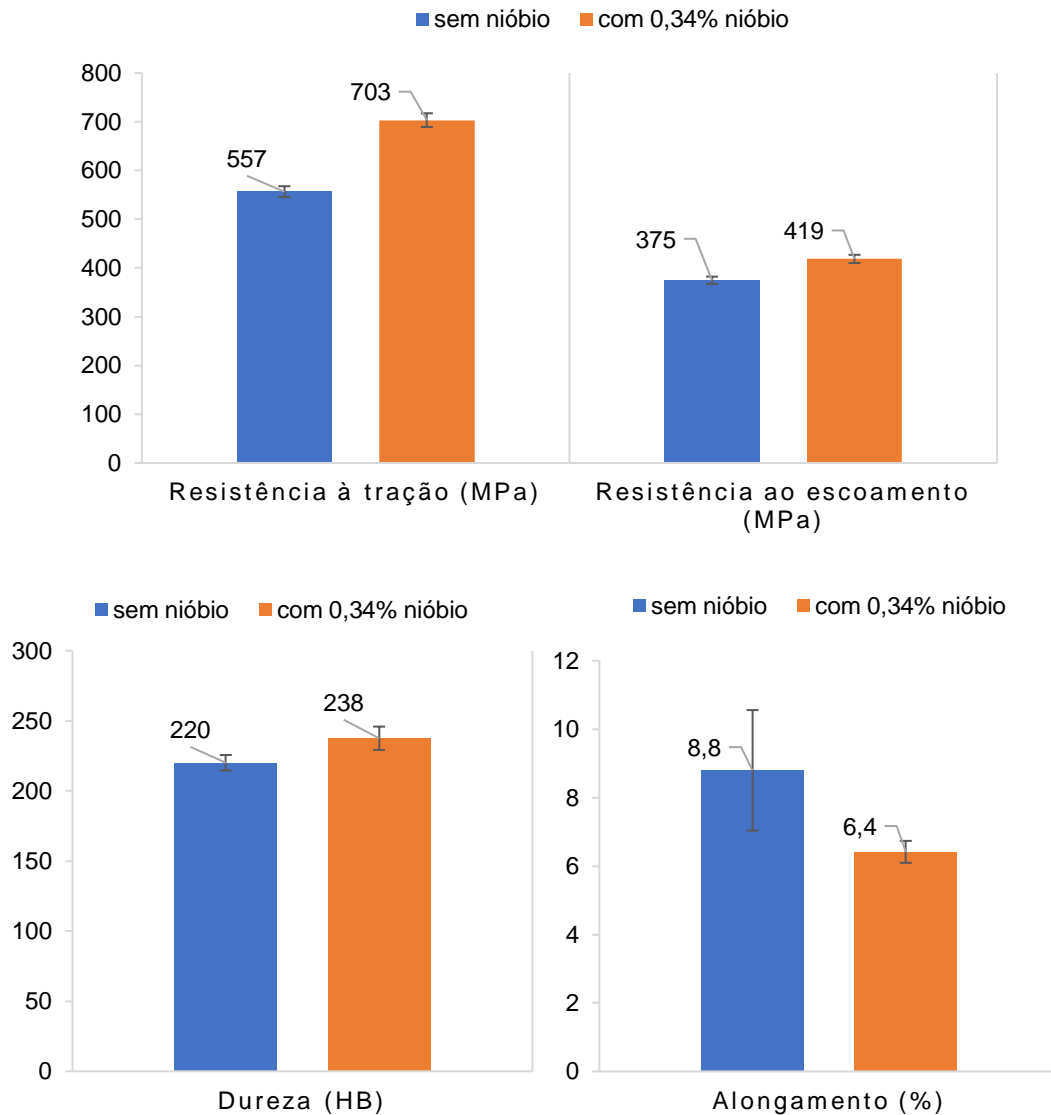
<b>Alongamento (%)</b>	<b>Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Resistência ao Escoamento (MPa)</b>	<b>Dureza (HB)</b>
6,5	705	420	234
6,3	708	422	244
6,5	700	415	232
6,5	701	418	236
6,6	700	415	234
6,1	706	422	246

Fonte: O autor (2024)

Na Figura 56 é ilustrado o comparativo do estudo de caso com e sem nióbio.

No APÊNDICE O é mostrado um resumo das análises da peça (estudo de caso).

Figura 56 – Comparativo do estudo de caso com e sem nióbio



Fonte: O autor (2024).

#### 4.7 DISCUSSÕES SOBRE RESULTADOS

A seguir, é feita uma análise individual por propriedade analisada.

- **Avaliação da Resistência à Tração, Resistência ao Escoamento e Dureza**

Nos ensaios de resistência à tração, é relatado um aumento específico nos valores de resistência com adição de nióbio.

Wang *et al* (2022, p.8) observaram que o Nióbio aumenta o teor de perlita e diminui o espaçamento lamelar da perlita e tem pouco efeito no diâmetro da ferrita.

Em termos de números, o incremento da resistência à tração foi de aproximadamente 30 % para as amostras com teor de 0,34 % de nióbio em relação às amostras sem adição. Esse aumento é atribuído à capacidade do nióbio de formação de carbonetos de nióbio e de perlita.

No que se refere à resistência ao escoamento, a adição de nióbio contribuiu para um aumento expressivo nos valores desta propriedade do material. Esse incremento indica que o ferro fundido nodular com nióbio é capaz de suportar maiores esforços antes de ocorrer a deformação plástica. Esse efeito é atribuído à capacidade do nióbio de formar uma matriz mais resistente e pelos precipitados, dificultando o movimento de discordâncias. Em termos de números, o incremento do escoamento foi de aproximadamente 28 % para as amostras com teor de 0,34 % de nióbio em relação às amostras sem adição.

Os ensaios de dureza também indicaram um comportamento favorável com a incorporação do nióbio. A dureza Brinell das amostras sem nióbio foi significativamente inferior às amostras com o elemento, especialmente na faixa de 0,25 % e 0,34 % de adição. A dureza aumentou em média 20 % quando comparada com as amostras sem nióbio. Esse aumento reflete diretamente a influência do nióbio na formação de perlita na matriz, bem como a precipitação de carbonetos, o que eleva a resistência ao desgaste e a capacidade de suportar cargas aplicadas.

Os resultados obtidos indicam que o nióbio atua na transformação da microestrutura ferrítica para uma matriz com maior quantidade de perlita, aumentando a dureza e, conseqüentemente, a resistência ao desgaste das peças. Dessa forma, o uso do nióbio torna-se atraente em aplicações que proporcionam maior durabilidade e resistência superficial.

- **Alongamento**

A ductilidade foi impactada pela adição de nióbio, resultando em uma redução no alongamento. Esse efeito é típico de materiais que apresentam aumento de resistência, onde há um comprometimento da deformação plástica. No entanto, para aplicações que exigem alta resistência mecânica e não priorizam um alto nível de deformabilidade, essa perda de ductilidade é aceitável.

- **Análise da Microestrutura**

A análise microestrutural demonstrou que a adição de nióbio alterou a distribuição das fases no ferro fundido nodular. A quantidade de ferrita foi reduzida, enquanto a perlita aumentou com o aumento do teor de nióbio. Essa transformação é benéfica para a maioria das aplicações industriais, uma vez que a perlita é uma fase mais resistente que a ferrita.

Os dados obtidos indicam que a adição de nióbio não interferiu negativamente na formação do ferro fundido nodular. Essa conclusão é evidenciada pela presença de grafita esferoidal em todas as amostras analisadas, mesmo com diferentes teores de nióbio. A morfologia característica da grafita demonstra que o processo de nodularização foi eficaz, mantendo a estrutura desejada do material. Assim, o nióbio pode ser incorporado sem comprometer a qualidade estrutural do ferro fundido nodular.

- **Avaliação da energia absorvida no ensaio de impacto**

Com base nos resultados obtidos, foi possível observar que o teor de nióbio tem um impacto significativo na resistência ao impacto do ferro fundido nodular. Os testes estatísticos realizados, incluindo a ANOVA e o teste de Fisher, confirmaram a influência desse elemento nas diferentes concentrações avaliadas. O teste de ANOVA apresentou valores de  $p$  abaixo de 0,05, indicando que as diferenças entre as médias dos grupos são estatisticamente significativas.

Adicionalmente, o teste de Fisher demonstrou que as concentrações de 0 % para 0,18 %, 0 % para 0,25 %, 0 % para 0,34 %, 0,18 % para 0,25 %, 0,18 % para 0,34 % e 0,25 % para 0,34 % apresentaram diferenças significativas.

Embora tenha sido observada uma queda na resistência ao impacto na concentração de 0,34%, o valor de  $p = 0$  na comparação com 0,25 % indica que a diferença é estatisticamente relevante. Isso pode ser explicado por um possível efeito de fragilização pelo excesso de carboneto de nióbio primário ou outras alterações microestruturais que afetam negativamente as propriedades mecânicas em concentrações mais elevadas.

Portanto, os resultados reforçam a importância de identificar uma faixa ótima de concentração de nióbio para maximizar os benefícios na resistência ao impacto, evitando efeitos adversos que possam surgir em concentrações mais altas.

- **Análise por MEV e EDS**

Além das análises de propriedades mecânicas, foram realizadas análises microestruturais por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) para fornecer uma compreensão mais detalhada das alterações causadas pelo nióbio na matriz metálica.

As análises microestruturais por MEV e EDS forneceram uma visão complementar sobre os efeitos da adição de nióbio. A análise EDS confirmou a presença de precipitados de nióbio na matriz metálica. Além disso, a formação de precipitados ricos em nióbio foi associada ao aumento da dureza das amostras. Esses precipitados atuam como barreiras ao movimento de discordâncias, contribuindo para aumento de dureza, resistência ao escoamento, resistência a tração e com queda no alongamento.

- **Estudo de caso**

O estudo de caso envolvendo a produção de uma peça com adição de 0,34 % de nióbio demonstrou que essa quantidade proporcionou ganhos consideráveis nas propriedades mecânicas, como a resistência à tração, a resistência de escoamento e a dureza. Entretanto, a análise também revelou que o alongamento das amostras ficou fora das especificações normativas ilustradas na Tabela 18, diminuindo a ductilidade em virtude do aumento de precipitados e da formação de uma matriz predominantemente perlítica.

Embora o nióbio tenha trazido benefícios substanciais para a resistência do material, o alongamento observado sugere a necessidade de otimização dos teores de nióbio para alcançar um equilíbrio entre resistência mecânica e ductilidade. Nesse contexto, a recomendação é trabalhar com teores menores de nióbio, como 0,18 % ou 0,25 %, que apresentaram resultados mais promissores no que diz respeito à manutenção do alongamento dentro dos valores especificados pela norma. Dessa forma, seria possível obter uma peça com propriedades mecânicas aprimoradas e ainda atender aos requisitos normativos de ductilidade.

Além disso, a maior dureza alcançada pela adição de nióbio implica uma necessidade de reavaliação dos processos de usinagem das peças. O aumento da dureza pode resultar em um desgaste mais acentuado das ferramentas de corte e em um maior custo de utilização, devido à necessidade de configurações de corte específicas para materiais mais duros. Assim, antes de aplicar essa modificação em

uma escala industrial, é essencial testes adicionais de usinabilidade para garantir que a produção seja atualizada de maneira eficiente e econômica.

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resumo, o uso de nióbio em teores de até 0,34 % melhora as propriedades de resistência e dureza do ferro fundido nodular, mas deve-se considerar cuidadosamente os efeitos sobre o alongamento e a usinabilidade. Com ajustes nos teores de adição de nióbio, espera-se que as propriedades obtidas possam atender aos requisitos normativos, tornando a adição desse elemento uma alternativa viável para a produção de peças com desempenho superior e um custo-benefício atraente.

Outro aspecto importante a ser considerado é o custo elevado do nióbio, que pode ser um fator limitante para a produção em larga escala. A inclusão de nióbio na composição do ferro fundido nodular eleva os custos de matéria-prima, o que pode impactar a competitividade e a previsão econômica do processo em ambientes de produção industrial de grande volume. Por esse motivo, é necessário avaliar a relação custo-benefício de cada aplicação, considerando as melhorias nas propriedades mecânicas em comparação com o aumento de custos e as demandas de usinagem. Para efeito de comparação, são apresentados os custos por kg de alguns elementos perlitizantes comumente usados na fabricação de ferro fundido nodular (valores de outubro de 2024): cobre a R\$ 51,00; ferro-manganês a R\$ 6,25 e ferro-nióbio a R\$ 181,00.

Os resultados obtidos através do experimento demonstram que a adição de nióbio ao ferro fundido nodular teve um impacto significativo nas propriedades mecânicas analisadas, conforme evidenciado pelos testes estatísticos aplicados. A Análise de Variância (ANOVA) foi utilizada para comparar as médias das propriedades mecânicas (como resistência à tração, escoamento, alongamento, dureza e resistência ao impacto) entre as diferentes concentrações de nióbio (0 %, 0,18 %, 0,25 % e 0,34 %). Os resultados mostraram uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos, indicando que a variação na quantidade de nióbio influenciou diretamente as propriedades do material.

Para validar os resultados da ANOVA e verificar quais grupos apresentaram diferenças significativas, foi aplicado o teste de Fisher. Esse teste revelou que, em todas as proporções de nióbio utilizadas (0,18 %, 0,25 % e 0,34 %), houve um

aumento significativo nas propriedades mecânicas, como resistência à tração, escoamento e dureza, em comparação ao ferro fundido nodular sem adição de nióbio, No entanto, foi observada uma redução no alongamento do material com o aumento do teor de nióbio, cujo motivo já foi comentado.

Concluiu-se que a adição de nióbio ao ferro fundido nodular exerce uma influência significativa nas propriedades de resistência ao impacto, conforme evidenciado pelo ensaio Charpy e pela análise estatística realizada através do teste de Fisher. Pequenas adições de nióbio, como 0,18 % e 0,25 %, mostraram-se estratégias para melhorar a capacidade de absorção de energia de impacto, apresentando diferenças estatisticamente significativas em relação ao ferro sem nióbio. No entanto, o aumento do teor para 0,34 % sugere uma estabilização na propriedade de resistência ao impacto, indicando que concentrações maiores podem não gerar ganhos adicionais proporcionais.

As análises entre os teores intermediários (0,18 % e 0,25 %) sugerem efeitos mecânicos semelhantes, mas comparações entre 0,18 % e 0,34 %, assim como entre 0,25 % e 0,34 %, destacam a importância de se definir uma faixa ideal de nióbio. Essa faixa em torno de 0,25 % parece ser um ponto de transição para os benefícios de impacto, com concentrações mais altas promovendo alterações estruturais adicionais.

Em resumo, o estudo estatístico comprova que a adição de nióbio em teores de até 0,3 % promove uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular como resistência à tração, escoamento, dureza, mas com o efeito colateral de reduzir o alongamento do material.

Os resultados obtidos neste estudo mostram que a adição de nióbio ao ferro fundido nodular pode ser usada para a produção de peças com propriedades mecânicas superiores. A incorporação de nióbio, mesmo em teores de 0,18 % a 0,34 %, já promove melhorias significativas nas propriedades de resistência à tração, resistência ao escoamento e dureza, tornando o material mais competitivo para aplicações que exigem alto desempenho.

Desta forma, a utilização de nióbio em peças normalmente produzidas em ferro fundido nodular bruto de fusão é indicada para aumentar a vida útil das peças, reduzir custos de manutenção e melhorar o desempenho global das aplicações.

Por fim, observou-se que o nióbio é um elemento eficiente para o desenvolvimento de ligas de ferro fundido nodular de alta resistência, possibilitando a criação de materiais com desempenho superior e alinhados às demandas da indústria

metalúrgica moderna. A pesquisa abre caminhos para estudos futuros que exploram a otimização de teores de nióbio e outras modificações de elementos de liga para alcançar propriedades ainda mais específicas e direcionadas a aplicações tecnológicas de ponta.

## 5 CONCLUSÕES

A utilização de nióbio no ferro fundido nodular revelou-se uma estratégia eficiente para o aprimoramento de suas propriedades mecânicas. A adição desse elemento influenciou de forma positiva os resultados obtidos nas análises de resistência à tração, resistência ao escoamento, dureza, impacto e microestrutura. Essas modificações são especialmente relevantes para a indústria metalúrgica, que busca constantemente o desenvolvimento de ligas com desempenho superior.

Com base nos experimentos, pode-se afirmar que o nióbio é eficaz como um agente modificador, promovendo a formação de uma microestrutura mais resistente, contudo menos dúctil. As peças com diferentes teores de nióbio (0,18 %, 0,25 % e 0,34 %) apresentaram melhorias em comparação com o ferro fundido nodular bruto de fusão, caracterizando o elemento como um potencializador de resistência mecânica.

Este estudo se destaca por sua abordagem prática e aplicada, diferenciando-se dos trabalhos existentes na literatura para avaliar a incorporação de nióbio no ferro fundido nodular em um ambiente industrial real. A utilização de fornos de maior capacidade e moldes de areia com sistema completo de canalização permitiu uma análise mais representativa das condições de produção, considerando fatores essenciais como transferência de calor e solidificação. Além disso, a aplicação do material em uma peça com uso industrial, reforça os resultados obtidos, fornecendo dados diretamente à fabricação de componentes fundidos para a indústria automotiva e outras áreas.

## 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- **Estudo do comportamento do nióbio em diferentes teores:** avaliar os efeitos dos teores de nióbio abaixo de 0,2 % e acima de 0,3 % para identificar o ponto ótimo que maximiza as propriedades mecânicas sem comprometer a ductilidade e a usinabilidade.
- **Análise de outras propriedades mecânicas/químicas:** realizar estudos aprofundados sobre a resistência à fadiga, ao desgaste e à corrosão das peças com diferentes adições de nióbio, para explorar seu comportamento em aplicações mais específicas.
- **Otimização do processo de usinagem:** investigar técnicas de usinagem adequadas para peças com adição de nióbio, considerando o aumento de dureza e os efeitos no desgaste das ferramentas, para reduzir custos e melhorar o processo produtivo.
- **Análise de microestrutura por difração de raios X:** estudar detalhadamente a formação e a distribuição de fases, como carbonetos e intermetálicos, para entender melhor o papel do nióbio na transformação microestrutural do ferro fundido nodular.
- **Avaliação dos efeitos da adição combinada de nióbio com outros elementos de liga:** investigar a interação do nióbio com outros elementos de liga, como molibdênio, vanádio e titânio, para verificar se há sinergia entre os elementos que possam potencializar ainda mais as propriedades do material.
- **Avaliação da viabilidade econômica em aplicações industriais:** analisar as previsões econômicas da adição de nióbio em processos produtivos em larga escala, considerando o custo do material, o desempenho mecânico obtido e o custo-benefício para diferentes aplicações industriais.
- **Investigação do efeito da adição de nióbio em ciclos térmicos e tratamentos térmicos:** investigar como a adição de nióbio influencia no comportamento do ferro fundido nodular durante processos de tratamento térmico, como têmpera e revenimento, e avaliar possíveis alterações na estabilidade dimensional e nas propriedades mecânicas.

- **Aplicação do ferro fundido nodular com nióbio em componentes críticos:** explorar o uso do ferro fundido nodular com nióbio em componentes críticos de indústrias automotivas, ferroviárias e de máquinas agrícolas, para validar seu desempenho em condições reais de operação.
- **Desenvolvimento de normas e especificações técnicas:** proporcionar a elaboração de diretrizes e normas específicas para o uso de nióbio no ferro fundido nodular, estabelecendo disposições técnicas para teores de adição e propriedades esperadas, facilitando a padronização e a aplicação industrial.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, M.; SOLIMAN, M.; YOUSSEF, M.; BÄHR, R.; NOFAL, A. Effect of Niobium on the Microstructure and Mechanical Properties of Alloyed Ductile Irons and Austempered Ductile Irons. **Metals**, v. 11, n. 5, p. 703, maio 2021. DOI 10.3390/met11050703. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/5/703>. Acesso em: 11 maio 2024.
- ALIAS, S.; ABDULLAH, B.; JAFFAR, A.; ABDULLAH, A. H.; JENAL, N. Development of High Strength Ductile Iron with Niobium Addition. **Advanced Materials Research**, v. 576, p. 366–369, 1 out. 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.576.366>.
- ALMEIDA, G. C. **Nióbio: o elemento do século XXI**. [S. l.]: Sbq, 2019(Química no cotidiano).
- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, . **Metals Handbook**. [S. l.]: ASM, 1988. v. 15, .
- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, . **Metals Handbook**. [S. l.]: ASM, 1990. v. 01, .
- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, . **Metals Handbook**. [S. l.]: ASM, 1996. v. 19, .
- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, . **Metals Handbook**. [S. l.]: ASM, 2000. v. 08, .
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 148-1:2021**. Materiais Metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy - Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO NBR 6892-1:2024** Materiais Metálicos – Ensaio de tração – Parte 1: Método de ensaio em temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6916:2017**. Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal. – Especificação. 1ª Edição. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8650:2015**. Emprego de ferro fundido nodular para produtos automotivos – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- BARBETTA, Pedro A.; REIS, Marcelo M.; BORNIA, Antonio C. **Estatística**: para cursos de Engenharia e Informática, 3ª edição. Rio de Janeiro: Atlas, 2010. E-book. ISBN 9788522465699.
- BEDOLLA-JACUINDE, A.; SOLIS, E.; HERNANDEZ, B. Effect of niobium in medium alloyed ductile cast irons. **International Journal of Cast Metals Research**, v. 16, n. 5, p. 481–486, 1 nov. 2003. DOI 10.1080/13640461.2003.11819625. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13640461.2003.11819625>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- BEDOLLA-JACUINDE, A. Niobium in Cast Irons [Internet]. **Progress in Metallic Alloys**. InTech;. 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.5772/64498>. Disponível em:

<https://www.intechopen.com/chapters/51797#>. Acesso em: 1 jul. 2024.

BRUZIQUESI, C.; FILHO, J.; PEREIRA, M.; SILVA, A.; A. OLIVEIRA, L. NIÓBIO: um elemento químico estratégico para o Brasil. **Química Nova**, v. 42, 1 out. 2019. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170442>.

BURDITT, M. F. **Ductile iron handbook**. [S. l.]: American Foundrymen's Society, 1993.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma introdução**. 9. ed. [S. l.: s. n.], [s. d.].

CHEN, X.; XU, J.; HU, H.; MOHRBACHER, H.; KANG, M.; ZHANG, W.; GUO, A.; ZHAI, Q. Effects of niobium addition on microstructure and tensile behavior of as-cast ductile iron. **Materials Science and Engineering: A**, v. 688, p. 416–428, 14 mar. 2017. DOI 10.1016/j.msea.2017.01.032. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509317300412>. Acesso em: 23 jun. 2024.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2º. [S. l.]: McGraw-Hill, 1986. v. III.

CORGULHO, C. F.; SANTOS, C. S.; NUNES, F. C. **Tecnologias com Nióbio: Panorama do Patenteamento no Brasil**., p. 66, [s. d.]. Disponível em: [https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/TecnologiascomNiobio\\_RadarTecnolgico\\_DIESP\\_jan2023\\_revisadocomResumoExecutivo.pdf](https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/TecnologiascomNiobio_RadarTecnolgico_DIESP_jan2023_revisadocomResumoExecutivo.pdf). Acesso em: 12 maio 2024.

DAVIS, J. R. (Org.). **Alloying: understanding the basics**. Materials Park, OH: ASM International, 2001.

EMPRESA RIO (2023). **Imagens do acervo**.

FERREIRA, J. C.; PATINO, C. M. What does the p value really mean? **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 41, p. 485–485, out. 2015. DOI 10.1590/S1806-37132015000000215. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbpneu/a/SWk5XsCsXTW7GBZq8n7mVMJ/?lang=en>. Acesso em: 28 out. 2024.

FUNDIÇÃO E MATÉRIAS PRIMAS. jan. 2023. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2023/02/RevistaABIFAJaneiro2023.pdf>. Acesso em: 11 maio 2024.

GHADERI, A. R.; NILI AHMADABADI, M.; GHASEMI, H. M. Effect of graphite morphologies on the tribological behavior of austempered cast iron. **14th International Conference on Wear of Materials**, v. 255, n. 1, p. 410–416, 1 ago. 2003. DOI 10.1016/S0043-1648(03)00156-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004316480300156X>.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. 2º. [S. l.]: Editora Blucher, 2019.

GUESSER, W. L.; GUEDES, L. C. **Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística**. , p. 11, 1997. Disponível em: [https://www.tupy.com.br/wp-content/uploads/2021/06/desenv\\_ferros\\_fund.pdf](https://www.tupy.com.br/wp-content/uploads/2021/06/desenv_ferros_fund.pdf). Acesso em: 12 maio 2024.

G\*POWER - SOFTWARE ESTATÍSTICO. [s. d.]. Disponível em: <https://www.psychologie.hhu.de/arbeitsgruppen/allgemeine-psychologie-und-arbeitspsychologie/gpower>. Acesso em: 6 out. 2024.

JÚNIOR, R. F. P. Nióbio. 2008. Disponível em: [https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3976](https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3976). Acesso em: 12 maio 2024.

LAURIS, J. R. Estatística. [s. d.]. **Cálculo Amostral**. [Cálculo Amostral Estatística]. Disponível em: <http://estatistica.bauru.usp.br/calculoamostral/index.php>. Acesso em: 6 out. 2024.

LI, H.; YANG, C.; WEI, Z.; CHEN, X.; ZHAI, Q. Morphology and Distribution of Nb-Rich Phase and Graphite in Nb Microalloyed Ductile Iron. *In*: CARPENTER, J. S.; BAI, C.; ESCOBEDO, J. P.; HWANG, J.-Y.; IKHMAYIES, S.; LI, B.; LI, J.; MONTEIRO, S. N.; PENG, Z.; ZHANG, M. (orgs.). **Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 579–585. DOI 10.1007/978-3-319-48191-3\_72. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48191-3\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48191-3_72). Acesso em: 12 maio 2024.

LUCENA, J. M. C. de. **Mercado de nióbio**. dez. 2010. Disponível em: <http://pantheon.ufrj.br/handle/11422/6021>. Acesso em: 12 maio 2024.

MULLINS, J. **Ductile Iron Data For Design Engineers | PDF**. [S. l.]: Rio Tinto Iron & Titanium Inc., 1990. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/424292162/Ductile-Iron-Data-for-Design-Engineers>. Acesso em: 31 maio 2024.

NASCIMENTO, D. do. Ferros Fundidos. [S. l.]: Sociedade educacional de santa Catarina - Sociesc escola técnica Tupy, 2009. p. 410.

NYLÉN, T. A aplicação de nióbio em ferros fundidos. **A aplicação de nióbio em ferros fundidos**, n. Revista Fundação e Serviços, p. 16, set. 2007.

PEREIRA, C. H.; MENDES, M. F.; FRANCO JÚNIOR, A. R.; HUPALO, M. F. Efeito da adição de nióbio na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular da classe 70002. **61º Congresso Anual da ABM**, v. 61, n. 61, p. 2715–2724, 2006. DOI 10.5151/2594-5327-0305. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/efeito-da-adio-de-nibio-na-microestrutura-e-nas-propriedades-mecnicas-de-um-ferro-fundido-nodular-da-classe-70002>. Acesso em: 15 jun. 2024.

RIVERA L, I.; ROCA V, A.; PATIÑO C, F.; CRUELLS C, M. Microalloyed niobium influence on ductile ferrite cast irons. **International Journal of Cast Metals Research**, v. 16, n. 1–3, p. 65–70, ago. 2003. DOI 10.1080/13640461.2003.11819560. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/13640461.2003.11819560>. Acesso em: 12 maio 2024.

SANTOS, A. B. de S. **Efeitos da composição química na produção de ferro fundido nodulares**, 55º Congresso Anual da ABM, 21 p., jul. 2000.

SANTOS, A. B. de S. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e Nodulares**. 1º. São Paulo- Brasil: [s. n.], 1987.

SHARPE, Norean R.; VEAUX, Richard D.; VELLEMAN, Paul F. Estatística aplicada. Porto Alegre: Grupo A, 2011. E-book. ISBN 9788577808656.

SOUZA, T. N. F. **Produção e caracterização física e mecânica de ferros fundidos nodulares e ferros fundidos nodulares austemperados com adição de nióbio**. 2012. 1–166 f. Dissertação (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SOUZA, T. N. F.; NOGUEIRA, R. A. P. S.; FRANCO, F. J. S.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Mechanical and microstructural characterization of Nodular Cast Iron (NCI) with Niobium Additions. **Materials Research**, v. 17, p. 1167–1172, out. 2014. DOI <https://doi.org/10.1590/1516-1439.249413>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/zrYNRvfJ7qzZKRf8ttnSrJp/?lang=en>. Acesso em: 10 fev. 2025.

TENÓRIO, J. A. S. **Estudo da dissolução do Fe-NbC em ferro líquido**. 1992. text – Universidade de São Paulo, 1992. DOI 10.11606/T.3.1992.tde-03082022-074416. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-03082022-074416/>. Acesso em: 12 maio 2024.

VATAVUK, J.; VILLAR, C. A. Ferro fundido nodular com nióbio para aumento da resistência ao desgaste de anéis de pistão de motores de combustão interna. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 3, n. 3, 2002. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/1961>. Acesso em: 15 jun. 2024.

VIEIRA, Sonia. Bioestatística: Tópicos Avançados. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2023. E-book. ISBN 9788595159594.


VICENTE, A. de A.; TELLES, V. B.; BOTELHO JUNIOR, A. B.; LEBRÃO, S. M. G.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Estudo sobre a nucleação e crescimento de nódulos de grafita em ferros fundidos nodulares. **Tecnologia de Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 16, n. 3, p. 299–305, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003009383>. Acesso em: 12 maio 2024.

VIRGILLITO, Salvatore B. Estatística Aplicada. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. E-book. ISBN 9788547214753.

WANG, H.; FENG, Y.; JIANG, W.; WANG, C.; GUO, E.; FU, Y.; ZHAO, S. Effect of

Niobium on Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Iron with High Strength and Ductility. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 33, n. 2, p. 896–905, 1 jan. 2024. DOI 10.1007/s11665-023-08019-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08019-9>. Acesso em: 12 maio 2024.

**ANEXOS**  
**ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO NIÓBIO**

 <b>SAINTSTEEL</b> Comércio Internacional de Metais Ltda.		Tel.: +55 (11) 4613-9393 Fax: +55 (11) 4613-9399 Site: <a href="http://www.saintsteel.com.br">www.saintsteel.com.br</a> E-mail: <a href="mailto:saintsteel@saintsteel.com.br">saintsteel@saintsteel.com.br</a>	
<b>01 – Nome do Produto</b> <b>Ferro Nióbio</b>			
<b>02 – Lote</b> <b>9155</b>	<b>03 – Fabricação</b> <b>Setembro/2021</b>	<b>04 – Validade</b> <b>Indeterminada</b>	
<b>05 – Quantidade</b> <b>50 kg</b>	<b>06 – Cliente</b> <b>RIOSULENSE</b>	<b>07 – Nota Fiscal</b> <b>96692</b>	
<b>08 – Item</b>	<b>09 – Tolerância</b>	<b>10 – Resultado</b>	
<b>Nb</b>	<b>64% - 69%</b>	<b>64,478%</b>	
<b>P</b>	<b>0,20% Máx.</b>	<b>0,186%</b>	
<b>C</b>	<b>0,20% Máx.</b>	<b>0,158%</b>	
<b>S</b>	<b>0,10% Máx.</b>	<b>0,06%</b>	
<b>Al</b>	<b>2,00% Máx.</b>	<b>1,83%</b>	
<b>Si</b>	<b>3,00% Máx.</b>	<b>2,76%</b>	
<b>Granulometria</b>	<b>10 x 50 mm</b>		
<p><b>11 – OBS:</b> As embalagens devem permanecer hermeticamente fechadas, em local fresco e ventilado seguindo as recomendações do fabricante. Este certificado está baseado nas informações do fabricante sendo a Saintsteel Com Int. Ltda., responsável apenas pela transcrição dos dados que constam do laudo ORIGINAL.</p> <p>“MATERIAL ISENTO DE RADIOATIVIDADE”.</p>			
<p><b>PARECER FINAL C. Q.</b>  <input checked="" type="checkbox"/> <b>APROVADO</b>  <input type="checkbox"/> <b>REPROVADO</b>  <input type="checkbox"/> <b>APROVADO COM RESTRIÇÕES</b></p> <p><b>Resp. Técnico</b>  <b>Paulo Pascual</b>          Este certificado foi emitido eletronicamente e é válido sem assinatura.</p>		<p><b>Saintsteel Com Int Ltda.</b>          Rua: Bruno Vicente da Luz, nº 184          Bairro: Espinheiros – Itajaí, SC.          CEP: 88.317-020</p>	

Fonte: Fornecedor Nióbio (2023)

## ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DA LIGA FESIMG

CERTIFICADO DE ANÁLISE



**ROTAVI**  
INDUSTRIAL

**Nº 822**

Cliente: RIOSULENSE

Produto: Mg5R-2

A.F.Nº: 521.254

Nota Fiscal Nº: 36909

Quantidade: 14.000 Kg

Granulometria: 6,35 x 12,7 mm

CERTIFICAMOS QUE A COMPOSIÇÃO MÉDIA DO LOTE APRESENTA OS SEGUINTE VALORES:

**1. Composição Química**

ELEMENTOS	Si	Ca	Al	Mg	TR		
% Obtida	43,27	1,26	0,86	6,71	0,96		
ESPECIFICADO	43/48	0,8/1,3	1,2 max	5/7	0,9/1,2		

**2. Ensaio Granulométrico**

POL/MESH						
Peneiras (mm)	12,7	6,35	F			
F% RETIDA	3,6	92,2	4,2			

Várzea da Palma 17 de MAIO de 2023



**LABORATÓRIO**

Mario José Moreira  
CRQ 02403452  
Encarregado Laboratório



**CONTROLE DE QUALIDADE**

Edmilson Nunes Gomes  
Coordenador de Garantia de Qualidade

**Escritório Comercial**  
Av. N. Senhora do Sabará, 2077  
Campo Grande - 04685-004 | São Paulo - SP  
+55 11 9631-0200 - Ramal 244 / 255 / 372  
comercial@rotavi.com.br

**Fábrica**  
R. Salvador Roberto, 1963  
Progresso - 39.260-000  
Várzea da Palma - MG  
assistenciatecnica@rotavi.com.br



CERTIFICADO ISO 9001:2015

## ANEXO C – ESPECIFICAÇÃO INOCULANTE



MET RIOSULENSE S/A  
RUA EMILIO ADAMI 700  
BARRA DO TROMBUDO  
RIO DO SUL - SC  
89164-910  
BRASIL

## Certificado de controle de qualidade

Data  
12.04.2023  
Nº da Nota Fiscal  
000337330  
Item de pedido/data  
319670 / 10.04.2023  
Item de remessa/data  
80336632 000010 / 10.04.2023  
Item de ordem/data  
183849 000010 / 10.04.2023  
Nº do cliente  
100519

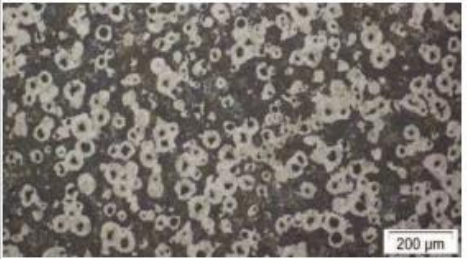



Material: Nossa/sua denominação  
3122128 INOCULIN 90 (0.2 A 0.7MM ) BB /  
Atenção de controle de qualidade

Lote699910 / Produto não Perecível / Qtd.1.200 KG  
Lote de controle 890000013183 de 20.03.2023

Caract.	Unid.	Val.	Limite inf.	Limite sup.
OUTROS				
		Conforme	-	-
Teor de Cálcio em Ferro L	%	1,400	0,600	1,900
Teor de Al em Ferro Ligas	%	1,190	0,550	1,300
Teor de Silício (Fusão Al	%	62,400	62,000	69,000
Granulometria Fundo	%	0,000	0,000	15,000
Teor de Bário em Ferro Li	%	0,540	0,300	0,700
Retido Malha 35 - Via Sec	%	42,270	0,000	50,000
Retido Malha 65 - Via Sec	%	54,800	40,000	100,000
Teor de Umidade				
	%	0,100	-	1,000
Teor de Zircônio via Fosf	%	3,500	3,000	5,000
Teor de Manganês (Método	%	3,590	2,800	4,500
Retido Malha 100 - Via Se	%	2,980	0,000	15,000

Fonte: Fornecedor Liga (2023)

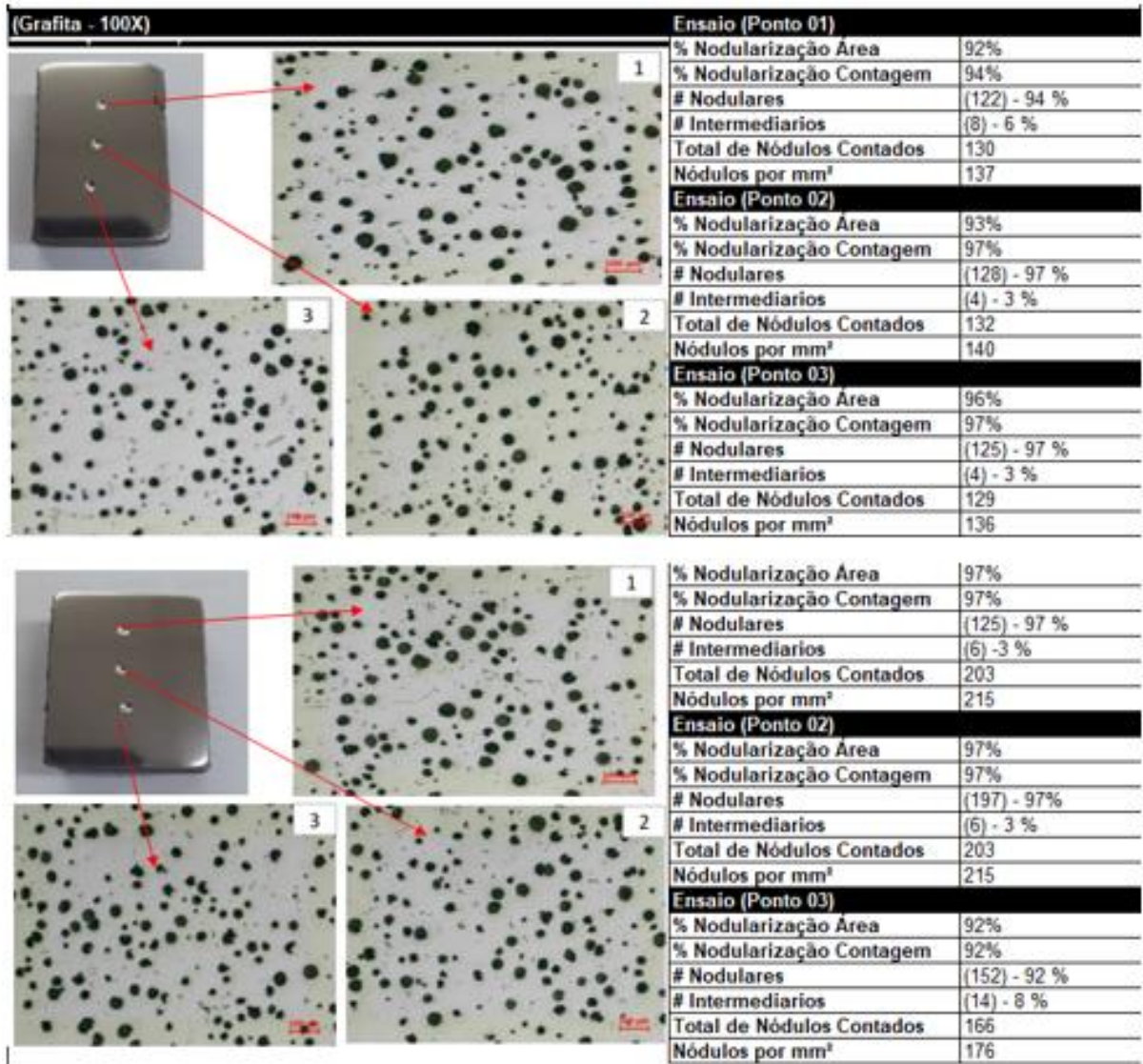
### ANEXO D - QUADRO COMPARATIVO

Ferro Fundido Nodular com 0,23% de Nióbio	Grau de Esferoidização (%)	80	
	Número de Esferóides/mm <sup>2</sup>	278	
	Perlita (%)	56	
	Ferrita (%)	44	
	Precipitados/Carbonetos (%)	< 1	
Ferro Fundido Nodular com 0,47% de Nióbio	Grau de Esferoidização (%)	85 a 90	
	Número de Esferóides/mm <sup>2</sup>	170	
	Perlita (%)	75	
	Ferrita (%)	25	
	Precipitados/Carbonetos (%)	< 1	
Ferro Fundido Nodular com 0,67% de Nióbio	Grau de Esferoidização (%)	85 a 90	
	Número de Esferóides/mm <sup>2</sup>	150	
	Perlita (%)	85	
	Ferrita (%)	15	
	Precipitados/Carbonetos (%)	<2	
Ferro fundido Nodular com 0,85% de Nióbio	Grau de Esferoidização (%)	85 a 90	
	Número de Esferóides/mm <sup>2</sup>	160	
	Perlita (%)	88	
	Ferrita (%)	12	
	Precipitados/Carbonetos (%)	<2	

Fonte: Souza (2012)

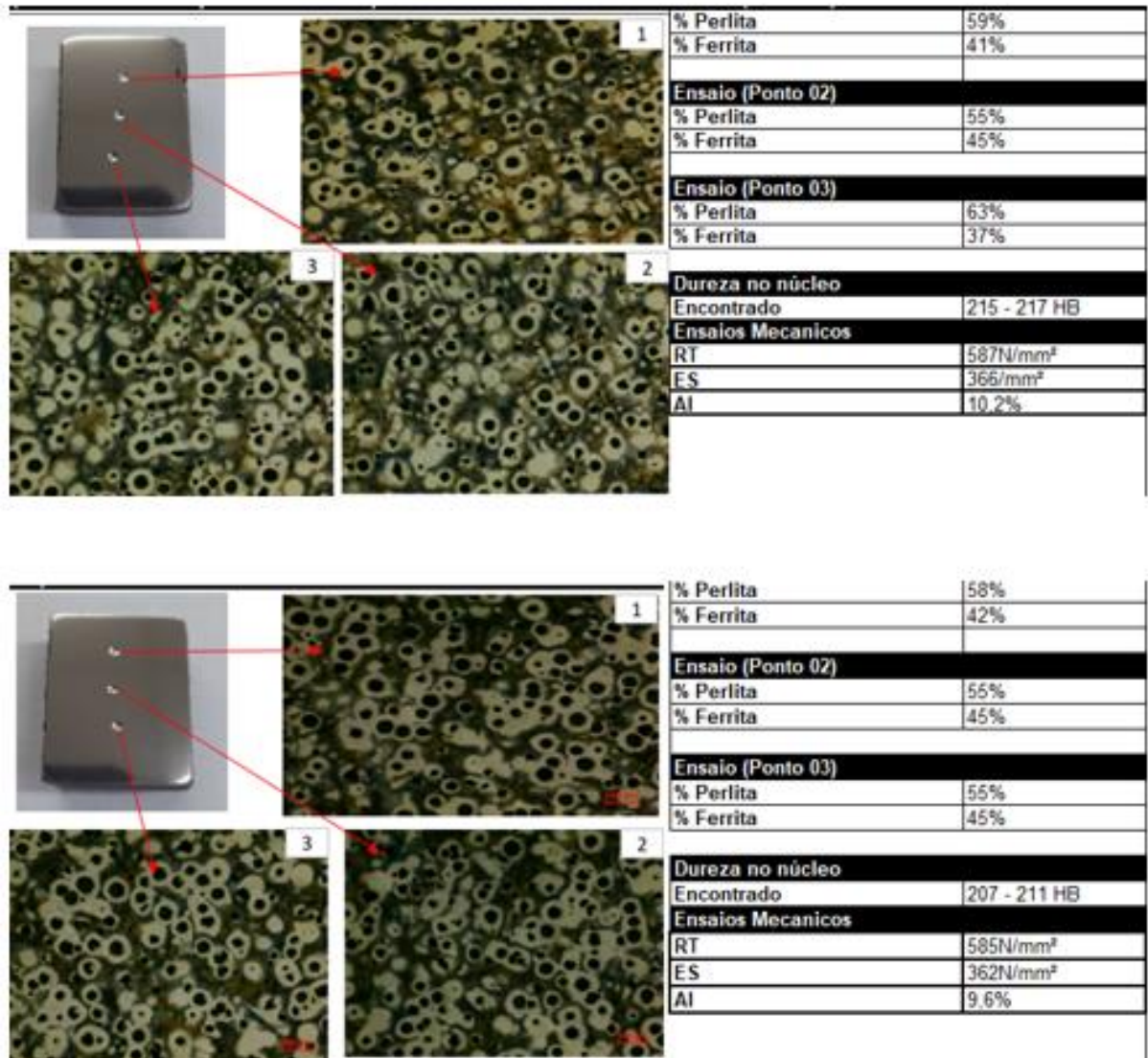
APÊNDICES

APÊNDICE A - NÓDULOS DE GRAFITA SEM ADIÇÃO DE NÍÓBIO



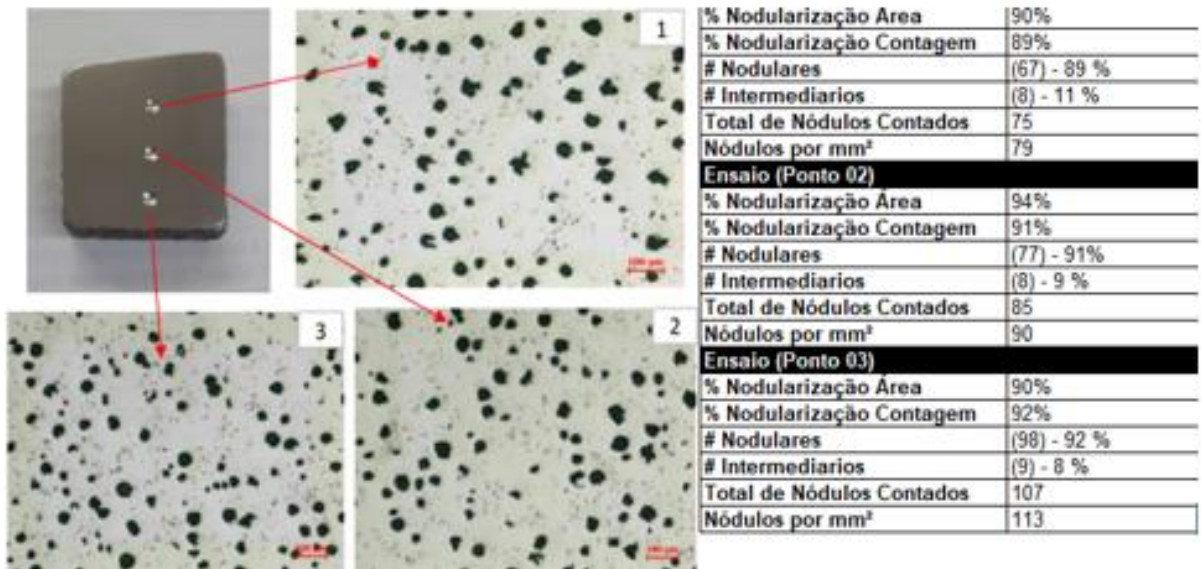
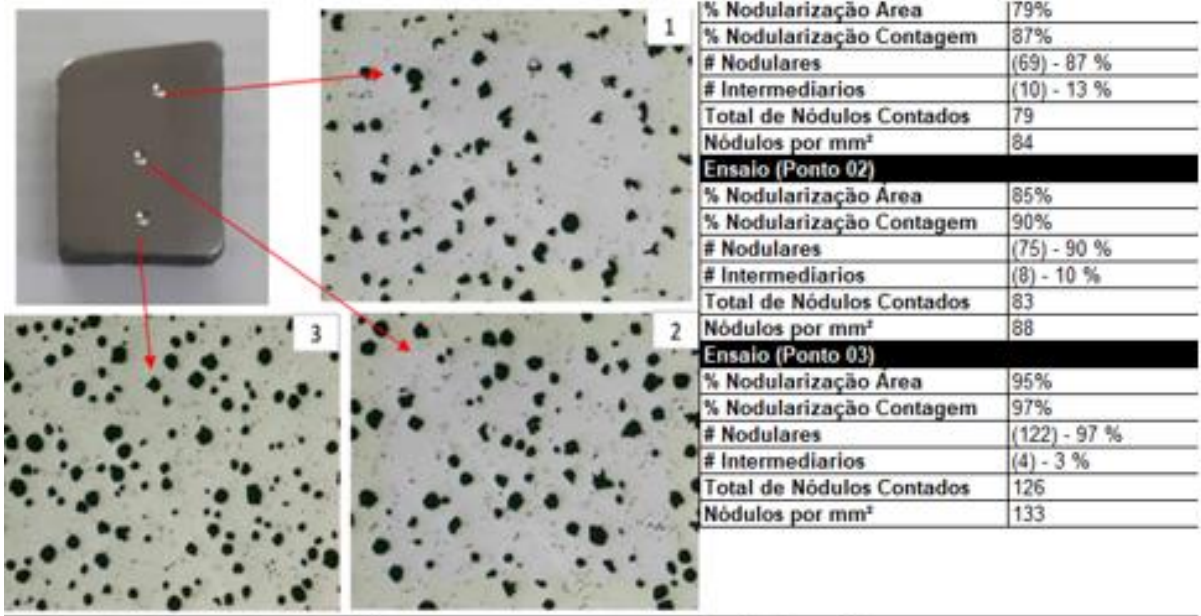
Fonte: O autor (2024)

**APÊNDICE B - MICROESTRUTURA SEM ADIÇÃO DE NIÓBIO**



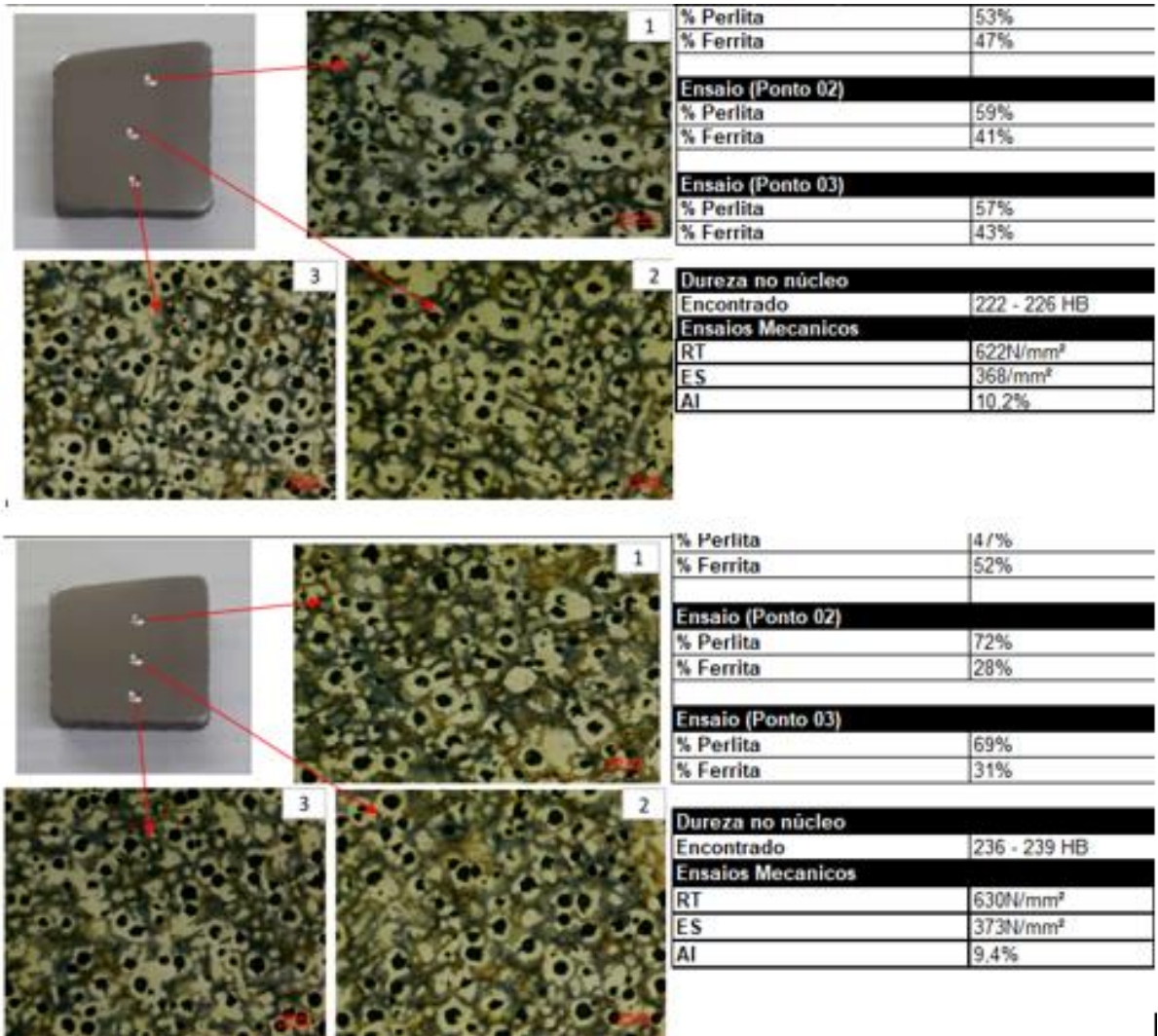
Fonte: O autor (2024)

APÊNDICE C - NÓDULOS DE GRAFITA COM NIÓBIO DE 0,18 %



Fonte: O autor (2024)

APÊNDICE D - MICROESTRUTURA COM NIÓBIO DE 0,18 %



Fonte: O autor (2024)

APÊNDICE E - NÓDULOS DE GRAFITA COM NIÓBIO DE 0,25 %

<b>(Sem ataque - 100X)</b>		<b>Ensaio (Ponto 01)</b>	
		% Nodularização Área	97%
		% Nodularização Contagem	92%
		# Nodulares	(87) - 92 %
		# Intermediarios	(8) - 8 %
		Total de Nódulos Contados	95
		Nódulos por mm <sup>2</sup>	24
		<b>Ensaio (Ponto 02)</b>	
		% Nodularização Área	92%
		% Nodularização Contagem	89%
		# Nodulares	(75) - 89 %
		# Intermediarios	(9) - 11 %
		Total de Nódulos Contados	84
		Nódulos por mm <sup>2</sup>	21
		<b>Ensaio (Ponto 03)</b>	
		% Nodularização Área	87%
		% Nodularização Contagem	82%
		# Nodulares	(75) - 82 %
		# Intermediarios	(17) - 18 %
		Total de Nódulos Contados	92
		Nódulos por mm <sup>2</sup>	23
<b>(Sem ataque - 100X)</b>		<b>Ensaio (Ponto 01)</b>	
		% Nodularização Área	99%
		% Nodularização Contagem	98%
		# Nodulares	(91) - 98 %
		# Intermediarios	(2) - 2 %
		Total de Nódulos Contados	93
		Nódulos por mm <sup>2</sup>	98
		<b>Ensaio (Ponto 02)</b>	
		% Nodularização Área	97%
		% Nodularização Contagem	95%
		# Nodulares	(82) - 95 %
		# Intermediarios	(4) - 5 %
		Total de Nódulos Contados	86
		Nódulos por mm <sup>2</sup>	91
		<b>Ensaio (Ponto 03)</b>	
		% Nodularização Área	88%
		% Nodularização Contagem	86%
		# Nodulares	(56) - 86 %
		# Intermediarios	(9) - 14 %
		Total de Nódulos Contados	65
		Nódulos por mm <sup>2</sup>	69
<b>(Sem ataque - 100X)</b>		<b>Ensaio (Ponto 01)</b>	
		% Nodularização Área	84%
		% Nodularização Contagem	82%
		# Nodulares	(98) - 82 %
		# Intermediarios	(22) - 18 %
		Total de Nódulos Contados	120
		Nódulos por mm <sup>2</sup>	127
		<b>Ensaio (Ponto 02)</b>	
		% Nodularização Área	93%
		% Nodularização Contagem	88%
		# Nodulares	(93) - 88 %
		# Intermediarios	(13) - 12 %
		Total de Nódulos Contados	106
		Nódulos por mm <sup>2</sup>	112
		<b>Ensaio (Ponto 03)</b>	
		% Nodularização Área	86%
		% Nodularização Contagem	71%
		# Nodulares	(89) - 71 %
		# Intermediarios	(36) - 29 %
		Total de Nódulos Contados	125
		Nódulos por mm <sup>2</sup>	132

Fonte: O autor (2024)

APÊNDICE F - MICROESTRUTURA COM NIÓBIO DE 0,25 %

**Ataque Nital 4% - 100X**

Ensaio (Ponto 01)	
% Perlita	59%
% Ferrita	41%
Ensaio (Ponto 02)	
% Perlita	66%
% Ferrita	34%
Ensaio (Ponto 03)	
% Perlita	75%
% Ferrita	25%
Dureza no núcleo	
Encontrado	198 a 200 HB

**Ataque Nital 4% - 100X**

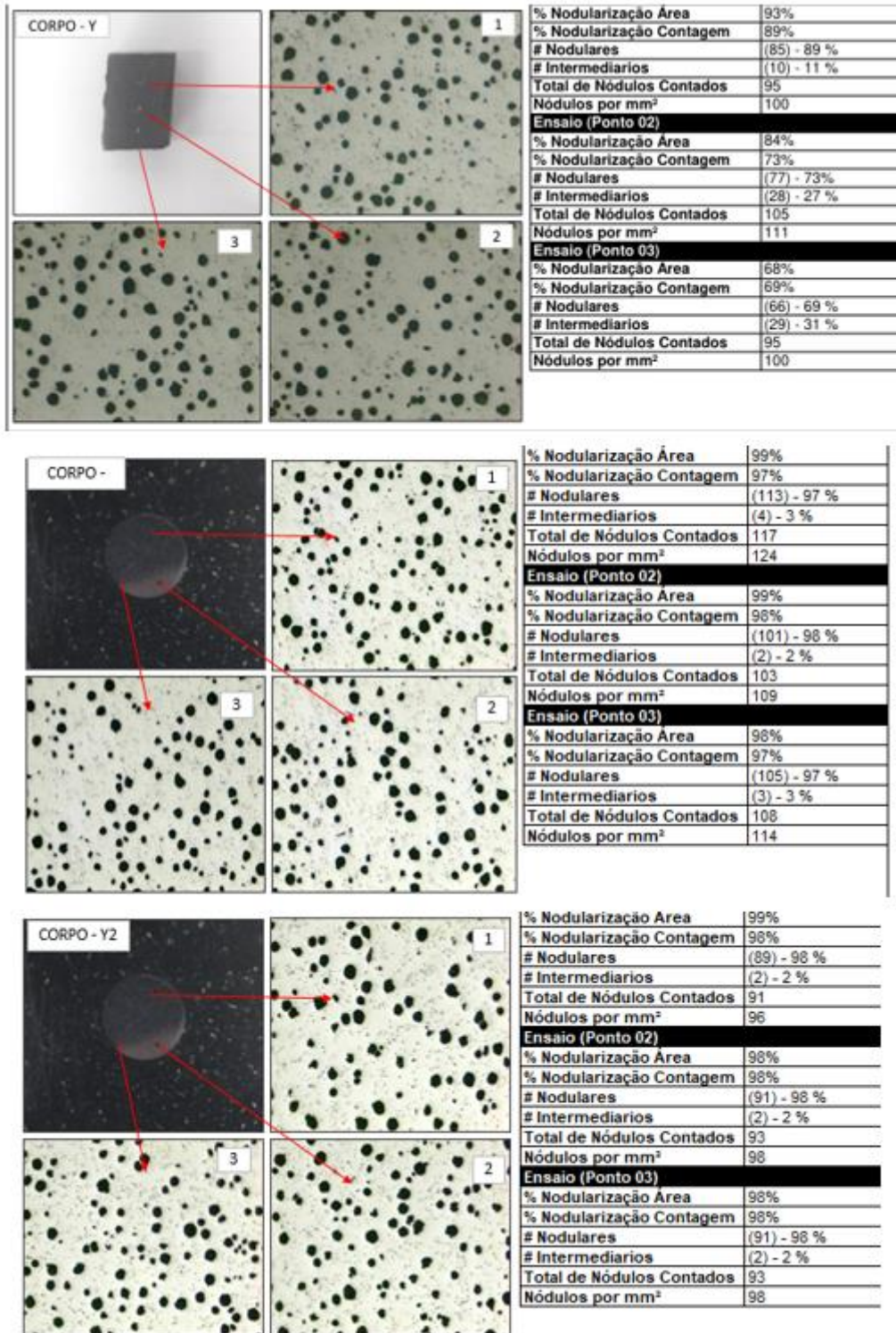
Ensaio (Ponto 01)	
% Perlita	69%
% Ferrita	31%
Ensaio (Ponto 02)	
% Perlita	76%
% Ferrita	24%
Ensaio (Ponto 03)	
% Perlita	75%
% Ferrita	25%
Dureza no núcleo	
Encontrado	198 a 200 HB

**Ataque Nital 4% - 100X**

Ensaio (Ponto 01)	
% Perlita	45%
% Ferrita	55%
Ensaio (Ponto 02)	
% Perlita	57%
% Ferrita	43%
Ensaio (Ponto 03)	
% Perlita	52%
% Ferrita	48%
Dureza no núcleo	
Encontrado	191 a 193 HB

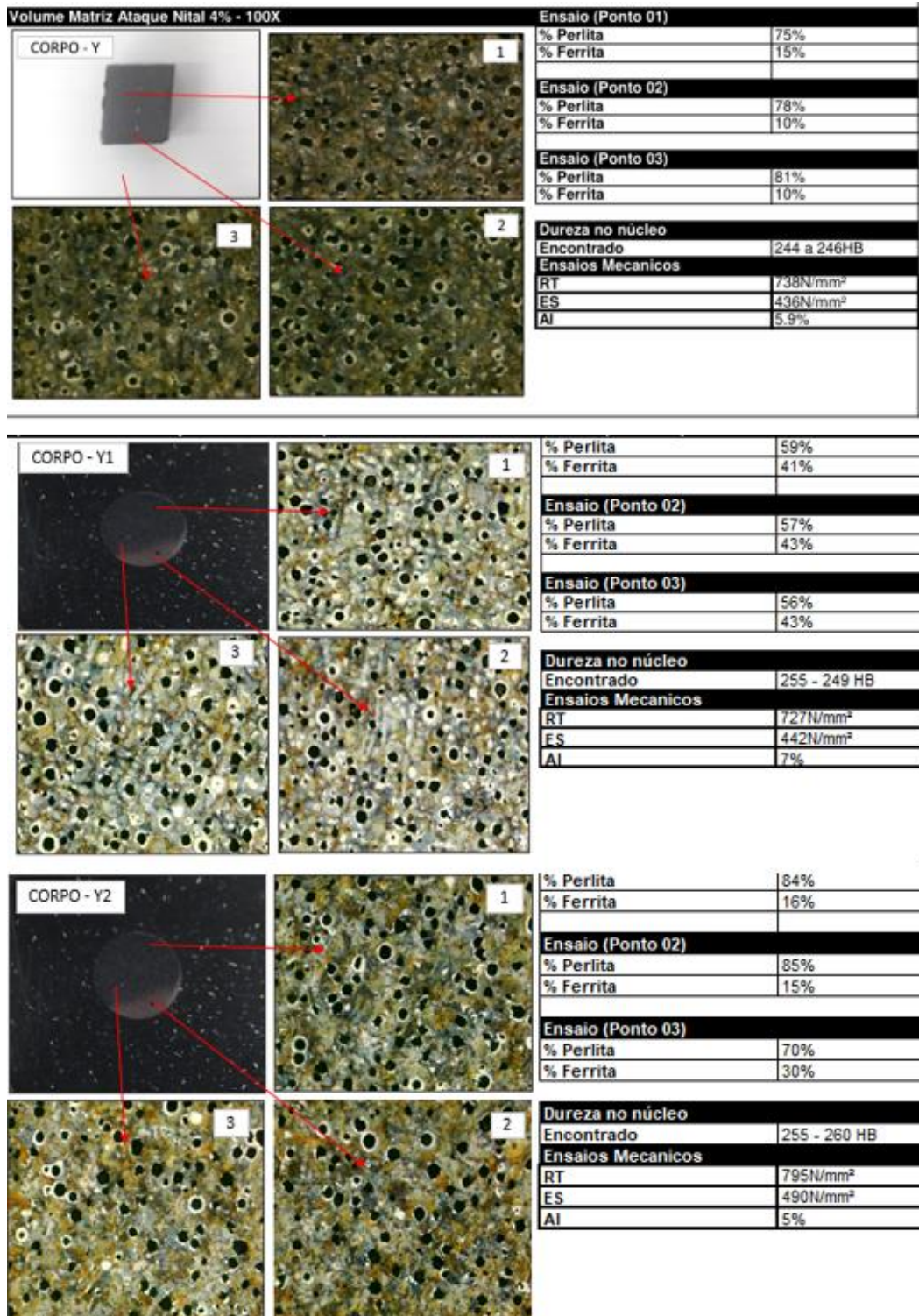
Fonte: O autor (2024)

APÊNDICE G - NÓDULOS DE GRAFITA COM NIÓBIO DE 0,34 %

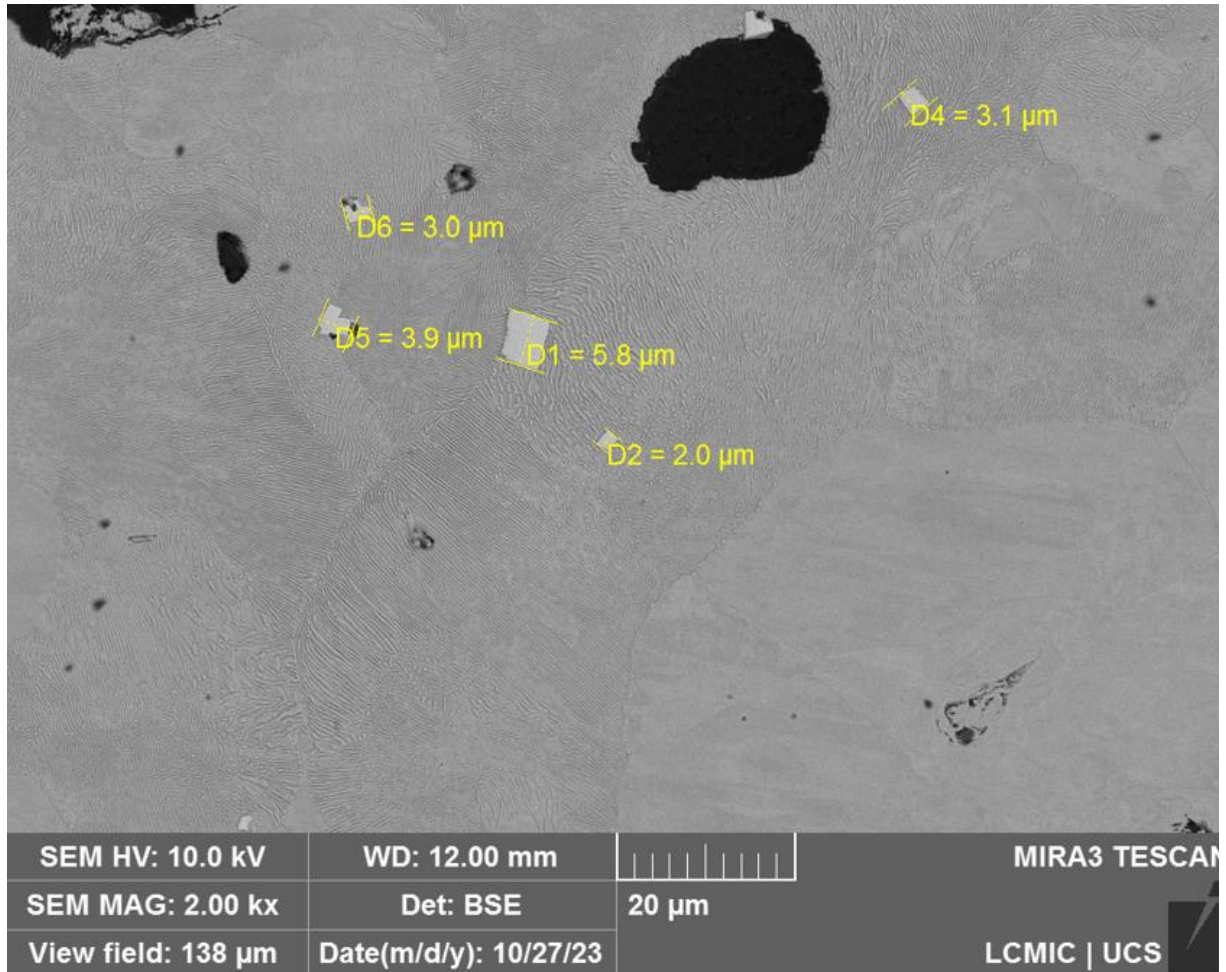


Fonte: O autor (2024)

APÊNDICE H - MICROESTRUTURA COM NIÓBIO DE 0,34 %

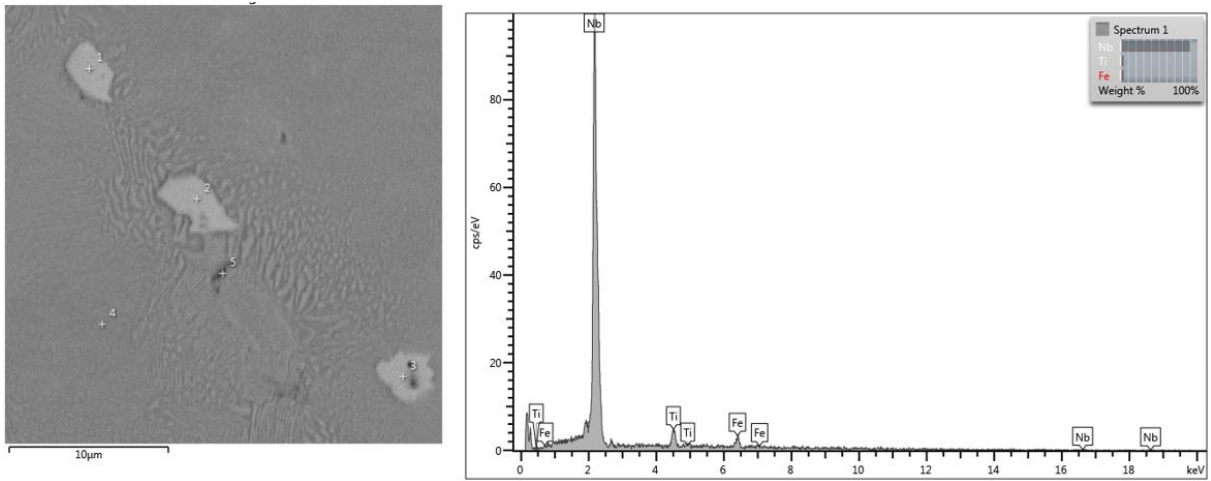


Fonte: O autor (2024)

**APÊNDICE I - MEV COM NIÓBIO DE 0,18 %**

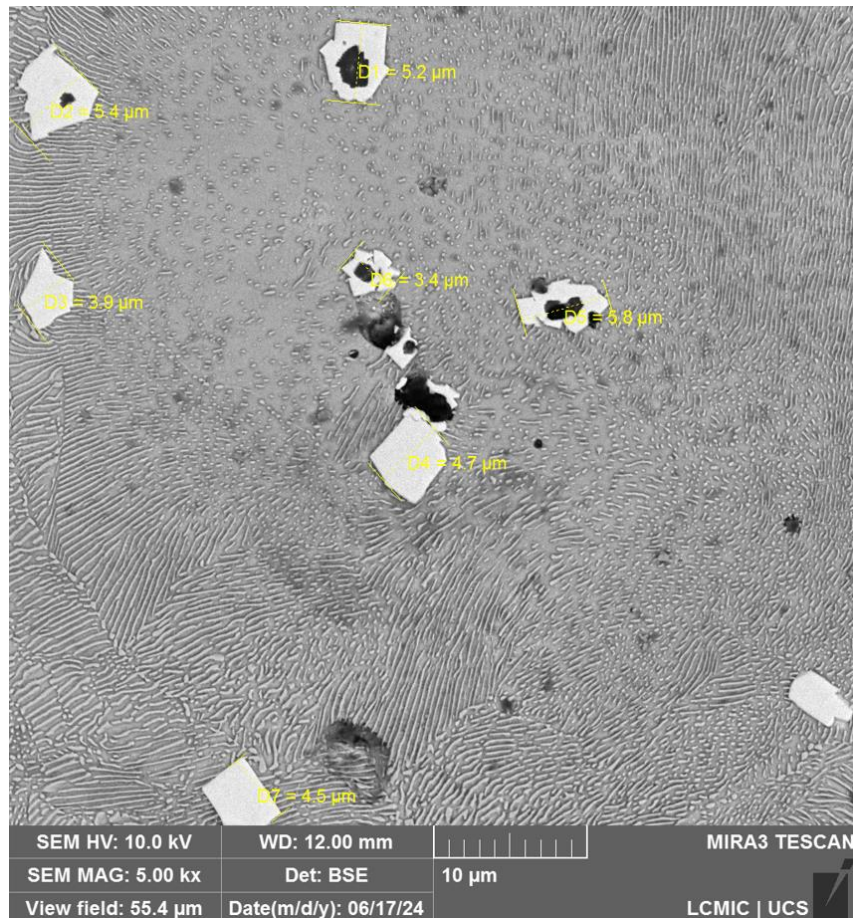
Fonte: O autor (2024)

**APÊNDICE J - EDS COM NIÓBIO DE 0,18 %**



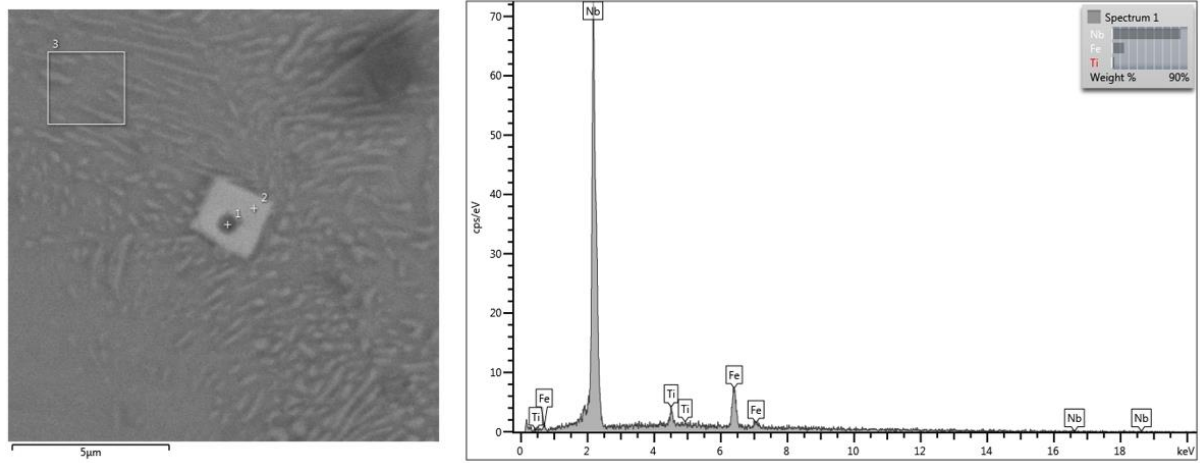
Fonte: O autor (2024)

**APÊNDICE K - MEV COM NIÓBIO DE 0,25 %**



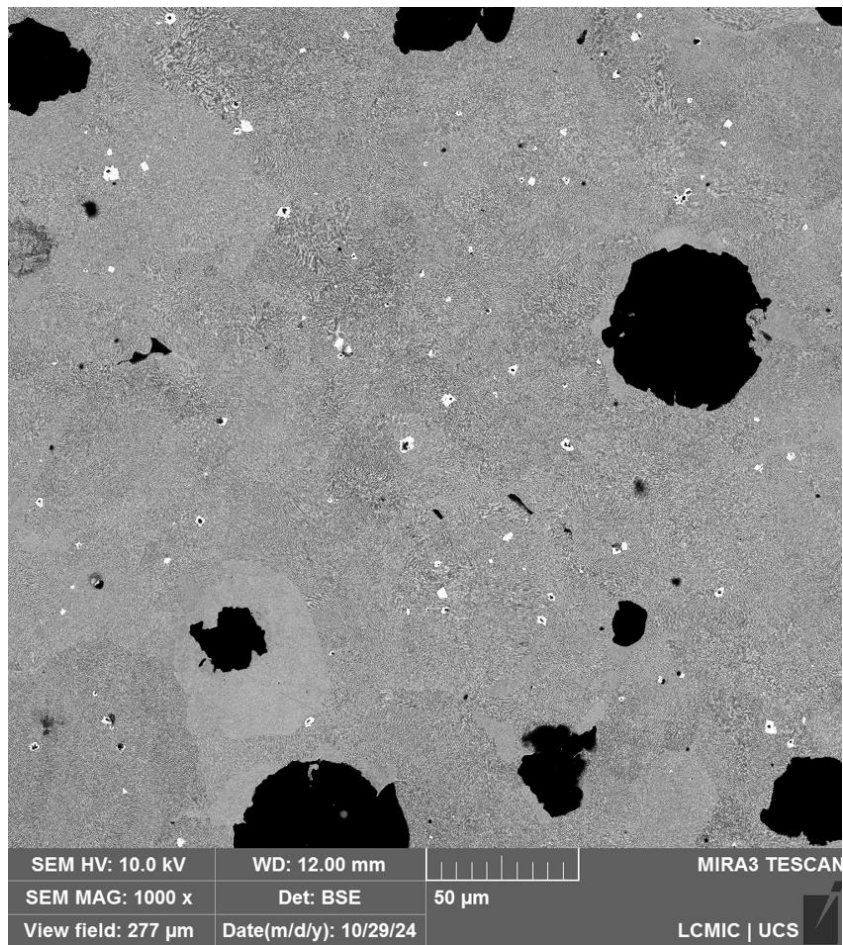
Fonte: O autor (2024)

**APÊNDICE L - EDS COM NIÓBIO DE 0,25 %**

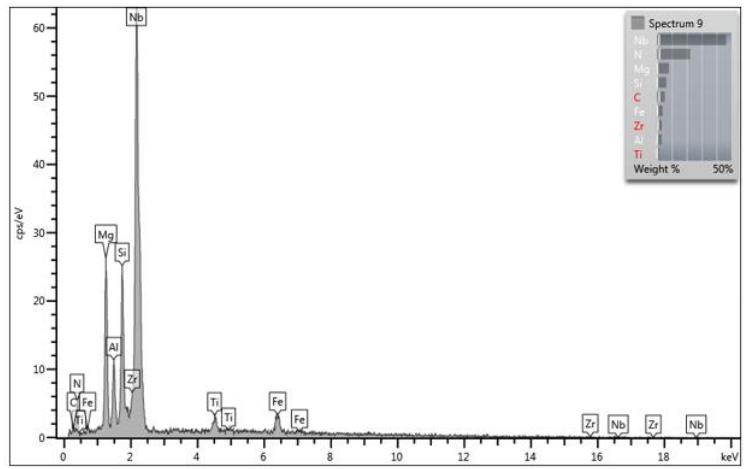
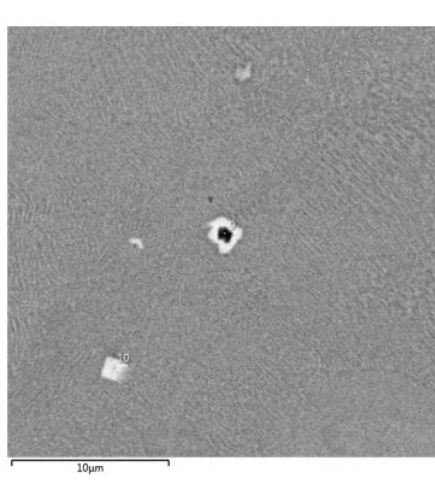


Fonte: O autor (2024)

**APÊNDICE M – MEV COM NIÓBIO DE 0,34 %**






Fonte: O autor (2024)

**APÊNDICE N - EDS COM NIÓBIO DE 0,34 %**


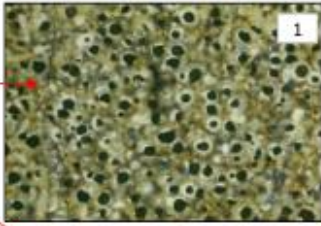
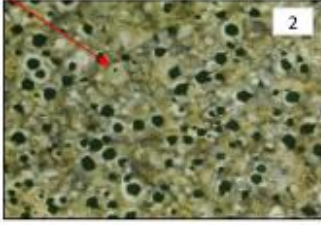
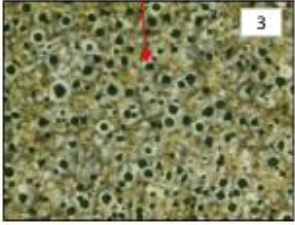
Fonte: O autor (2024)

## APÊNDICE O - NÓDULOS DE GRAFITA COM NIÓBIO DE 0,34 % - ESTUDO DE CASO


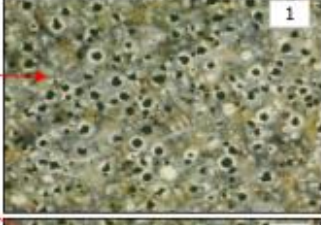
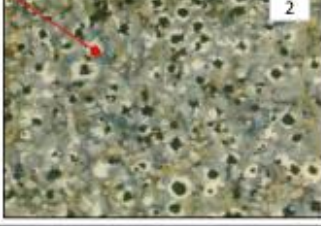
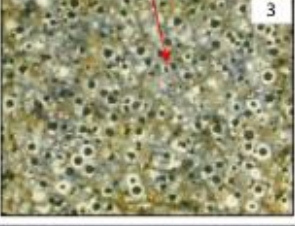
(Grafia - 100X)		Ensaio (Ponto 01)	
PEÇA-1 	1	% Nodularização Área	89%
		% Nodularização Contagem	90%
		# Nodulares	(138) - 90 %
		# Intermediarios	(15) - 10 %
		<b>Total de Nódulos Contados</b>	153
		<b>Nódulos por mm<sup>2</sup></b>	162
		Ensaio (Ponto 02)	
		% Nodularização Área	80%
		% Nodularização Contagem	84%
		# Nodulares	(99) - 84%
		# Intermediarios	(20) - 17 %
		<b>Total de Nódulos Contados</b>	119
		<b>Nódulos por mm<sup>2</sup></b>	126
		Ensaio (Ponto 03)	
		% Nodularização Área	53%
		% Nodularização Contagem	63%
		# Nodulares	(86) - 63 %
		# Intermediarios	(51) - 37 %
		<b>Total de Nódulos Contados</b>	137
		<b>Nódulos por mm<sup>2</sup></b>	145
<hr/>			
(Grafia - 100X)		Ensaio (Ponto 01)	
PEÇA-2 	1	% Nodularização Área	92%
		% Nodularização Contagem	89%
		# Nodulares	(97) - 89 %
		# Intermediarios	(12) - 11 %
		<b>Total de Nódulos Contados</b>	109
		<b>Nódulos por mm<sup>2</sup></b>	115
		Ensaio (Ponto 02)	
		% Nodularização Área	84%
		% Nodularização Contagem	84%
		# Nodulares	(98) - 84 %
		# Intermediarios	(18) - 16 %
		<b>Total de Nódulos Contados</b>	116
		<b>Nódulos por mm<sup>2</sup></b>	126
		Ensaio (Ponto 03)	
		% Nodularização Área	83%
		% Nodularização Contagem	91%
		# Nodulares	(171) - 191 %
		# Intermediarios	(17) - 9%
		<b>Total de Nódulos Contados</b>	188
		<b>Nódulos por mm<sup>2</sup></b>	199
<hr/>			
(Grafia - 100X)		Ensaio (Ponto 01)	
PEÇA-3 	1	% Nodularização Área	96%
		% Nodularização Contagem	97%
		# Nodulares	(175) - 97 %
		# Intermediarios	(5) - 3 %
		<b>Total de Nódulos Contados</b>	180
		<b>Nódulos por mm<sup>2</sup></b>	190
		Ensaio (Ponto 02)	
		% Nodularização Área	75%
		% Nodularização Contagem	75%
		# Nodulares	(107) - 75 %
		# Intermediarios	(36) - 25 %
		<b>Total de Nódulos Contados</b>	143
		<b>Nódulos por mm<sup>2</sup></b>	151
		Ensaio (Ponto 03)	
		% Nodularização Área	80%
		% Nodularização Contagem	84%
		# Nodulares	(148) - 84%
		# Intermediarios	(28) - 16%
		<b>Total de Nódulos Contados</b>	176
		<b>Nódulos por mm<sup>2</sup></b>	186

Fonte: O autor (2024)


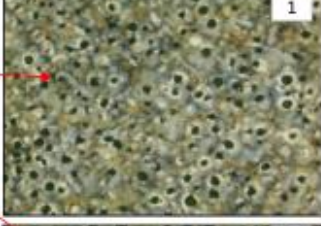
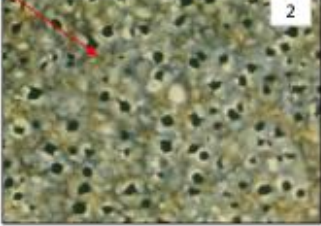
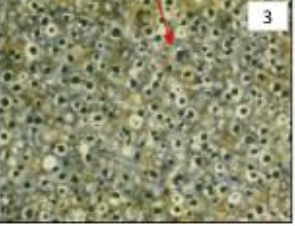
## APÊNDICE P - MICROESTRUTURA COM NIÓBIO DE 0,34 % - ESTUDO DE CASO

Volume Matriz Ataque Nital 4% - 100X		Ensaio (Ponto 01)		
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-right: 5px;">PEÇA-1</div>  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="text-align: center;">  <p>1</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>2</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>3</p> </div> </div> </div>		% Perlita	54%	
			% Ferrita	32%
	<b>Ensaio (Ponto 02)</b>		% Perlita	57%
			% Ferrita	30%
<b>Ensaio (Ponto 03)</b>		% Perlita	51%	
		% Ferrita	37%	
<b>Dureza no núcleo</b>		<b>Encontrado</b>	234 a 244 HB	
<b>Ensaio Mecanicos</b>		RT	705N/mm <sup>2</sup>	
		ES	420N/mm <sup>2</sup>	
		AI	65%	

Volume Matriz Ataque Nital 4% - 100X		Ensaio (Ponto 01)		
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-right: 5px;">PEÇA-2</div>  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="text-align: center;">  <p>1</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>2</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>3</p> </div> </div> </div>		% Perlita	50%	
			% Ferrita	42%
	<b>Ensaio (Ponto 02)</b>		% Perlita	50%
			% Ferrita	44%
<b>Ensaio (Ponto 03)</b>		% Perlita	40%	
		% Ferrita	56%	
<b>Dureza no núcleo</b>		<b>Encontrado</b>	231 a 236 HB	
<b>Ensaio Mecanicos</b>		RT	705N/mm <sup>2</sup>	
		ES	420N/mm <sup>2</sup>	
		AI	65%	

Volume Matriz Ataque Nital 4% - 100X		Ensaio (Ponto 01)		
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-right: 5px;">PEÇA-3</div>  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="text-align: center;">  <p>1</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>2</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>3</p> </div> </div> </div>		% Perlita	58%	
			% Ferrita	35%
	<b>Ensaio (Ponto 02)</b>		% Perlita	59%
			% Ferrita	34%
<b>Ensaio (Ponto 03)</b>		% Perlita	50%	
		% Ferrita	44%	
<b>Dureza no núcleo</b>		<b>Encontrado</b>	234 a 246 HB	
<b>Ensaio Mecanicos</b>		RT	705N/mm <sup>2</sup>	
		ES	420N/mm <sup>2</sup>	
		AI	65%	

Fonte: O autor (2024)

## APÊNDICE Q – ANOVA PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0,0 % Nb	20	11552	577,6	245,515789
0,18% Nb	20	12712	635,6	525,094737
0,25% Nb	20	14050	702,5	267,315789
0,30% Nb	20	15142	757,1	487,989474

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	367016,4	3	122339	320,696072	4,8E-43	2,72494392
Dentro dos grupos	28992,4	76	381,479			
<b>Total</b>	<b>396008,8</b>	<b>79</b>				

Fonte: O autor (2024)

## APÊNDICE R – ANOVA PARA RESISTÊNCIA DE ESCOAMENTO

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0,0 % Nb	20	7235	361,75	59,9868
0,18% Nb	20	7572	378,6	92,6737
0,25% Nb	20	8470	423,5	145,421
0,30% Nb	20	9281	464,05	371,629

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	127621	3	42540,5	254,083	1,6E-39	2,72494
Dentro dos grupos	12724,5	76	167,428			
<b>Total</b>	<b>140346</b>	<b>79</b>				

Fonte: O autor (2024)

## APÊNDICE S – ANOVA PARA ALONGAMENTO

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0,0 % Nb	20	242,4	12,12	2,72063
0,18% Nb	20	204,1	10,205	0,43629
0,25% Nb	20	134,5	6,725	0,31145
0,30% Nb	20	122	6,1	0,38632

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	491,829	3	163,943	170,123	1,3E-33	2,72494
Dentro dos grupos	73,239	76	0,96367			
<b>Total</b>	<b>565,068</b>	<b>79</b>				

Fonte: O autor (2024)

## APÊNDICE T – ANOVA PARA DUREZA BRINELL

Anova: fator único

### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0,0 % Nb	20	4138	206,9	65,7789
0,18% Nb	20	4446	222,3	67,8
0,25% Nb	20	4768	238,4	56,7789
0,30% Nb	20	4992	249,6	57,6211

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	20913,2	3	6971,0667	112,446	7,2E-28	2,72494
Dentro dos grupos	4711,6	76	61,994737			
<b>Total</b>	<b>25624,8</b>	<b>79</b>				

Fonte: O autor (2024)

## APÊNDICE U – ANOVA PARA RESISTÊNCIA AO IMPACTO CHARPY

Anova: fator único

### RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
0,0 % Nb	17	262,9	15,46470588	47,9787
0,18% Nb	17	674,1	39,65294118	186,913
0,25% Nb	17	859,7	50,57058824	343,05
0,34% Nb	17	463,9	27,28823529	123,131

### ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	11778,61353	3	3926,20451	22,4011	4,9E-10	2,74819
Dentro dos grupos	11217,15412	64	175,2680331			
Total	22995,76765	67				

Fonte: O autor (2024)

## APÊNDICE V - CÁLCULO TAMANHO DA AMOSTRA

### CÁLCULO AMOSTRAL

Home Sobre Manual Orientação para Cálculo Cálculos

#### Tamanho da Amostra

Comparação entre mais de 2 Médias com Grupos Independentes (ANOVA)

Número de Grupos:

Estimativa do Desvio Padrão:

Mínima Diferença a ser Detectada:

Alfa (%):

Beta (%):

N:

População finita:  N:

Efeito do desenho:  N:

Perda de elementos (%):  N:

Fonte: Cálculo amostral ( 2024)