

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

ISAAC ASHER CABRAL

ANÁLISE DE ADIÇÃO DE NITROGÊNIO ATRAVÉS  
DE LIGA DE Fe-Mn-N EM FERRO FUNDIDO  
NODULAR

Porto Alegre

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

ANÁLISE DE ADIÇÃO DE NITROGÊNIO ATRAVÉS  
DE LIGA DE Fe-Mn-N EM FERRO FUNDIDO  
NODULAR

Trabalho de Diplomação do Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico, modalidade acadêmica.

Orientador: Vinicius Karlinski de Barcellos

Coorientador: Leonardo Pereira

Porto Alegre

2024

## CIP - Catalogação na Publicação

Cabral, Isaac Asher  
Análise de adição de nitrogênio através de liga de  
Fe-Mn-N em ferro fundido nodular / Isaac Asher Cabral.  
-- 2024.  
52 f.  
Orientador: Vinicius Karlinski de Barcellos.

Coorientador: Leonardo Pereira.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Ferro Fundido Nodular. 2. Fundição. 3.  
Metalografia. 4. Nitrogênio. I. de Barcellos, Vinicius  
Karlinski, orient. II. Pereira, Leonardo, coorient.  
III. Título.

Este trabalho é dedicado a Jesus, que esteve comigo durante toda graduação.

## AGRADECIMENTOS

A meu bom Deus que em nada me deixou faltar neste período extremamente desafiador. Seu Amor e cuidado me foram cruciais para suportar e finalizar esta ótima graduação.

A toda minha família por sua paciência, apoio e motivação em todos os momentos. Em especial meu pai, Caio por ser exemplo de homem trabalhador que me mostrou por através de si mesmo, como se portar frente ao cansaço e dificuldade. Minha mãe, Fátima por sua compreensão e amor. E por meu querido irmão e futuro engenheiro de energia, Shannon, pelos estudos juntos e pelas inúmeras conversas motivacionais.

Aos meus inúmeros amigos que encontrei pelo Campus do Vale, João Davi, Bryan, Marcos, Henrique e Raquel Zilz. Aos amigos que me receberam em suas casas sempre com um café, dando conselhos e apoios, Weslei, Renan e Juan. E aos meus amigos que sempre torceram por mim, Silas e Raquel Staub, Manoella e Jeisi.

Ao meu professor e orientador, Vinícius Karlinski de Barcellos, pelas suas aulas ministradas, visitas técnicas realizadas e por sua excelente orientação neste trabalho realizado.

Ao meu co-orientador Leonardo Pereira, por todo ensinamento, disponibilidade, dicas e sugestões, que me foram imprescindíveis para finalizar esta etapa.

A todos colegas de LAFUN, Túlio Nascimento, Régis Amaral, Sergio Bartex, e todos os outros, que me auxiliaram nas fusões, ensaios e que proporcionaram ótimos momentos juntos.

Às muitas empresas e engenheiros que disponibilizaram materiais, equipamentos e realizaram ensaios desta pesquisa. Especialmente, ao engenheiro Fábio Azevedo da Gerdau, ao engenheiro Carlos do IHR/Randon, a Paulo Bataier da JK Alloys, Tiago da Foseco e à empresa Italterm que doou os amostradores.

Aos meus colegas e amigos de Fundo Amanhã, Guilherme Camboim, Juliana Rocha e Yasmim Bazzan, por toda sua parceria, amizade e trabalho realizado juntos com desafio de melhorar ainda mais a excelente UFRGS. Em especial ao meu grande amigo e irmão em Cristo, Luan Spencer, pelas repreensões, ânimos e orientações profissionais.

Aos meus colegas de Maxiforja, Lucas Zingano, Augusto Reichelt e Matheus Schneider, que muito me ensinaram e deram oportunidade de grande aprendizado.

E a todos colegas que fui durante minha graduação, com estudos, risadas e momentos de dificuldade compartilhadas.

*“De fato, o ser humano passa como uma sombra.  
Em vão se inquieta; amontoa tesouros e não sabe  
quem ficará com eles.  
E eu, Senhor, que espero?  
Tu és a minha esperança.”*

*SALMOS 39:6,7*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
<b>RESUMO</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
2.1 Objetivos gerais .....	17
2.2 Objetivos específicos .....	17
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
3.1 Ferros Fundidos .....	18
3.2 Ferro Fundido Nodular .....	19
3.2.1 Propriedade mecânica relacionada ao número de nódulos .....	20
3.2.2 Efeito da composição química e elementos de liga em um Ferro Fundido Nodular .....	22
3.3 Nitrogênio em Ligas Ferrosas .....	23
3.3.1 Propriedades mecânicas adquiridas por adição de Nitrogênio .....	24
3.3.2 Propriedades metalúrgicas adquiridas por adição de nitrogênio .....	25
3.3.3 Solubilidade de Nitrogênio em ligas ferrosas.....	25
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
4.1 Composição do Ferro Fundido Nodular .....	28
4.2 Elaboração de bacia de vazamento .....	30
4.3 Fusão, seus parâmetros e análise química .....	32
4.4 Análise Metalográfica .....	32
4.5 Análise do nitrogênio.....	32
4.6 Dureza .....	33

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>35</b>
5.1	Análise Química	35
5.2	Análise Microestrutural	37
5.2.1	Análise de nodularização	37
5.2.2	Análise de microestrutura da matriz com ataque	40
5.3	Dureza	44
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>48</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C	17
Figura 2 – Microestrutura de um ferro fundido Nodular	19
Figura 3 - Variação Tenacidade x Temperatura de ferros fundidos ferríticos com diferentes números de nódulos.	20
Figura 4 - Dimensão de Classes de Grafitas	21
Figura 5 – Diagrama Tensão x Deformação três ligas de aço inoxidável com adição de nitrogênio	23
Figura 6 – Solubilidade do nitrogênio no aço em relação a temperatura	25
Figura 7 - Fluxograma de processo de Fusões, análises e ensaios realizados	26
Figura 9 – Dimensões CPy utilizado para fusão	29
Figura 10 – Corpo de prova com Geometria CPy logo após desmoldagem	29
Figura 11 – Modelo da bacia de vazamento realizada visualizado em CAD	30
Figura 12 – Bacia de Vazamento em areia cura frio.	30
Figura 12– Região extraída para realização do ensaio de dureza	32
Figura 13 – Regiões de medição de dureza	33
Figura 14 – Gráfico de Absorção de nitrogênio	35
Figura 15 - Grau de Nodularização segundo norma ASTM A247-19	36
Figura 16 – Amostra V, P e N sem ataque e com grafitas não nodularizadas indicadas pelos círculos vermelhos (aumento de 100 vezes).	37
Figura 17 – Número de nódulos por milímetro quadrado	38
Figura 18 – Distribuição do tamanho dos nódulos de acordo com a fusão	38
Figura 19 - Microestrutura de Ferro Fundido Nodular das amostras e da bibliografia (GN - Nódulo de grafita, P - Perlita, F - Ferrita)	39
Figura 20 - Carbonetos metálicos formados em Ferro Fundido Nodular	40
Figura 21- Microestrutura de Ferro fundido nodular, apresentando estágio de formação de "olho de boi"	41
Figura 22– Microestrutura da amostra N demarcada com início de formação de “olho de boi” (aumento de 1000 vezes)	41
Figura 23 – Microestrutura da Amostra V com presença de perlita, nódulos de grafita, ferrita e carboneto indicado por seta. (aumento de 1000 vezes)	42

Figura 24 – microestrutura de amostra P com ataque colorido com carboneto indicado por seta vermelha (aumento de 1000 vezes)

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Faixa de composição química de Ferros Fundidos	19
Tabela 2 – Carga do Forno para Fusão	28
Tabela 3 – Composição Fe-Mn-N	29
Tabela 4 – Nitrogênio objetivado	29
Tabela 5 – Composições alcançadas nas diferentes fusões	35
Tabela 6 - Quantidade de nitrogênio presente nas amostras fundidas	36
Tabela 7 – Resultado do ensaio de dureza	45

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CPy	Corpo de Prova em formato Y
g	Gramas
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
HB	Dureza Brinell
Kg	Quilo
kfg	Quilograma-força
LAFUN	Laboratório de Fundição
ml	Mililitros
mm	Milímetros
ppm	Partes por milhão
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
µm	Micrometros

## RESUMO

Em ferros fundidos ADI, o níquel tem função de estabilizar a austenita na microestrutura, semelhantemente em aços inoxidáveis o nitrogênio possui a mesma propriedade; contudo, não há muitos estudos desta aplicação nos Ferros Fundidos. Então o objetivo deste trabalho é avaliar métodos de adição de nitrogênio e a curva de rendimento de absorção do nitrogênio em uma liga de ferro fundido, utilizando granulados de uma liga de Fe-Mn-N. Duas geometrias foram testadas, a primeira para determinar a curva de rendimento e a segunda para avaliar dureza e microestrutura. Os resultados indicam que é possível alcançar até 12% de rendimento de absorção do nitrogênio, proporcionando um aumento de até 10% da dureza HB quando a liga Fe-Mn-N é adicionada diretamente na panela após a nodularização. A microestrutura apresentou pequenos grãos que acredita-se tratar de grãos de carbonetos, mas em pequena quantidade. Contudo, conforme o método de adição de nitrogênio, pode-se acarretar uma perda de eficiência de até 20% na contagem de nódulos, ainda que a distribuição dos mesmos não tenha variação relevante.

**Palavras-chave: Ferro Fundido Nodular, Nitrogênio, microestrutura, carbonetos, propriedades metalúrgicas, propriedades mecânicas.**

## ABSTRACT

In ADI cast irons, nickel functions to stabilize the austenite in the microstructure, similarly to how nitrogen behaves in stainless steels; however, there are not many studies on this application in cast irons. Therefore, the aim of this work is to evaluate methods of nitrogen addition and the nitrogen absorption yield curve in a cast iron alloy, using granules of an Fe-Mn-N alloy. Two geometries were tested, the first to determine the yield curve and the second to evaluate hardness and microstructure. The results indicate that it is possible to achieve up to 12% nitrogen absorption yield, resulting in a hardness increase of up to 10% HB when the Fe-Mn-N alloy is added directly to the ladle after nodularization. The microstructure showed small grains believed to be carbide grains, but in small quantities. However, depending on the nitrogen addition method, it can lead to an efficiency loss of up to 20% in nodule count, although their distribution does not vary significantly.

**Keywords: Nodular Cast Iron, Nitrogen, microstructure, carbides, metallurgical properties, mechanical Properties.**

## 1 INTRODUÇÃO

Ferros fundidos são materiais de ampla utilização na indústria de muitas áreas produtivas. Os Ferros fundidos podem ser subdivididos nas seguintes categorias: Ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido maleável, ferro fundido de grafita compactada e ferro fundido nodular. Destes, o ferro fundido nodular ADI surgiu nos anos de 1970 e sabe-se que são caracterizados por alta ductilidade, módulo de elasticidade e resistência mecânica (TELES, 2007).

Para o desenvolvimento desta liga, foi selecionado para adição o nitrogênio como elemento de liga, sua escolha partiu devido a que sua presença na atmosfera é extremamente abundante, correspondendo até 70% de todo ar atmosférico. Este fato coopera muito, pois sua abundância e facilidade de extração, possibilitam que seja uma alternativa com grande eficiência de sustentabilidade se a sua adição na liga metálica realmente resultar em ganho de propriedades mecânicas. Segundo Horovitz (1995), a adição de nitrogênio sempre foi considerada deletéria, mas estudos recentes indicam que sua presença em aços resulta em maior resistência ao escoamento, resistência a fluência e aumento de tenacidade presente em solução sólida. Horovitz (1995) ainda aponta que o processo de adição de nitrogênio em aços é realizado com equipamento de alta pressão dada sua grande dificuldade de se manter em solução de forma estável.

No caso de Ferros fundidos, há poucos e recentes estudos, tais quais Tong (2020), Lin et al (2022) e Strande (2017), que indiquem a adição de nitrogênio em suas ligas, dado que o reconhecimento do nitrogênio como possivelmente benéfico, se deu a relativamente pouco tempo. Compreende-se então, que o primeiro desafio relacionado a isso não é unicamente a influência nas propriedades mecânicas, mas a verdadeira possibilidade de realizar essa adição na liga. Somado a isso, acredita-se que é possível que este mesmo nitrogênio possa impactar na facilitação de tratamentos térmicos nas ligas formadas, isso pois o nitrogênio possui, por exemplo, a capacidade de estabilizar a austenita Ilola (1998). Estudiosos, tal qual Delong (1974), dizem que essa capacidade pode chegar em até 30 vezes a capacidade do Níquel. Sabe-se que o Níquel é um elemento essencial para produção de Ferro Fundido Nodular ADI, em que envolve o tratamento térmico de austêmpera por causa de sua elevada capacidade de estabilizar a austenita. Nos aços, o nitrogênio possui capacidade similar de estabilização da austenita e seria um excelente substituinte do níquel no Ferro Fundido Nodular ADI caso

adicionado de maneira efetiva. Por isso, neste trabalho, será estudado a viabilidade de absorção de nitrogênio no processo de desenvolvimento de uma liga de ferro fundido nodular, visto que há poucos estudos que analisam o nitrogênio em Ferros Fundidos Nodulares.

Acredita-se também então que se o nitrogênio for adicionado de maneira efetiva, sua aplicação pode resultar em considerável redução de custos, pois pode reduzir a utilização de Níquel que é um elemento de liga de alto valor.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos gerais

Essa pesquisa tem como objetivo avaliar a possibilidade de adição de nitrogênio em solução em uma liga fundida de ferro fundido nodular através de uma liga de Fe-Mn-N em diferentes métodos.

### 2.2 Objetivos específicos

Determinar o rendimento das adições de nitrogênio através da adição de liga de Fe-Mn-N em ferro fundido nodular através de dispositivo desenvolvido e diretamente na panela de vazamento sem que ocasione defeitos.

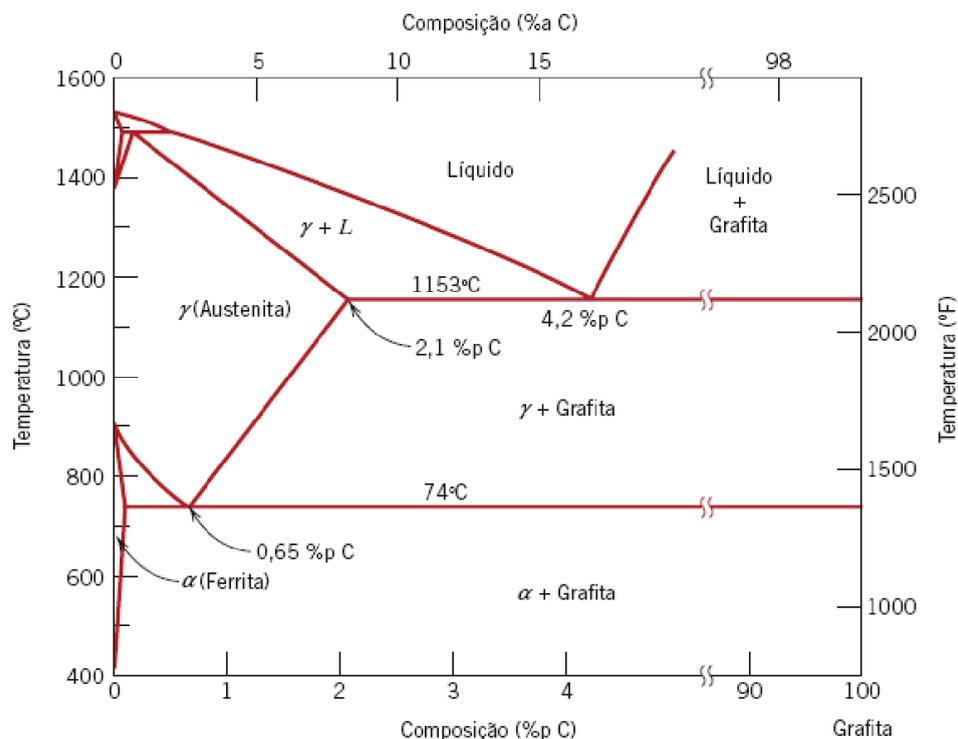
Realizar comparação entre diferentes métodos de adição adotados para incorporação de nitrogênio na liga, adicionando na bacia de vazamento do molde ou diretamente na panela de vazamento e avaliar a influência dessas adições na composição química, nodularização, dureza do material e na microestrutura.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Ferros Fundidos

Segundo Callister (2016), ferros fundidos são uma classe de ligas ferrosas que possuem carbono acima de 2,14%, apesar dessa definição extremamente abrangente, é comum que as ligas de ferro fundido contenham aproximadamente de 3% a 4,5% de Carbono presente, o valor de 2,14% é estabelecido pois é o limite de solubilidade da austenita como indicado pela Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C



Fonte: Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução, CALLISTER

Segundo Liu (2019), subdividem-se os Ferros Fundidos como ferro fundido branco, cinzento, maleável e nodular. Como mostra a Tabela 1, existem diferentes composições químicas utilizadas para cada tipo citado.

Tabela 1 - Faixa de composição química de Ferros Fundidos

Tipo	Composição Química (%)				
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
<b>Branco</b>	1,8 – 3,6	0,5 – 1,9	0,25 – 0,80	0,06 – 0,20	0,06 – 0,20
<b>Maleável</b>	2,2 – 2,9	0,9 – 1,9	0,15 – 1,20	0,02 – 0,20	0,02 – 0,20
<b>Cinzento</b>	2,5 – 4,0	1,0 – 3,0	0,20 – 1,00	0,02 – 0,25	0,02 – 1,00
<b>Nodular</b>	3,0 – 4,0	1,8 – 2,8	0,10 – 1,00	0,01 – 0,03	0,01 – 0,10

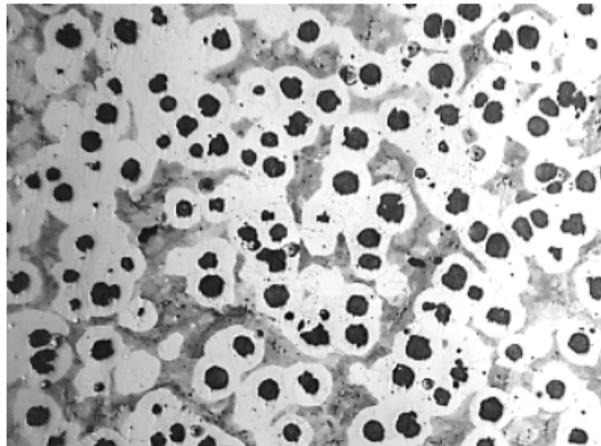
Fonte: Adaptação de CHIAVERINI, (1977)

Os elementos de liga presentes nos ferros fundidos têm diferentes propósitos e impactos; esses aspectos, contudo serão discutidos em seções posteriores. Cabe agora reconhecer que essas variações de composição química implicam em propriedades mecânicas desvantajosas ou vantajosas. Cada uma das ligas de Ferro Fundido apresenta diferentes propriedades mecânicas, possibilitando uma extensa aplicação dessas ligas nas indústrias em geral, desde a mineração até indústrias automotiva.

### 3.2 Ferro Fundido Nodular

O Ferro fundido Nodular é um tipo de ferro fundido onde a grafita presente se encontra de forma esferoidal, tal qual apresentado na Figura 2. Ela acontece, devido a adição de elementos de liga nodularizantes, tais quais Ce ou Mg; contudo, por questões, principalmente, econômicas e de adaptação, a adição de magnésio é mais utilizada, podendo ser adicionada nas mais diversas formas, tais quais as ligas de Ni-Mg, Ni-Si-Mg, Fe-Si-Mg e até mesmo via coque de magnésio (ELLIOT, 1988).

Figura 2 – Microestrutura de um ferro fundido Nodular



Fonte: ORLOWICZ et al – Cavitation Erosion of Nodular Cast Iron, Microstructural Effects (2017)

O que caracteriza vantagem nos ferros fundidos nodulares, são suas propriedades mecânicas superiores, apesar de propriedades físicas inferiores, tal qual a condutividade térmica (ELLIOT, 1988). O que possibilita essas propriedades serem superiores é a capacidade dos nódulos de agirem como inibidores de propagação de trincas.

Apesar da Figura 2 apresentar um ferro fundido nodular, é importante lembrar que há diversos tipos de matrizes possíveis nos ferros fundidos nodulares, possibilitando uma gama de propriedades distintas dentro desse subgrupo. O ferro fundido nodular pode ter as seguintes matrizes em um ferro fundido nodular: Ferrítico, Perlítico, Ferrítico-Perlítico e aqueles produzidos via tratamentos térmicos, tais como Martensítico, Austenítico e Ausferrítico. (MALUF, 2002).

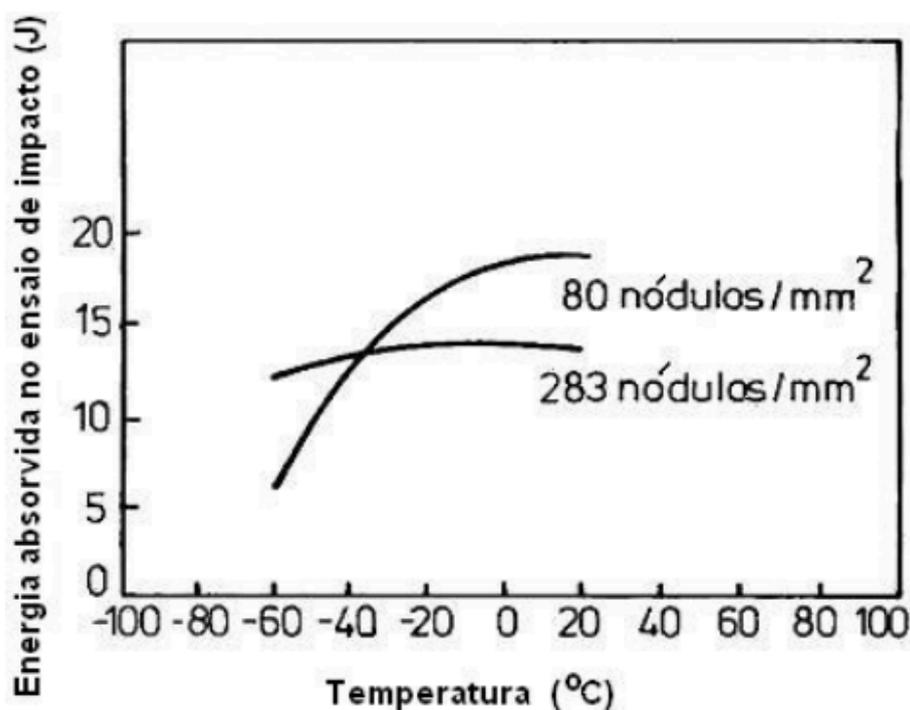
### 3.2.1 Propriedade mecânica relacionada ao número de nódulos

Segundo Silva (2005), o número de nódulos influencia as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular, positivamente em grande parte das vezes, aumentando, por exemplo, resistência a tração; contudo, um número excessivo de nódulos

pode resultar em menos perlita formada, diminuindo assim a resistência e aumentando o alongamento.

De acordo com Mullins (2004), à medida que o número de nódulos aumenta, verifica-se uma maior homogeneidade nas propriedades mecânicas do material, especialmente em resposta às variações de temperatura. Além disso, é possível observar um incremento na resistência à fadiga e na usinabilidade do material. A Figura 3 mostra a relação existente entre a tenacidade e a quantidade de nódulos presentes, onde observa-se que a liga com maior número de nódulos/área apresenta menor variação da tenacidade ao impacto em função da temperatura.

Figura 3 - Variação Tenacidade x Temperatura de ferros fundidos ferríticos com diferentes números de nódulos.



Fonte: SILVA, 2005. Adaptado de BCIRA Production of ductile iron. Birmingham, (199\_).

A norma ASTM A247-19 (2019) é quem rege as especificações referentes aos nódulos de grafita. De acordo com ela, os nódulos subdividem-se em classes de tamanhos especificados por uma faixa de pré-determinada conforme a Figura 4. O grau

de nodularização segundo a norma é caracterizado como a porcentagem do número de nódulos em relação ao número de grafitas. Para um ferro fundido ser nodular é necessário que seu grau de nodularização seja de no mínimo 80 %.

Figura 4 - Dimensão de Classes de Grafitas

<b>Tamanho de grafita</b>	
Classes	Dimensão Real ( $\mu\text{m}$ ) <sup>A</sup>
1	$\geq 640$
2	320 to <640
3	160 to <320
4	80 to <160
5	40 to <80
6	20 to <40
7	10 to <20
8	<10

Fonte: ADAPTADO, ASTM A247-19 (2019)

### 3.2.2 Efeito da composição química e elementos de liga em um Ferro Fundido Nodular

Dentre dos elementos que compõe os ferros fundidos nodulares cita-se o Carbono, Silício, Manganês, Fósforo, Oxigênio e Enxofre. O Objetivo desta seção será descrever o impacto de cada um desses elementos, vale lembrar que o nitrogênio também será estudado nesta pesquisa, mas terá um capítulo à parte.

CARBONO – O carbono é o elemento de maior importância nos Ferros Fundidos Nodulares, essa importância se dá tendo em vista que a grafita é basicamente carbono, a sua presença (ou ausência) e sua morfologia trazem real impacto mecânico em um material. Devido à natureza frágil da grafita, a incorporação de carbono pode tornar um material mais susceptível à fragilidade. Vale ressaltar que o impacto não é exclusivamente atribuído ao carbono em si, mas também ao seu equivalente de carbono, o qual é diretamente influenciado tanto pelo teor de carbono quanto pelo teor de silício.

O objetivo é atingir uma porcentagem de 4,3 a 4,7% de carbono equivalente para otimizar as propriedades desejadas do material (SANTOS, 2000).

**SILÍCIO** – O Silício de acordo com SANTOS (2000), apresenta diversas funções e resulta em diversos impactos dependendo da matriz resultante, tal como por ser um elemento grafitizante, ou seja, que propicia que o carbono se encontre de forma de grafita, aumentando a solubilidade na austenita.

**MANGANÊS** – Ao contrário do silício, o manganês atua aumentando a solubilidade do carbono na austenita, o que favorece a formação de perlita. (SUGUYAMA,1972). Segundo SANTOS (2000) os teores do manganês em ferro fundido nodular varia entre 0,3 a 1,2%, dependendo da microestrutura desejada e da espessura da seção.

**FÓSFORO** – O fósforo ao contrário dos elementos anteriores, é considerado um contaminante, pois a concentração de fósforo no ferro base resulta em aumento excessivo da fragilidade do material por conta da formação da fase steadita. Porém, observa-se o aumento de algumas propriedades de fluidez, limite de resistência a tração, escoamento, dureza e diminuição do alongamento (SANTOS, 2000).

### 3.3 Nitrogênio em Ligas Ferrosas

Há poucos e recentes estudos referentes a adição de nitrogênio em Ferro Fundido Nodular; portanto, para ter um apoio mais adequado, utilizou-se bibliografias de aços inoxidáveis em que a adição de nitrogênio já apresenta maiores informações na bibliografia. Essa análise é tomada, pois os aços apresentam microestrutura com considerável similaridade dos Ferros Fundidos Nodulares. Entretanto, cabe-se realizar mais pesquisas de forma a sustentar as informações.

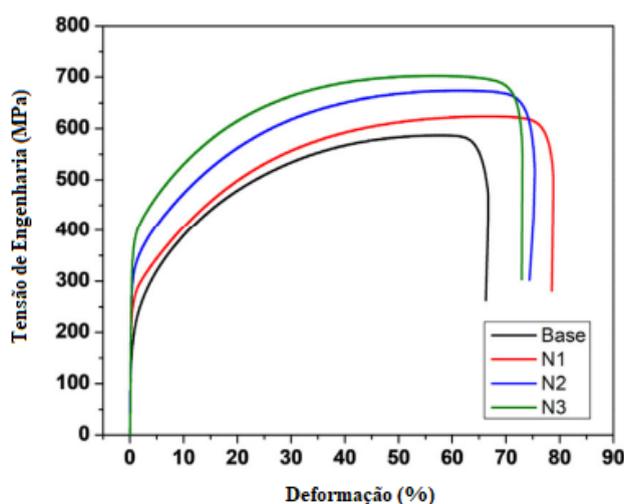
#### 3.3.1 Propriedades mecânicas adquiridas por adição de Nitrogênio

De acordo com SAENARJHAN, KANG e KIM (2018) que estudaram a variação da adição de nitrogênio em uma liga de aço inoxidável, nas quantidades de 0,1, 0,2 e 0,3% N, correspondo as amostras N1, N2 e N3, respectivamente.

O Resultado encontrado por eles indica que diversas propriedades são elevadas pela adição do nitrogênio, havendo um aumento considerável no limite de escoamento,

na tensão de ruptura e até no alongamento; contudo, pode-se verificar que, apesar do aumento em relação a base, ele diminui conforme aumenta-se o N. Essas informações são observadas conforme a Figura 5.

Figura 5 – Diagrama Tensão x Deformação três ligas de aço inoxidável com adição de nitrogênio



Fonte: Adaptado de SAENARJHAN, KANG e KIM (2018).

Além dessas propriedades, de acordo com KIM, CHANG e RYU (2008) em seus estudos recentes sobre o desenvolvimento de aços inoxidáveis austeníticos, afirmam que a introdução de nitrogênio em solução aumenta a vida em fadiga do material, pois quando adicionado, dificulta o movimento de discordâncias na zona plástica e retardando o crescimento de trincas por fadiga.

### 3.3.2 Propriedades metalúrgicas adquiridas por adição de nitrogênio

SAENARJHAN, KANG e KIM (2018) em seus experimentos afirmam que o nitrogênio atua fortemente como estabilizador da austenita, indicando que uma mesma liga de aço, quando temperado e não adicionado o nitrogênio apresentou uma matriz quase toda austenítica com uma pequena porcentagem de martensita, mas que as três amostras N1, N2 e N3, quando passado pelo mesmo tratamento, apresentaram apenas austenita em sua composição. Além disso, os autores vão adiante e analisam a formação

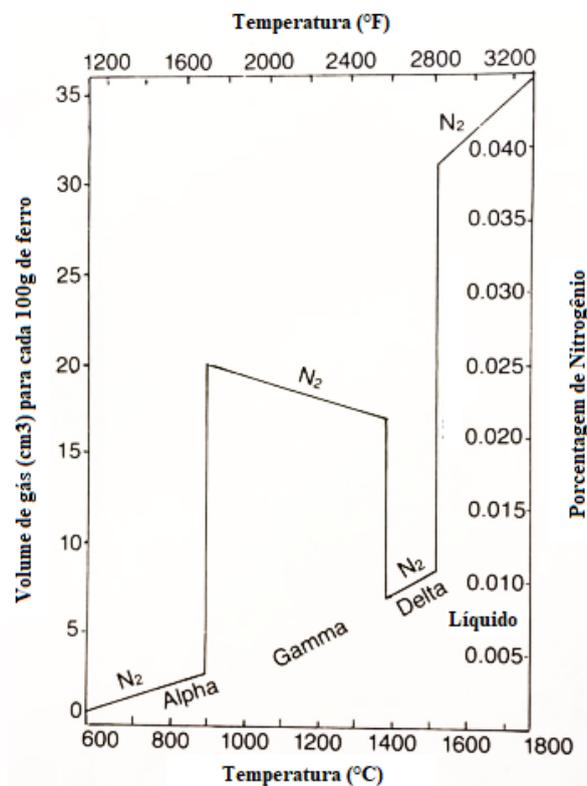
de martensita por deformação e seus resultados expõe que quanto maior a quantidade de nitrogênio dissolvido, menor a transformação de microestrutura, reforçando ainda mais que o nitrogênio atua como forte estabilizador de austenita.

Outro aspecto que deve-se analisar quando verifica-se o impacto da adição de nitrogênio é avaliar como o material se comporta em relação a sua corrosividade. Para tais casos, não há consistência de resultados, pois em corrosão uniforme há autores que encontraram resultados positivos, enquanto há outros que encontraram resultados negativos. (LO; SHEK e LAI, 2009)

### 3.3.3 Solubilidade de Nitrogênio em ligas ferrosas.

BARRETOS (1995), indica que a solubilidade do nitrogênio em aços depende de uma série de parâmetros, tais quais a pressão parcial do gás, temperatura e outros elementos químicos. Outro aspecto que influencia na solubilidade do Nitrogênio, se refere aos elementos de liga presentes. Segundo GRAVIJUK et al (2000), o carbono diminui a solubilidade do nitrogênio em liga, pois tende a ocupar os mesmos interstícios que seriam ocupados pelo nitrogênio. Em condições padrões, a solubilidade do nitrogênio no aço em condições padrões é indicado conforme o diagrama da Figura 6.

Figura 6 – Solubilidade do nitrogênio no aço em relação a temperatura



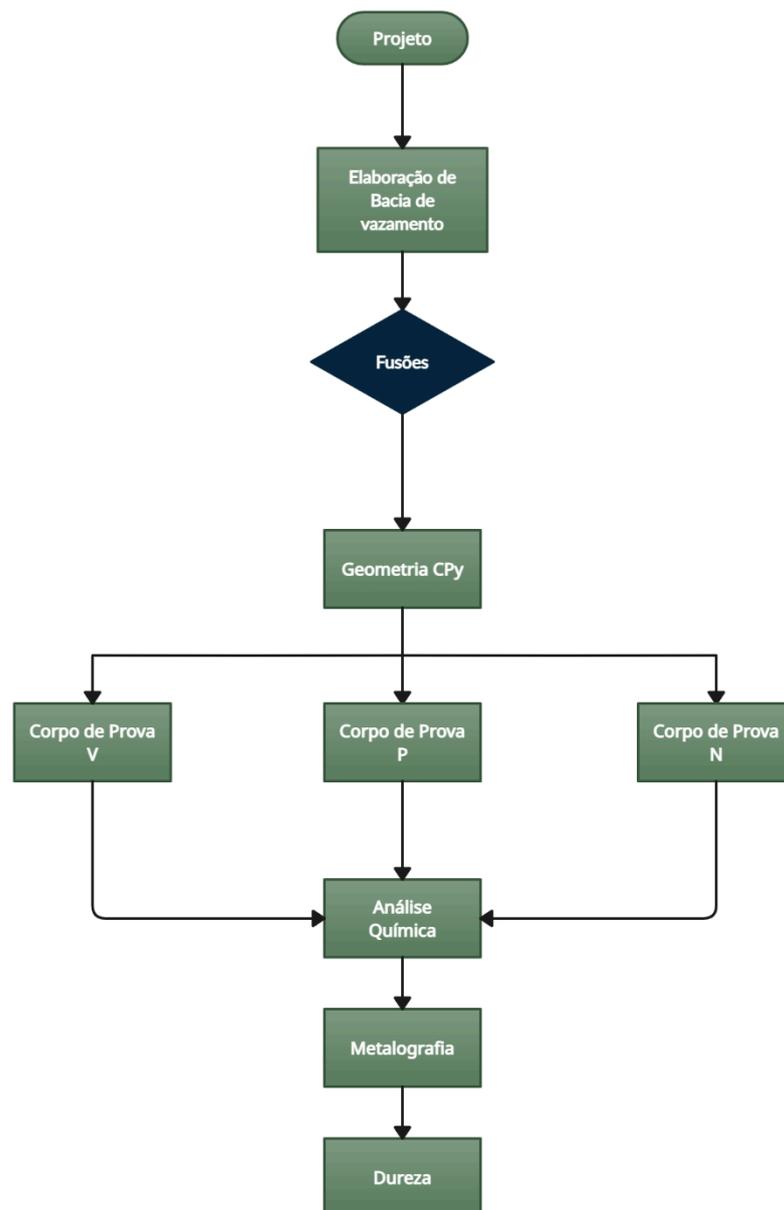
Fonte: Adaptado de FARQUHAR (1979), que adaptou de Basic Open Hearth Steelmaking” (1951).

SIAMAKAS (2012), diz que a quantidade necessária de nitrogênio para causar defeito de porosidade em um ferro fundido varia entre 110-150 ppm. Já GREENHILL e REYNOLDS (1981), indicam que esse defeito começa a surgir a partir de 100 ppm.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados quais os métodos utilizados e os materiais empregados para as fusões e ensaios realizados para avaliação. Para melhor ilustrar todo processo, foi elaborado o seguinte fluxograma exposto na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma de processo de Fusões, análises e ensaios realizados



Fonte: O Autor.

#### 4.1 Composição do Ferro Fundido Nodular

A liga foi confeccionada no Laboratório de Fundição da UFRGS (LAFUN), utilizando o forno de indução eletromagnética, marca Inductotherm, de média frequência, 20 kVA, com capacidade de fusão de até 9 kg de carga. Para chegar à composição desejada, foi fundido os materiais em quantidades que são apresentadas na Tabela 3, havendo algumas pequenas variações que serão descritas mais adiante.

Tabela 2 – Carga do Forno para Fusão

<b>Carga (g)</b>				
<b>Aço 1013</b>	<b>Retorno de Ferro Nodular</b>	<b>Carbono de eletrodo de grafita</b>	<b>Ni</b>	<b>Fe-Si</b>
4000	3600	165	80	70
<b>Inoculante</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe-Mo</b>	<b>Si-C</b>	<b>Ca-S</b>
50	43	20	20	2

Fonte: O Autor.

Houve 3 fusões para produção das amostras V, P e N respectivamente, com formato de corpo de prova padrão modelo “Y” para ferro fundido (CPy). Cada amostra tinha adição de nitrogênio objetivada, conforme Tabela 4 e uma liga de Fe-Mn-N, com composição conforme Tabela 3. A amostra P foi realizada com adição de nitrogênio diretamente na panela de vazamento, a amostra N foi realizada sem adição de nitrogênio e a amostra V foi realizada utilizando bacia de vazamento projetada.

Tabela 3 – Composição Fe-Mn-N

<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>N</b>	<b>C</b>
Bal	70%	8%	0,90%
<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>
0,20%	0,01%	0,50%	1,50%

Fonte: O Autor

Tabela 4 – Nitrogênio objetivado

<b>Geometria</b>	<b>Amostra</b>	<b>N Objetivado (ppm)</b>	<b>Fe-Mn-N Adic. (g)</b>
<b>CPy de 13 mm</b>	V	600	18,68
	P*	600	59,77
	N**	0	0

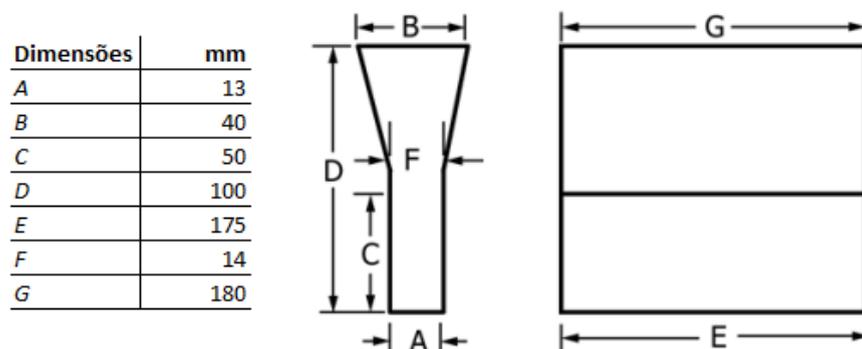
\* Fe-Mn-N adicionado diretamente na panela após reação de nodularização

\*\*Não houve adição de Fe-Mn-N

Fonte: O Autor

A geometria CPy, contudo, foi estabelecido conforme as dimensões dadas na norma ASTM A897/A897M – 16 (2016). Pode-se observar as dimensões conforme Figura 9 e o resultado desta fusão conforme Figura 10.

Figura 9 – Dimensões CPy utilizado para fusão



Fonte: ADAPTADO, ASTM A247/A247M – 22 (2022).

Figura 10 – Corpo de prova com Geometria CPy logo após desmoldagem

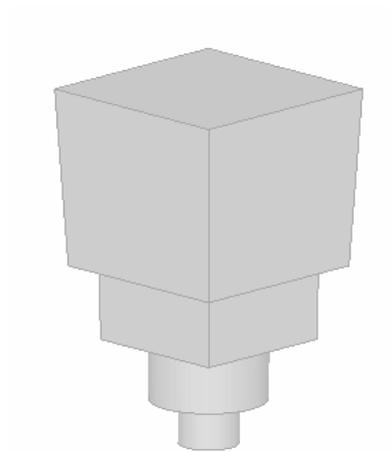


Fonte: O Autor

#### 4.2 Elaboração de bacia de vazamento

A bacia de vazamento citada, se refere a um molde em areia, cujo objetivo é proporcionar um suporte sobre o qual, durante o vazamento, é colocado um filtro cerâmico quadrado de carbetto de silício de dimensões 50 x 50 x 22 milímetros para que parte dos elementos de liga sejam adicionados, durante este trabalho irá ser mencionado essa bacia como dispositivo. O modelo para esse molde, foi confeccionado utilizando software de modelagem 3D e impressão via manufatura aditiva com material PLA. A Figura 11 apresenta o desenho CAD.

Figura 11 – Modelo da bacia de vazamento realizada visualizado em CAD



Fonte: O Autor.

O molde feito a partir deste modelo, portanto, é um bloco em areia cura frio (silicato de sódio-CO<sub>2</sub>) com uma cavidade que atende os requisitos necessários para servir de dispositivo, conforme Figura 12, onde o filtro cerâmico já se encontra posicionado.

Figura 12 – Bacia de Vazamento em areia cura frio.



Fonte: O Autor.

### 4.3 Fusão, seus parâmetros e análise química

As fusões foram realizadas a uma temperatura de 1500°C ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ). A seguir vazadas para panela, contendo 80 gramas de nodularizante (Fe-Si-Mg). Os vazamentos das amostras P e N foram realizados diretamente no molde CPy e o vazamento da amostra V foi realizada utilizando a bacia de vazamento. A desmoldagem foi feita logo após constatado que as amostras não estavam mais ao rubro e deixadas para resfriarem ao ar. Todas as amostras foram vazadas também a uma temperatura de 1400°C ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ) no dispositivo, onde passaram por um filtro cerâmico, por onde estava depositado Fe-Mn-N granulado, escoando até seus devidos moldes em areia. Os parâmetros de temperatura foram estabelecidos conforme BAGATINI (2023).

### 4.4 Análise Metalográfica

A metalografia das amostras e o processo de preparo das amostras foram realizadas no LAFUN. As amostras foram serradas utilizando uma serra mecânica simples de forma a amostras menores para metalografia. Obtidas as amostras reduzidas, elas passaram por um processo de lixamento manual, envolvendo lixas que aumentam gradualmente sua granulometria partindo de 100 até 1200. Logo após, utilizando politriz metalográfica em disco, foi realizado o polimento das amostras com alumina 1,0  $\mu\text{m}$  e pasta de diamante de 0,25  $\mu\text{m}$ .

Foi utilizado para atacar a superfície polida, Nital 2% (2% de ácido nítrico, 98% álcool), revelando então a microestrutura da superfície e observada através de microscópio metalográfico de modelo Olympus BX51M e conectado ao software de análise de imagem da Buehler Omnimet. Semelhantemente, utilizando rotina automatizada do software, foi realizado a contagem de nódulos em aumento de 100x.

Fotos das microestruturas foram salvas no computador conectado ao microscópio. A seguir, para revelar possíveis carbonetos formados, foi colocado as amostras em um forno mufla, pelo tempo de 6 horas a 260°C e analisado no microscópio para avaliação (BOSNJAK, 2021).

### 4.5 Análise do nitrogênio

Em parceria com a empresa Gerdau Aços Finos, as amostras foram encaminhadas para análise do nitrogênio em específico. O equipamento utilizado foi o

analisador elementar LECO OHN 836 através de infravermelho. Para análise, foi necessário que o material enviado fosse transformado em um pino retangular (de dimensões 5 x 5 x 80 mm).

#### 4.6 Dureza

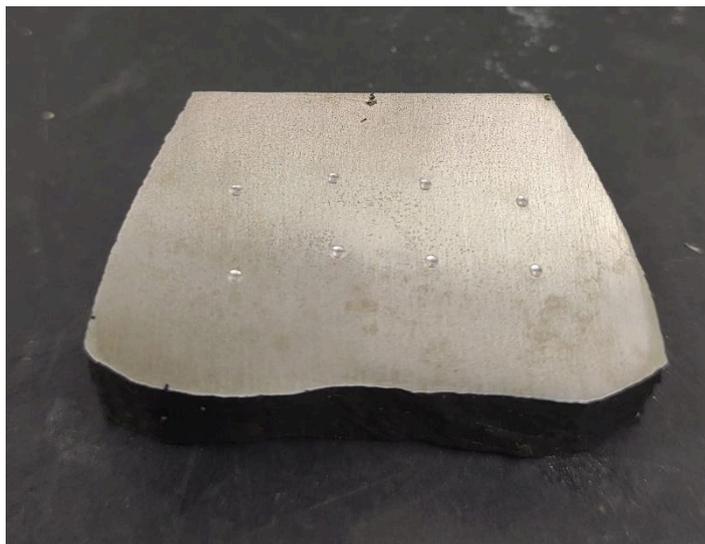
A análise de dureza foi realizada no LAFUN utilizando o durômetro analógico Mitutoyo DT 20, com carga aplicada de 187,5 kgf e com esfera de 2,5mm para medir dureza Brinell. As localizações da região de corte em que foi retirado a amostra para medição de dureza, são a 36 mm da extremidade e com espessura de 12 mm a altura é de 30 mm, tal qual apresentado na Figura 12. Foi realizado a média da dureza em relação a oito pontos de medição distintos nesta amostra tal qual Figura 13.

Figura 12– Região extraída para realização do ensaio de dureza



Fonte: O Autor.

Figura 13 – Regiões de medição de dureza



Fonte: O Autor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados todos os resultados das análises e ensaios realizados, tal como irá se discutir as possíveis causas e soluções.

### 5.1 Análise Química

As composições químicas das ligas fundidas estão expressas na Tabela 5, utilizando a norma ASTM A897/897M-16 que prevê composições químicas para liga de Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI) como parâmetro. Nota-se também, que a adição de Fe-Mn-N ocasionou elevado teor de manganês superando o orientado pela norma.

Tabela 5 – Composições alcançadas nas diferentes fusões

Composições (% de massa)							
	Fe (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)
<b>N</b>	91,090	3,44	2,47	0,4	0,093	0,12	1,10
<b>V</b>	90,850	3,50	2,65	0,6	0,089	0,12	1,23
<b>P</b>	89,850	3,57	2,58	1,4	0,092	0,12	1,24
<b>Alvo</b>	Bal	3,62	2,37	0,3	0,130	0,06	1,22
<b>ASTM A897/897M - 22</b>		3,4 - 3,8 %	2,3 - 2,7 %	0,6 % Máx		0,3 % Máx	2,00 % Máx

Fonte: O Autor.

Em relação ao nitrogênio, ele não é orientado pela norma, sendo o objetivo deste trabalho pesquisá-lo; portanto, ele será discutido separadamente. Três fatores desta incorporação foram analisados, sendo eles a quantidade de nitrogênio propositalmente adicionado, a quantidade de nitrogênio encontrado nas análises químicas das amostras e a adição efetiva que desconsidera a quantidade de nitrogênio que já há na amostra N, conforme Tabela 6.

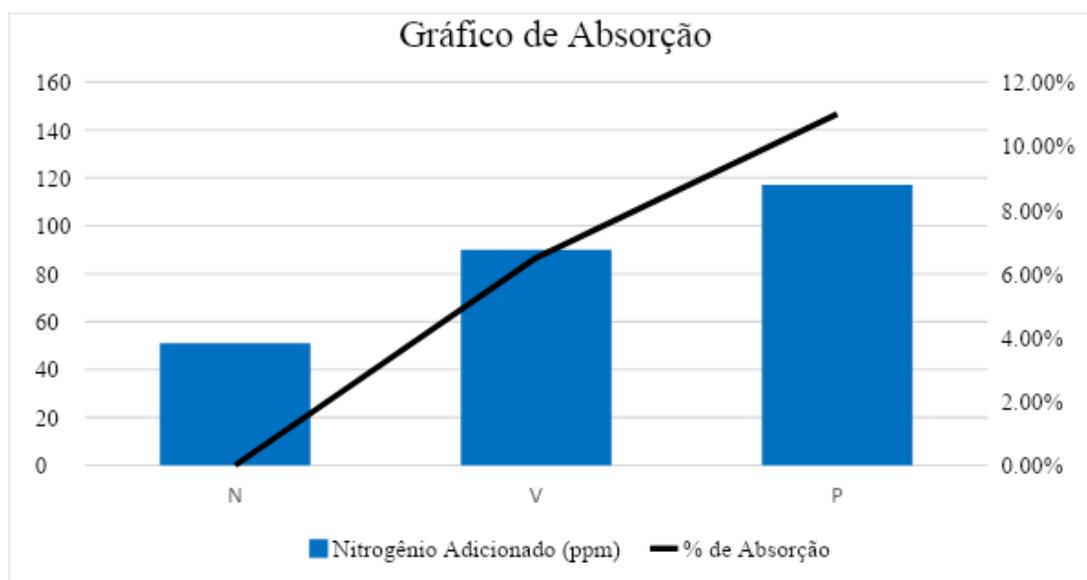
Tabela 6 - Quantidade de nitrogênio presente nas amostras fundidas

Amostra	N adicionado (ppm)	N (ppm)	Adição efetiva (ppm)
N	0	51	-
V	600	90	39
P	600	117	66

Fonte: O Autor

Com as composições alcançadas e sabendo que no material neutro já há certa quantidade de nitrogênio, pode-se realmente estabelecer a curva de rendimento de cada amostra e tratar os motivos para tal. A curva dita está expressa conforme Figura 14.

Figura 14 – Gráfico de Absorção de nitrogênio



Fonte: O Autor

Como pode-se observar, houve uma crescente no que se refere a absorção, sendo importante destacar que apesar de haver absorção do nitrogênio com uso do dispositivo, a adição na amostra P se mostrou mais eficiente.

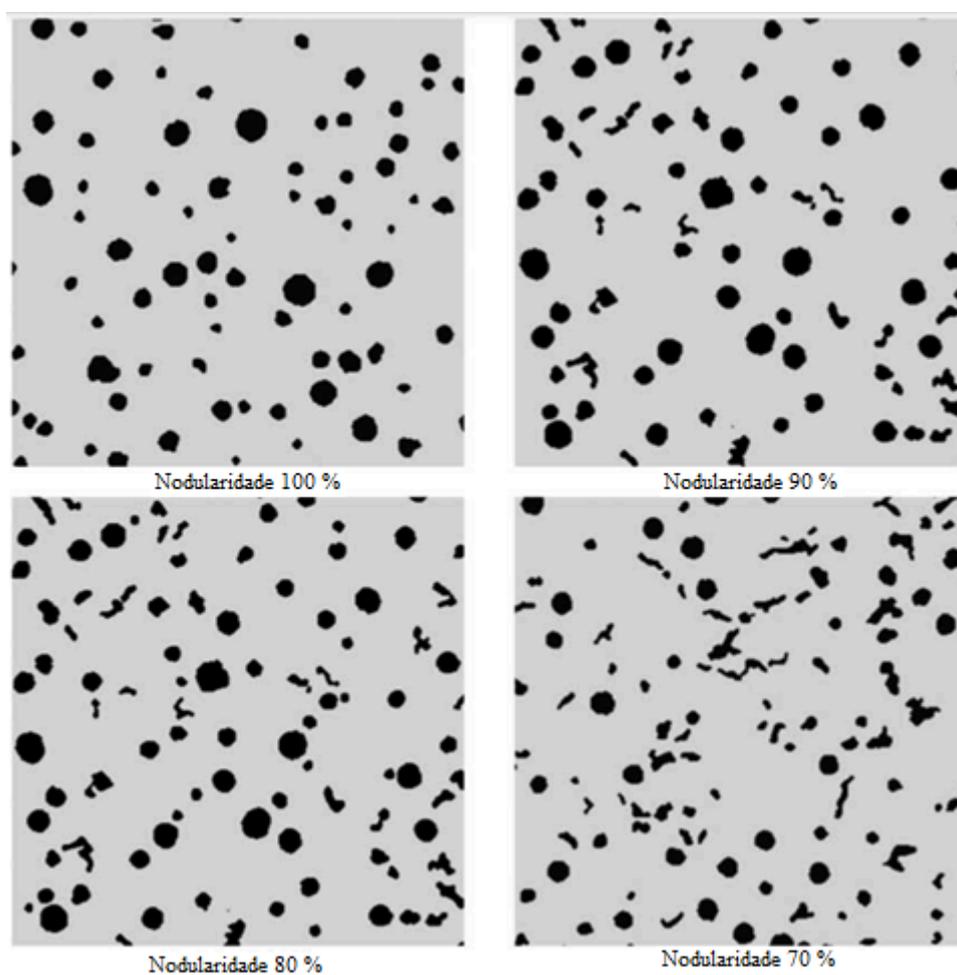
## 5.2 Análise Microestrutural

Neste capítulo, irá se discutir sobre a metalografia de cada amostra, inicialmente sem ataque para verificar a nodularização e, logo após, amostras atacadas de forma a verificar como está a microestrutura da matriz.

### 5.2.1 Análise de nodularização

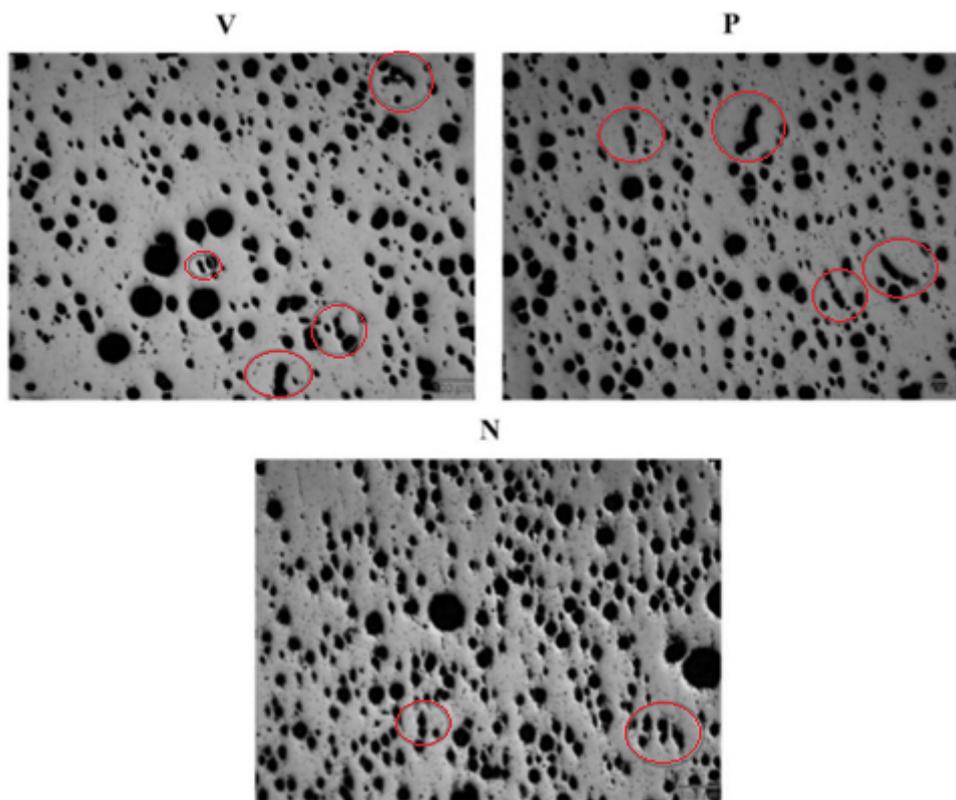
Utilizando a Figura 15 como referência e realizando a comparação com a Figura 16, percebe-se que a nodularização foi efetiva com modularidade de 90 % - 100 %.

Figura 15 - Grau de Nodularização segundo norma ASTM A247-19



Fonte: ADAPTADO, ASTM A247-19 (2019).

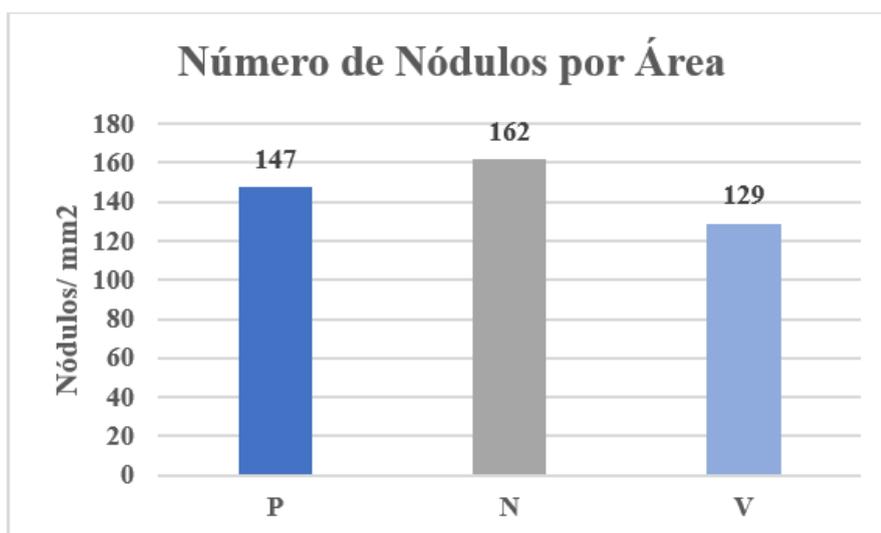
Figura 16 – Amostra V, P e N sem ataque e com grafitas não nodularizadas indicadas pelos círculos vermelhos (aumento de 100 vezes).



Fonte: O Autor

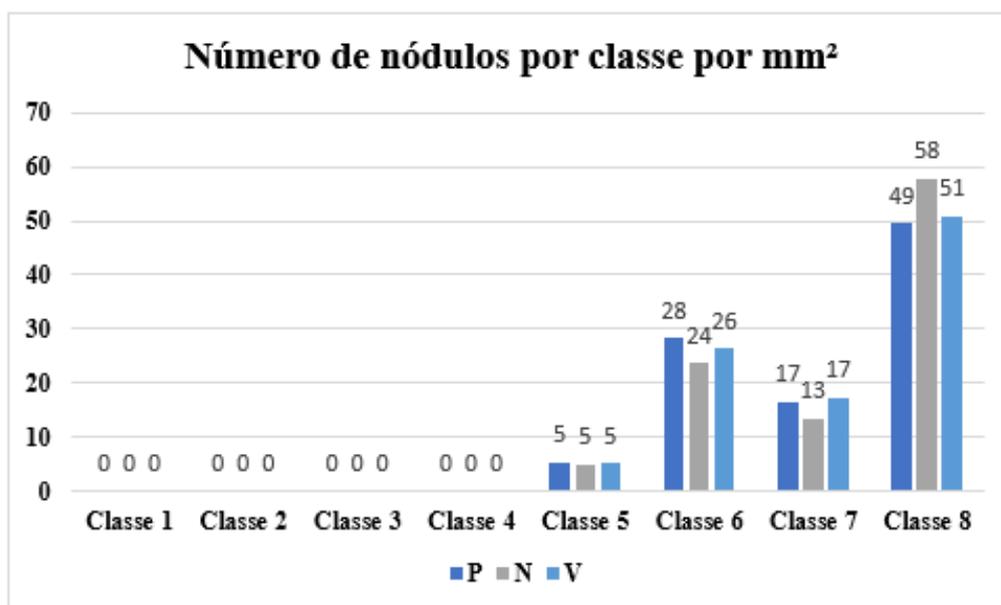
A concentração de nódulos por milímetros quadrados está evidenciado conforme Figura 17 de acordo com cada processo de fundição, sendo eles as amostras P, V e N. Semelhantemente, a Figura 18 apresenta como foi distribuído o tamanho dos nódulos. Vale ressaltar que a rotina semiautomatizada reconhece, mas não realiza a contagem de nódulos maiores que 40 microns.

Figura 17 – Número de nódulos por milímetro quadrado das amostras realizadas



Fonte: O Autor

Figura 18 – Distribuição do tamanho dos nódulos das amostras P, N e V.



Fonte: O Autor.

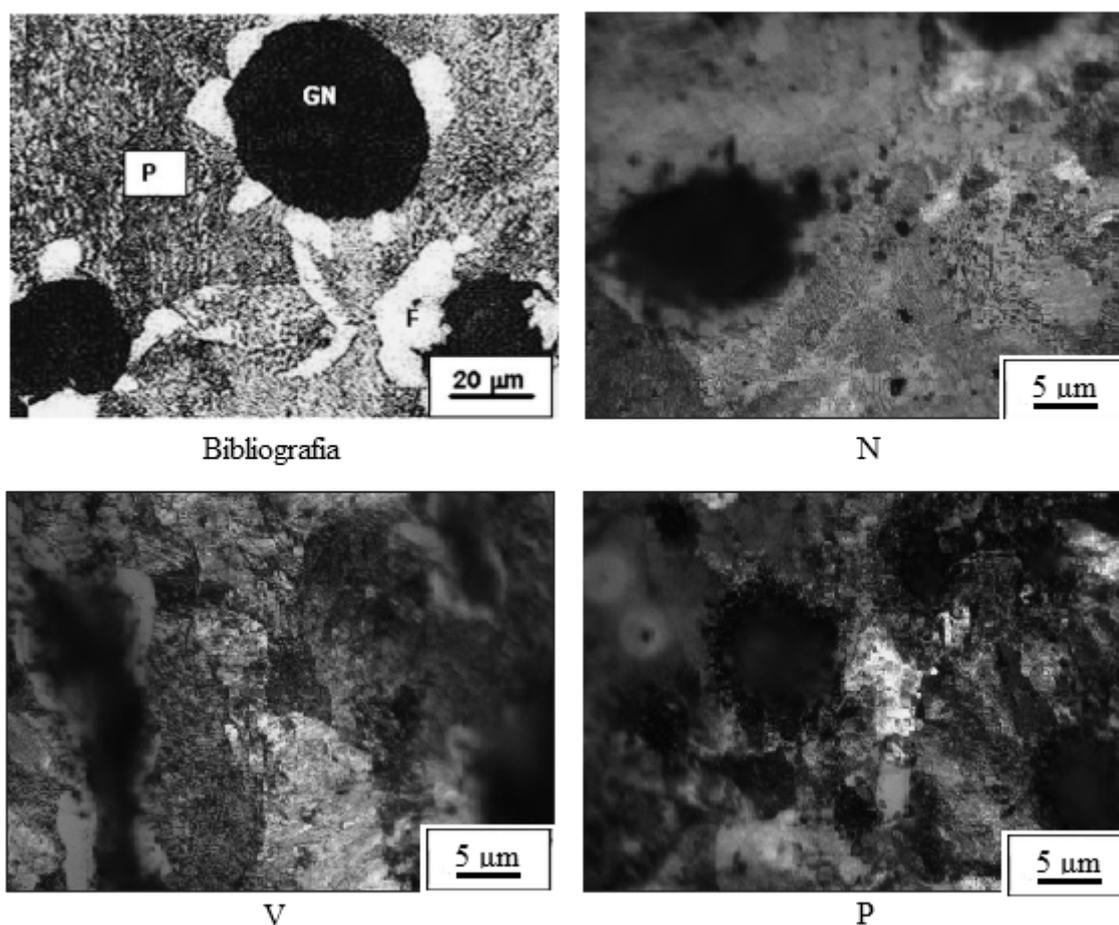
Esses dados indicam que as fusões realizadas adicionando nitrogênio pelo dispositivo ou panela não alteraram de maneira significativa a distribuição dos nódulos; contudo, apresentaram uma tendência a reduzir a contagem de nódulos. Sendo que essa

redução foi maior na adição do nitrogênio através do dispositivo do que pela adição na panela.

### 5.2.2 Análise de microestrutura da matriz com ataque

As microestruturas atacadas com Nital 2% das amostras N, V e P apresentaram em sua matriz, microestruturas de Perlita fina, grãos de ferrita e nódulos de grafita, conforme Figura 19

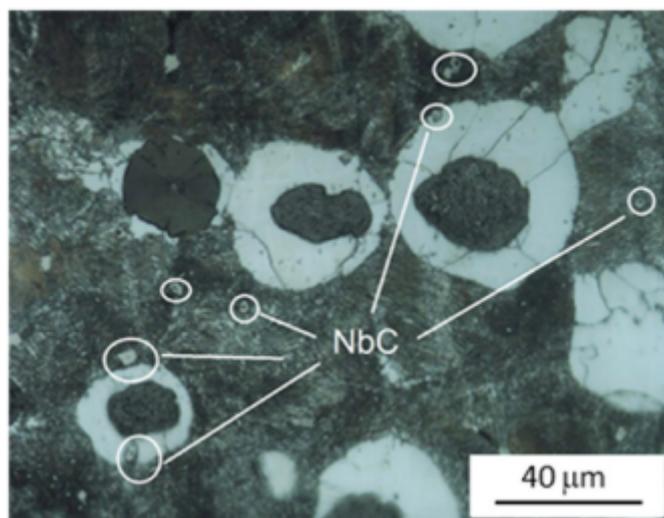
Figura 19 - Microestrutura de Ferro Fundido Nodular das amostras e da bibliografia (GN - Nódulo de grafita, P - Perlita, F - Ferrita)



Fonte: ADAPTADO de OGNJEN ERIC' et al (2006) e Autor.

Estima-se que possa ter surgido mais carbonetos, como diz PASINI (2021) na forma de  $MC$ ,  $M_2C$ , and  $M_7C_3$ , semelhantes a Figura 20, que se trata de carbonetos de Nióbio em Ferro Fundido Nodular, tendo em vista que houve absorção excessiva de Mn nas amostras P e V.

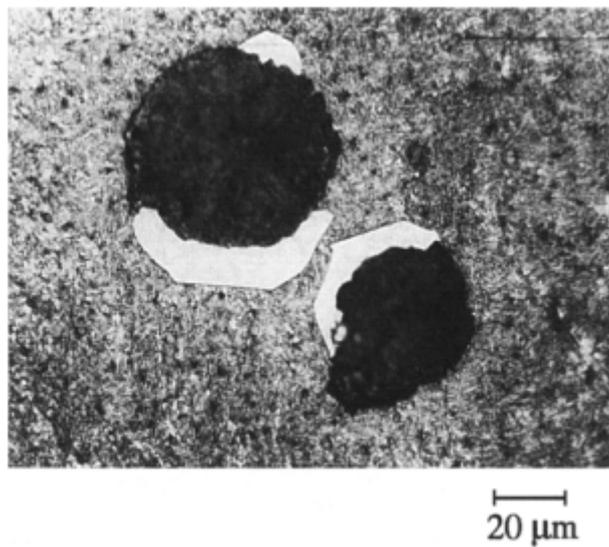
Figura 20 - Carbonetos metálicos de nióbio formados em Ferro Fundido Nodular indicado pelos círculos brancos.



Fonte: SCKUDLAREK, W. et al (2021)

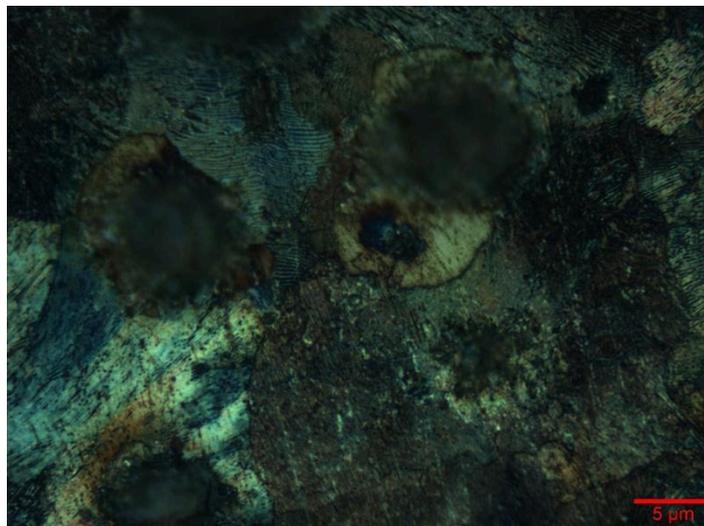
Percebe-se na Figura 22, relacionada a amostra N, em que não houve adição de nitrogênio a partir da liga Fe-Mn-N, que as regiões azuis, referem-se a perlita; enquanto, regiões marrons em aumento de 1000 vezes, referem-se a ferritas. Utilizou-se como evidência, a Figura 21, que indica o início da formação do “olho de boi”, tal como a Figura 19, que apresenta ferrita formada da mesma maneira.

Figura 21- Microestrutura de Ferro fundido nodular com microestrutura perlítica, apresentando estágio de formação de "olho de boi".



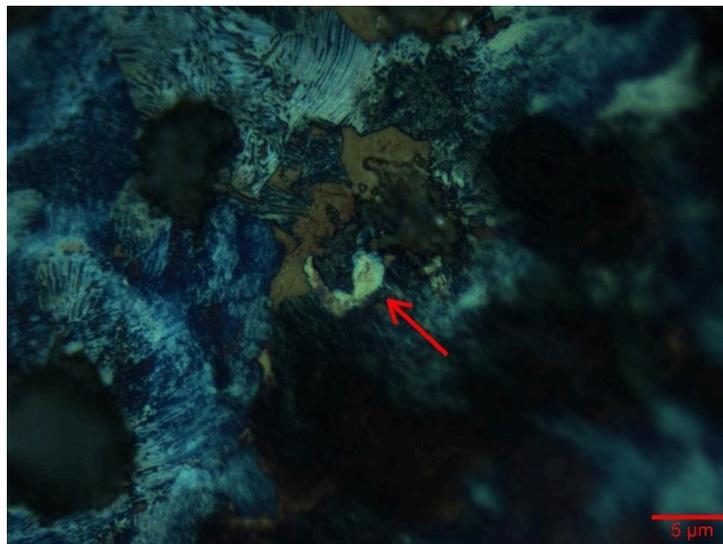
Fonte: WESSÉN, M.; SVENSSON, I. L (1996)

Figura 22– Microestrutura da amostra N com início de formação de “olho de boi” (aumento de 1000 vezes)



Fonte: O Autor.

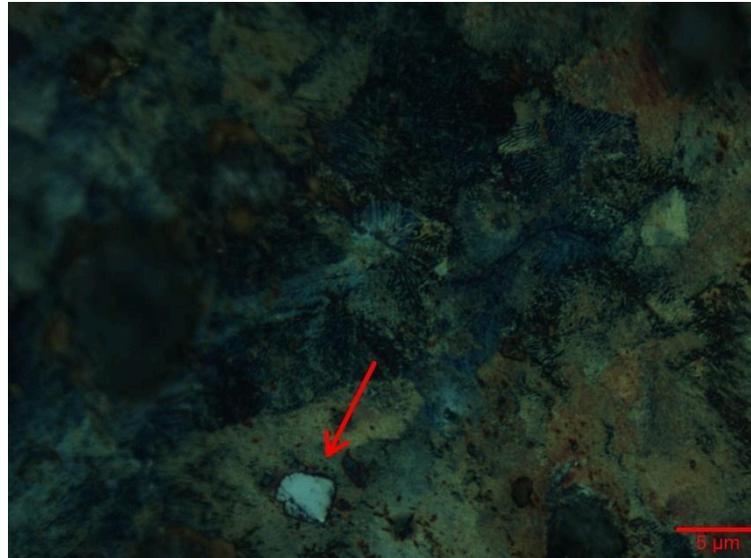
Figura 23 – Microestrutura da Amostra V com presença de perlita, nódulos de grafita, ferrita e carboneto indicado por seta. (aumento de 1000 vezes)



Fonte: O Autor

Como pode ser visto na Figura 23, foi encontrado carbonetos metálicos na microestrutura. De forma semelhante pode-se encontrar na amostra P, microestrutura semelhante, com perlita, ferrita, nódulos de carbono e carboneto, conforme Figura 24.

Figura 24 – microestrutura de amostra P com ataque colorido com carboneto indicado por seta vermelha (aumento de 1000 vezes)



Fonte: O Autor.

Contudo, apesar de ser encontrado carbonetos nas microestruturas das amostras V e P, foi necessário análise prolongada e minuciosa para que fossem achados. Isso aponta que o metal precipitado esteve próximo da faixa de saturação, não estando muito acima de seu limite de solubilidade. É importante que para uma melhor análise e identificação do carboneto seja realizado análise via MEV-EDS.

### 5.3 Dureza

Os resultados das durezas encontradas estão apresentados conforme a Tabela 7. É possível verificar que há um pequeno aumento nessa propriedade mecânica, esse aumento pode ser oriundo de duas possibilidades. A primeira é de que esse aumento tenha ocorrido, pelo nitrogênio em solução na amostra, tal qual era o propósito desse experimento; contudo, não se deve excluir que carbonetos possam estar interferindo nesse resultado, aumentando a dureza.

Tabela 7 – Resultado do ensaio de dureza

<b>Dureza (HB)</b>	
<i>Amostra N</i>	282
<i>Amostra V</i>	285
<i>Amostra P</i>	309

Fonte: O Autor

Acredita-se então que independente da causa, essa variação de adição do nitrogênio em ferro fundido, origina um material com maior dureza em relação a um não nitrogenado. Essa é uma vantagem de propriedade; no entanto, é necessário avaliar se o aumento da dureza, não acarretou a perda da tenacidade.

## 6 CONCLUSÕES

Foi possível realizar adição de nitrogênio com 7% de rendimento quando adicionado através do dispositivo e de 11% quando adicionado diretamente na panela; contudo, houve a formação de pequenos carbonetos em ambos os casos.

A dureza da amostra com adição de nitrogênio por adição de Fe-Mn-N através da panela apresentou 10% de aumento de dureza em relação a amostra sem nenhuma adição de nitrogênio. Entretanto, a dureza da amostra em que a adição de nitrogênio foi através do dispositivo, não apresentou aumento de dureza relevante.

As amostras com adição de nitrogênio em relação a neutra, não apresentaram grande variação na distribuição dos nódulos; contudo, o número de nódulos por área os diminuiu em 10% amostra P e 20% na amostra V.

Os processos de adição de nitrogênio utilizando Fe-Mn-N, não influenciaram negativamente na adsorção de outros elementos; contudo, as amostras apresentaram elevado manganês presente, superando o estipulado em ligas de ferro fundido nodular austemperado (ADI) quando adicionado na panela, se não corrigido o processo e composição, esta metodologia não é adequada para produção de Ferro Fundido Nodular ADI.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a variação das propriedades mecânicas, como resistência a tração, alongamento, tenacidade de amostras que passaram por adição de nitrogênio.

Avaliar possíveis impactos metalúrgicos, tal como a viabilidade de austêmpera de uma liga com nitrogênio eficientemente adicionado.

Avaliar rendimento da adição de nitrogênio dentro do molde em câmara de reação, de forma a verificar efetividade de processo alternativo de adição de nitrogênio utilizando Fe-Mn-N.

## 8 REFERÊNCIAS

A SHAYESTEZH-ZERAATI et al. The effect of aluminium content on morphology, size, volume fraction, and number of graphite nodules in ductile cast iron. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, v. 224, n. 3, p. 117–122, 1 jul. 2010.

ASTM INTERNATIONAL. A897 – A897M – 22: Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings. **ASTM Standards**. v.01.02: Ferrous casting, Ferroalloys. p. 1-11, 2022.

ASTM STANDARD. A247-19: Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings 1. **American Society for Testing and Materials**, v. 67, n. Reapproved, p. 3–4, 2019.

BAGATINI, Pablo – **Efeito da Adição de nitrogênio nas propriedades mecânicas e metalúrgicas do ferro fundido nodular austemperado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Departamento de Metalurgia DEMET, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, CEP Porto Alegre, RS, Brasil. 2023.

BARRETOS, Marcelo dos Santos – **Aciária elétrica: Nitrogênio em aços SAE 1045**. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação). Departamento de Metalurgia DEMET, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, CEP Porto Alegre, RS, Brasil. 1995.

BOSNJAK, B. et al. Influence of microalloying and heat treatment on the kinetics of bainitic reaction in austempered ductile iron. Journal of Materials Engineering and Performance, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 203–211, 2001.

BURSZTYN, Maria Augusta; BURSZTYN, Marcel. Fundamentos de Política e Gestão Ambiental: caminhos para a sustentabilidade. Rio de Janeiro: Garamond, 2012.

CALLISTER, William. Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução, 9ª Edição. Rio de Janeiro, RJ: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2016. 1014P

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**, 1977. Disponível em:

<[https://www.academia.edu/37125289/\\_Aços\\_Ferros\\_Fundidos\\_Vicente\\_Chiaverini](https://www.academia.edu/37125289/_Aços_Ferros_Fundidos_Vicente_Chiaverini)>

DELONG, W. T.; Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal. Supplement to the **Welding Journal**. Jul/1974.

ELLIOT, Roy. **Cast Iron Technology**. 1<sup>o</sup> Edition. Manchester, England. Butterworth & Co. Ltd., 1988.

FACÓ, Júlio Francisco Blumetti; DIAS, Erica da Cruz Novaes Gonçalves; CHRISPIANO, Giovanna Fidelis; LIMA, Rebeca Baraúna. Incentivos & Inovação – Uso e difusão de políticas públicas para primozão de inovação micro, pequenas e médias empresas, 1<sup>a</sup> Edição. Porto Alegre: Simplíssimo, 2020.

FARQUHAR, J. D. Nitrogen In Ductile Iron – A Literature Review. **Transactions of the American Foundry Society**, v. 87, p. 433–438, 1979.

GAVRILJUK, V. J., SHANINA, B. D., BERNS, H., On the Correlation Between Electron Structure and Short Range Atomic Order in Iron-Based Alloys, **Acta Materialia**. V. 48, n. 15, p. 3879-3893, Set/2000.

GREENHILL, J.M. e REYNOLDS, N.M. Nitrogen Defects in iron castings. **Foundry Trade Journal 1981**. P.111-122, Jul/1981.

HOROVITZ, Michel Bem et al. Nitrogen bearing martensitic stainless steels: microstructure and \_epto f\_e\_. 1995, Anais.. Kyoto: Isij, 1995. Acesso em: 29 de Dez. 2023.

HUSSEIN, Noor. MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. International Energy and Environment Foundation. 2017. Acessado Dez/23 em:

<[https://www.researchgate.net/publication/334465619\\_MATERIALS\\_SCIENCE\\_AND\\_ENGINEERING#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/334465619_MATERIALS_SCIENCE_AND_ENGINEERING#fullTextFileContent)>

ILOLA, H. HÄNNINEN, and T. KAUPPI. Hot and Cold Rolling of High Nitrogen Cr-Ni and Cr-Mn Austenitic Stainless Steels. **Journal of Materials Engineering and Performance**. v. 7, p.661–666 (1998).

KIM, D. W., J.-H. CHANG, W.-S. RYU. Evaluation of the creep–fatigue damage mechanism of Type 316L and Type 316LN stainless steel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. v.85, p.378-384. Jun/2008.

LALICH, M. J. e LOPRE JR., C. R. – Effects of pearlite – promoting elements on the kinetic of the eutectic transformation in ductile cast irons. **AFS Transactions**, V. 81, p. 217-28, 1973.

LIN, Y. et al. Effect of Nitrogen on the Microstructure and Mechanical Properties of Gray Cast Iron. **Jom**, v. 74, n. 3, p. 954–962, 2022.

LIU, Yongfeng et al. Characterization of wear \_e\_ of the functionally graded material deposited on cast iron by laser-aided \_e\_ manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.105. p.4097–4105. Dez/2019.

LO, K.H.; SHEK, C.H.; LAI, J.K.L. Recent developments in stainless steels. **Materials Science and Engineering: R**. v.65, p.39-104. Mai/2009.

MULLINS, MULLINS, J.D. Nodule \_e\_ – why and how! Ductile Iron News, n. 2, p. 1-2, (2003). Disponível em:  
<<https://old.foundrygate.com/upload/artigos/Nodule%20Count%20-%20Why%20and%20How%21.pdf>>. Acesso em: 03/01/2024.

OGNJEN ERIC et al. Microstructure and fracture of alloyed austempered ductile iron. **Materials Characterization**. v. 57, n. 4-5, p. 211–217, 1 dez. 2006.

OLIVEIRA , Leticia Mayelin Ostrowski. Comportamento mecânico dos ferros fundidos avançados. Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Blumenau, 89036-002 Blumenau, SC, Brasil. 2019.

ORLOWICZ et al. Cavitation Erosion of Nodular Cast Iron, Microstructural Effects. **Archives of Foundry Engineering**. Katowice, Poland. Vol. 17, n.4, p. 119-122, Apr/2017.

PASINI, W. M. et al. Analysis of Carbides in Multi-component Cast Iron Design Based on High Entropy Alloys Concepts. **Materials Research**, v. 24, n. 2, 2021.

SAENARJHAN, N.; KANG, J.-H.; KIM, S.-J. Effects of carbon and nitrogen on austenite stability and tensile deformation behavior of 15Cr-15Mn-4Ni based austenitic stainless steels. **Materials Science and Engineering: A**, v. 742, p. 608–616, 10 jan. 2019.

SANTOS, Adalberto Bierrenbach de Souza – **Efeitos da composição química na produção de ferros fundidos nodulares**. Congresso anual da associação brasileira de metalurgia e materiais, 55. Rio de Janeiro: ABM, Jul 2000.

SCKUDLAREK, W. et al. Effect of austempering temperature on microstructure and mechanical properties of ductile cast iron modified by niobium. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 2414–2425, maio 2021.

SIAFAKAS, Dimitrios. **Investigation of Hydrogen and Nitrogen Content in Compacted Graphite Iron Production**. Master Thesis. \_epto f Material Science and Engineering. Kungliga Tekniska Högskolan, Estocolmo, Suécia. 2012.

SILVA, Clênio. **Influência do número de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular austemperado**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia da UFMG. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOUZAL , Tânia Nogueira Fonseca et al. Mechanical and microstructural characterization of Nodular Cast Iron (NCI) with Niobium Additions. Department of Mechanical Engineering – DEMAT, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP Belo Horizonte, MG, Brasil. Dez, 2014.

STRANDE, K.; TIEDJE, N.; CHEN, M. A contribution to the understanding of the combined effect of nitrogen and boron in grey cast iron. **International Journal of Metalcasting**, v. 11, n. 1, p. 61–70, 2017.

SUGIYAMA, N. et al – Influência do manganês da produção de ferro fundido nodular. **Metalurgia ABM**, V. 28, n. 171, p. 149-57. Fev/1972.

TELES, J.M. Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com Nióbio utilizando ferramentas de metal duro. Dissertação (mestre) Universidade Federal de Itajubá.106p.il 2007

TONG, L. et al. Preparation of high-nitrogen ductile iron by injecting nitrogen gas in molten iron. **Materials**, v. 13, n. 11, 2020.

WESSÉN, M.; SVENSSON, I. L. Modeling of ferrite growth in nodular cast iron. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 27, n. 8, p. 2209–2220, ago. 1996.