



**INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**

Campus Ouro Branco

**Bacharelado em Engenharia Metalúrgica**



Trabalho de Conclusão de Curso

**"Estudo do rendimento de ferroligas nitrogenadas durante a etapa de refino secundário de um aço microligado, grau FB70".**

Autor: **Thayller de Assis Barbosa Pereira Alvarenga**

Orientador: Prof. Antonio Marlon Barros Silva

Janeiro/2023

INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Ouro Branco

Curso de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica

ESTUDO DO RENDIMENTO DE FERROLIGAS NITROGENADAS DURANTE A ETAPA DE  
REFINO SECUNDÁRIO DE UM AÇO MICROLIGADO, GRAU FB70.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica

Área de concentração: Refino Secundário  
Orientador: Prof. Antonio Marlon Barros  
Silva

Ouro Branco

IFMG

2023

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	11
2.	OBJETIVOS .....	12
2.1.	Objetivo Geral .....	12
2.2.	Objetivos Específicos .....	12
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
3.1	Siderurgia .....	13
3.2	Refino Secundário .....	15
3.2.1	Forno Panela .....	15
3.2.2	Ferroligas .....	18
3.2.3	Rendimento de Ferroligas .....	19
3.3	Aços Nitrogenados .....	20
3.3.1	Aplicação Grau FB70 .....	20
3.4	Solubilidade do Nitrogênio .....	21
3.4.1	Efeito dos elementos de liga na nitrogação do aço .....	23
3.4.2	Processos de Nitrogação .....	25
4	METODOLOGIA .....	27
4.1	Seleção das Ferroligas Estudadas .....	27
4.2	Testes de Rendimento .....	27
4.3	Parâmetros de Processo .....	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	29
5.1	Rendimento de Nitrogênio .....	29
5.2	Oxidação do Aço .....	31
5.3	Tempo de Processo .....	32
5.4	Custo de Produção .....	33
6	CONCLUSÃO .....	36
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação dos fluxogramas simplificados das rotas de produção do aço .....	13
Figura 3.2 Representação do fluxograma simplificado da rota de produção do aço de uma aciaria elétrica com rota Consteel. ....	14
Figura 3.3 - Representação esquemática de uma estação de refino secundário com Forno Panela.....	16
Figura 3.4 - Representação sintetizada das funções do Forno Panela .....	17
Figura 3.5 Economia de ferroligas com o controle de processo. ....	19
Figura 3.6 - Molécula gasosa não ligada, ocupando um sítio intersticial entre as ligações atômicas .....	21
Figura 3.7 - Solubilidade do Nitrogênio calculada segundo às equações 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 a uma condição de temperatura constante de 1600°C. ....	22
Figura 3.8 - Solubilidade do Nitrogênio calculada segundo às equações 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 a uma condição de pressão constante de 1atm.....	23
Figura 3.9 - Efeito dos elementos de liga sobre a solubilidade do Nitrogênio a 1atm de pressão em ferroligas binários líquidos à 1873K-1600°C. ....	24
Figura 5.2.1 Estação de Tratamento do Forno Panela Após Espumação. ....	32
Figura 5.3.1 Tempos de Tratamento dos Testes de Rendimento (Minitab®). ....	33
Figura 5.4.1 Custo de acerto químico do aço microligado grau FB70 com a utilização de cada ferroliga (Minitab®). ....	34
Figura 5.4.2 Consumo de energia elétrica com a utilização de cada ferroliga (Minitab®). ....	34

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Produção total de aço bruto no Brasil e no Mundo .....	14
Tabela 3.2 - Composição química de ferroligas .....	18
Tabela 3.3 - Composição química definida conforme norma interna.....	21
Tabela 3.4 - Valores mínimos exigidos conforme norma SAE. ....	21
Tabela 3.5 - Composições químicas das corridas elaboradas com rinsagem via Nitrogênio e adição de FeMnN granulado.....	25
Tabela 3.6 - Composições químicas de corridas elaboradas com rinsagem via Nitrogênio e adição de liga Nitrovan16.....	26
Tabela 4.1 - Composição média, fornecida pelos fabricantes, dos insumos que serão adicionados. ....	27
Tabela 4.2 - Composição química média no início do tratamento em Forno Panela para o aço grau FB70.....	28
Tabela 5.4 - Consumo de energia elétrica por minuto .....	31

## LISTA DE SIGLAS

FP – Forno Panela

FEA – Forno Elétrico a Arco

FeSiN – Ferro Silício Nitrogenado

FeMnN – Ferro Manganês Nitrogenado

MgO – Óxido de Magnésio

PPM – Partes Por Milhão

T – Temperatura (K)

K – Constante de Equilíbrio

$\Delta G^0$  – Energia Livre de Gibbs

P – Pressão Parcial dos Gases (atm)

%Ncalc. – Nitrogênio Calculado no Aço (%)

%Nf – Teor de Nitrogênio na Ferroliga (%)

%Nreal – Nitrogênio Real Presente na Amostra (%)

Ad – Adição de Ferroliga (kg)

Peso – Peso de Aço na Panela (kg)

## RESUMO

Em um cenário cada vez mais exigente de mercado e as fortes concorrências na indústria de produção do aço, faz-se necessário a obtenção de produtos com as melhores propriedades de aplicação para atendimento de normas nacionais e internacionais com o menor custo produtivo, aumentando a competitividade através da otimização operacional. Devido à baixa solubilidade do nitrogênio no aço líquido, este trabalho tem como objetivo avaliar o rendimento do mesmo, através da adição de ferroligas em estação de tratamento em Forno Panela, e seus impactos no custo e complexidade operacional durante a etapa de refino secundário para a produção do aço microligado grau FB70. Foram feitos testes com as ferroligas de Ferro Manganês Nitrogenado e Ferro Silício Nitrogenado de acordo com parâmetros estabelecidos para garantir a melhor condição possível para a incorporação do nitrogênio e garantir uma ótima avaliação sobre a influência do tipo de ferroliga utilizada no atendimento da composição química do aço. A ferroliga de Manganês apresentou resultados expressivos quando comparada à ferroliga de Silício, com um aumento em cerca de 32% de rendimento de nitrogênio, uma economia média de aproximadamente 52 minutos de processamento e uma economia total de R\$ 2.254.000,00.

Palavras-Chave: Nitrogenação; Ferroliga; Refino Secundário; Forno Panela; Rendimento.

## ABSTRACT

In an increasingly demanding market scenario and strong competition in the steel production industry, it is necessary to obtain products with the best application properties to meet national and international standards at the lowest production cost, increasing competitiveness through operational optimization. Due to the low solubility of nitrogen in liquid steel, this work aims to evaluate its yield, through the addition of alloys in a treatment station in Ladle Furnace, and its impacts on the cost and operational complexity during the secondary refining stage for the production of grade FB70 microalloyed steel. Tests were carried out with Nitrogenated Manganese and Nitrogenated Silicon alloys in accordance with established parameters to guarantee the best possible condition for the incorporation of nitrogen and guarantee an optimal assessment of the influence of the type of alloy used in meeting the chemical composition of the steel. . The Manganese alloy showed significant results when compared to the Silicon alloy, with an increase of approximately 32% in nitrogen yield, an average saving of approximately 52 minutes of processing and a total saving of R\$ 2,254,000.00.

Key words: Nitrogen; Alloys; Solubility; Ladle Furnace; Yield.

## 1. INTRODUÇÃO

O aço é a liga metálica mais produzida e de maior relevância no mundo, em função da grande diversidade de aplicações, disponibilidade de matérias primas e seu custo relativamente baixo de produção quando comparada a outras ligas metálicas. Portanto, dada a necessidade de atender diversas aplicações, um aço deve ter a composição química compatível com sua utilização, isto é, suas propriedades devem garantir seu correto desempenho para as funções desejadas (TSCHIPTSCHIN, 2015).

Tratando-se de composição química dos aços, ao se avaliar os efeitos de alguns desses elementos, encontra-se que, dependendo da aplicação final a que é destinado, estes se tornam elementos indesejáveis ou não. Para alguns tipos de aços o nitrogênio é um elemento que, em quantidades controladas, resulta em efeitos benéficos, como refinamento de grão, permitindo um incremento da resistência e da ductilidade nesses aços (RIZZO, 2006).

Um dos principais equipamentos utilizados na etapa de refino secundário dos aços é o Forno Panela. Ele tem como objetivos o ajuste térmico do aço líquido, flexibilidade operacional, otimização de custos de produção, aumento do grau de limpidez e ajuste fino de composição química, seja pela remoção de elementos indesejáveis à aplicação de determinados tipos de aços, ou pela adição de elementos de liga (RIZZO, 2006).

As ferroligas utilizadas durante o processo de refino secundário são produtos intermediários onde, além do elemento de liga, há também quantidades significativas de ferro, utilizadas para incremento dos elementos ligantes no aço. O rendimento dessas ferroligas tem um importante papel no controle de custos do processo de produção de aço, pois os custos relacionados à ferroligas são significativamente altos. Quando não há o controle adequado dos parâmetros que estão relacionados ao rendimento da ferroliga, a variabilidade do teor de um elemento é muito alta (SCAL, 2012).

Dado o alto custo das ferroligas utilizadas para o ajuste fino de composição química, e a baixa solubilidade do nitrogênio no aço líquido, o presente trabalho tem como objetivo adequar a prática de nitrogenação através da adição de ferroligas no Forno Panela para aumento do rendimento de nitrogênio e otimização dos custos de produção, visando ainda a redução da complexidade operacional.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Avaliar o rendimento de nitrogênio através da adição de ferroligas no Forno Panela, e seus impactos no custo e complexidade operacional de produção.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- i) Avaliar a influência do tipo de ferroliga na eficiência de nitrogenação do aço;
- ii) Analisar as principais variáveis que influenciam na solubilidade do Nitrogênio no aço líquido durante tratamento em Forno Panela;
- iii) Realizar teste com a adição das ligas de Ferro Silício Nitrogenado e Ferro Manganês Nitrogenado para avaliar o rendimento de nitrogênio.

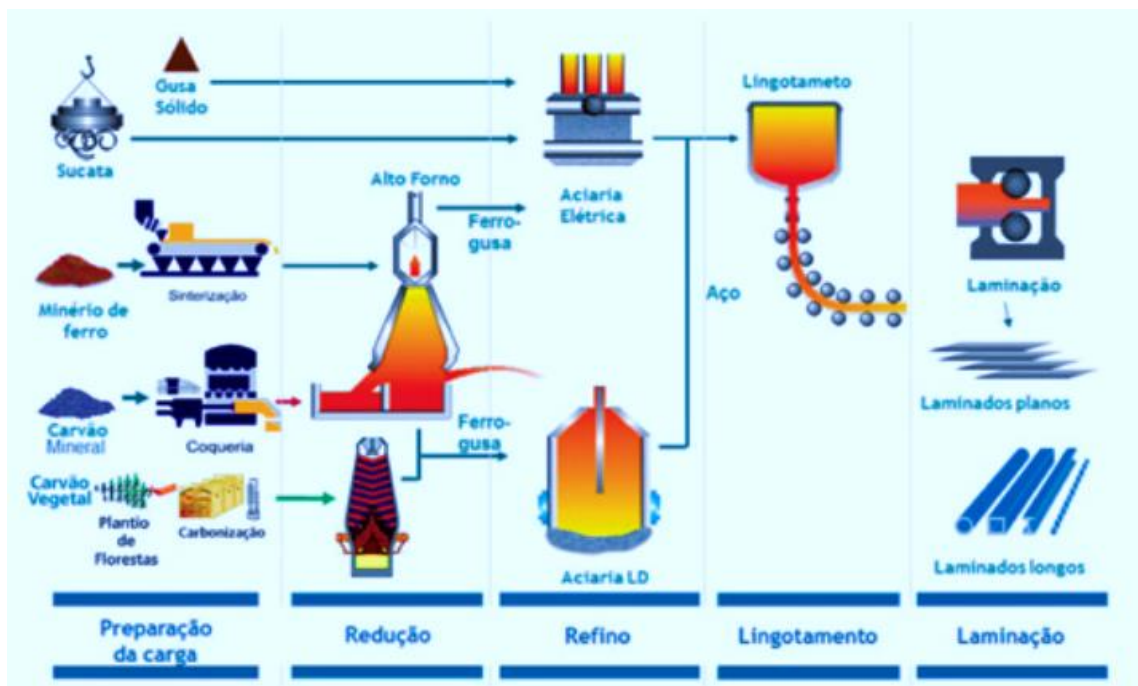
### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Siderurgia

A fronteira entre o ferro e o aço foi definida na Revolução Industrial, com a invenção de fornos que permitiam não só corrigir as impurezas do ferro, como adicionar-lhes propriedades como resistência ao desgaste, ao impacto, à corrosão, etc. Por causa dessas propriedades e do seu baixo custo o aço passou a representar cerca de 90% de todos os metais consumidos pela civilização industrial (CHIAVERINI, 2015).

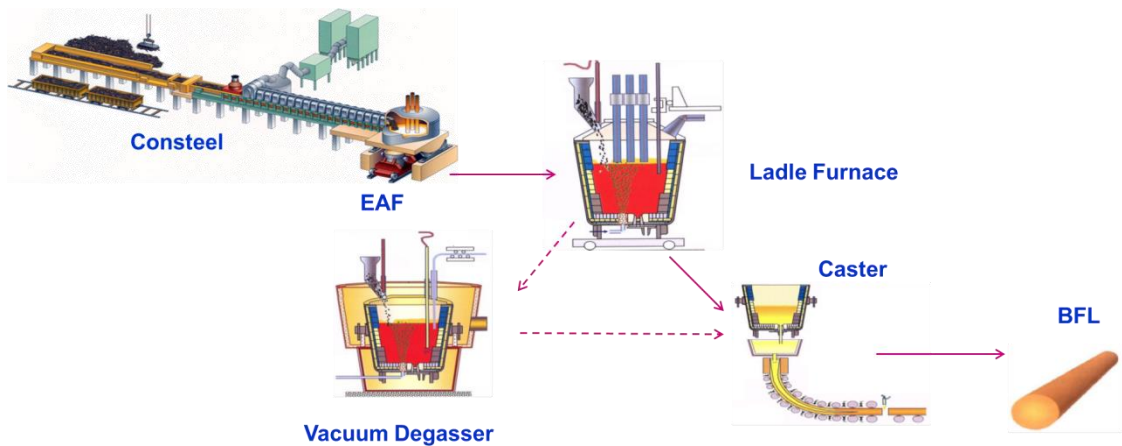
As usinas siderúrgicas, classificadas de acordo com o processo de produção podem ser denominadas como usinas integradas e semi-integradas. As usinas integradas são aquelas que operam a partir das três fases básicas, redução, refino e laminação, ou seja, participam de todo o processo de produção do aço. As usinas semi-integradas operam duas fases, refino e laminação ou redução e refino. Estas usinas partem de ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica adquirida de terceiros para transformá-los em aço em aciarias elétricas e sua posterior laminação. A Figura 3.1 e Figura 3.2 apresentam os fluxogramas simplificados das rotas de produção do aço de maneira geral e também de uma aciaria elétrica com rota consteel respectivamente (RIBEIRO, 2002).

Figura 3.1 - Representação dos fluxogramas simplificados das rotas de produção do aço



Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2016)

Figura 3.2 Representação do fluxograma simplificado da rota de produção do aço de uma aciaria elétrica com rota Consteel.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2023)

Sobre a produção do setor siderúrgico, o Brasil figura entre os dez maiores produtores de aço bruto no mundo desde a década de 80, possuindo uma grande parcela de contribuição para o resultado do Produto Interno Bruto – PIB. A indústria siderúrgica do aço é um dos mercados mais sólidos no Brasil, sendo responsável por uma grande contribuição econômica no país. Segundo o Instituto Aço Brasil, a produção anual de aço bruto brasileira no ano de 2021 chegou a 36,1 milhões de toneladas, representando cerca de 55,8% de toda a produção da América Latina, e 1,8% de toda a produção mundial, como demonstrado na Tabela 3.1 (ANUÁRIO, 2022).

Tabela 3.1 - Produção total de aço bruto no Brasil e no Mundo

<b>Siderurgia Brasileira e Mundial</b>	<b>Unid. 10<sup>6</sup> t</b>					
<b>Produção de aço bruto</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>
Mundial (A)	715,6	770,5	848,9	1433,4	1880,4	1951,9
América Latina - (B)	28,9	38,2	56,1	61,7	56,0	64,7
Brasil - (C)	15,3	20,6	27,9	32,9	31,4	36,1
C/A (%)	2,1	2,7	3,3	2,3	1,6	1,8
C/B (%)	52,9	53,9	49,7	53,3	56,1	55,8
Posição relativa do Brasil no mundo	10º	9º	8º	9º	9º	9º

Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2022)

## 3.2 Refino Secundário

O processo de refino secundário dos aços é a etapa imediata após o refino primário com o tratamento em forno de fusão. Nessa primeira etapa do processo de obtenção do aço líquido, chamada de refino primário, o mesmo é submetido a uma atmosfera altamente oxidante, portanto a quantidade de oxigênio no mesmo supera os teores admissíveis para a maioria dos produtos. Desta forma, foram desenvolvidas técnicas de desoxidação na fase secundária onde se obtém os valores desejados, na faixa de 10ppm a 30 ppm de oxigênio (BRADASCHIA, 1986).

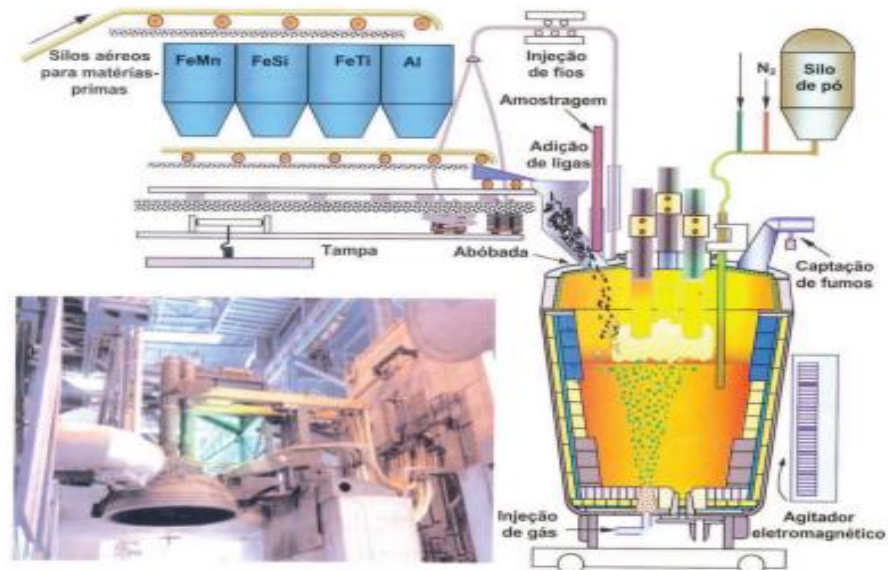
Segundo Rizzo (2006), os principais objetivos da etapa de refino secundário são:

- i. A redução do tempo de tratamento do aço, visando um aumento de produção, de produtividade e redução de custos operacionais da aciaria;
- ii. Uma maior flexibilidade operacional e otimização do fluxo de produção entre o forno de fusão até o lingotamento do aço;
- iii. O controle da temperatura do aço líquido, por meio do aquecimento elétrico e químico;
- iv. O ajuste fino de composição química do aço;
- v. Aumento do grau de limpidez do aço;
- vi. O controle da microestrutura e/ou macroestrutura das peças solidificadas.

### 3.2.1 Forno Panela

O Forno Panela é um dos principais equipamentos para o refino secundário do aço líquido, com várias utilidades a fim de garantir a homogeneização térmica e química do aço, o controle de temperatura, promover a desoxidação e a dessulfuração do aço e realizar o ajuste dos elementos de liga. A Figura 3.3 ilustra, de maneira sintetizada, uma estação de refino secundário com Forno Panela, demonstrando as etapas para o tratamento do aço líquido. (RIZZO, 2006)

Figura 3.3 - Representação esquemática de uma estação de refino secundário com Forno Panela



Fonte: RIZZO (2006).

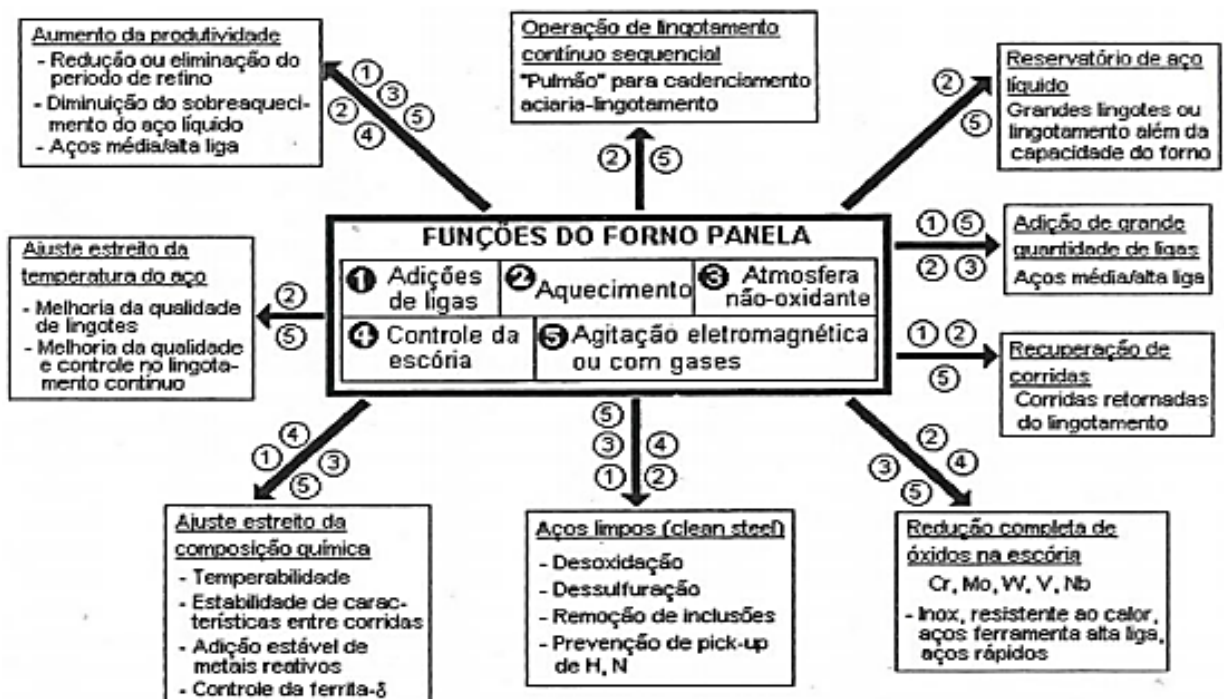
Também segundo Rizzo (2006), a sequência de operações normalmente realizadas no forno panela estão descritas a seguir:

- i. A panela contendo o aço líquido proveniente do forno de refino primário, é levada para o forno panela;
- ii. São feitas as adições de agentes formadores de escória como Cal, Escória Sintética e materiais à base de MgO para redução do desgaste refratário. A adequação do volume de escória na panela é de grande importância a fim de garantir a dessulfuração, para a não exposição do arco elétrico durante o aquecimento e prevenir a reoxidação do aço durante o tratamento;
- iii. Para garantir uma boa homogeneização térmica e química, dá-se início à fase que pode ser a injeção de gás inerte para o borbulhamento do aço, ou também a agitação eletromagnética;
- iv. É feita a desoxidação do aço e escória através de elementos com maior afinidade com o Oxigênio, sendo normalmente utilizados Alumínio e Silício como agentes desoxidantes;
- v. O forno então é ligado para o primeiro aquecimento, podendo variar entre 10 a 15 minutos, não podendo geralmente exceder esse limite devido ao risco de superaquecimento da linha de escória podendo provocar um

- desgaste excessivo do revestimento refratário da panela e da abóboda do forno;
- vi. Após o aquecimento, são feitas então medições de temperatura e amostragens de aço para a análise de composição química, e a partir dos resultados emitidos é feita então a adição de ferroligas para o ajuste fino de composição química dos aços;
  - vii. Para concluir o processo é feito o controle de temperatura a fim de garantir o lingotamento dos aços, e também feita a última amostragem de aço para garantir o atendimento às especificações necessárias.

A Figura 3.4 ilustra, de maneira sintetizada, as funções do forno panela e as consequências diretas que cada operação irá realizar na etapa de refino secundário utilizando essa rota conforme cada atividade descrita acima.

Figura 3.4 - Representação sintetizada das funções do Forno Panela



Fonte: RIBEIRO (2002).

Importante função do Forno Panela, a injeção de gases inertes ou borbulhamento é um método utilizado para promover a agitação ou movimentação do aço líquido, e tem como principais objetivos a homogeneização da composição química e térmica, flotação de

inclusões, a dissolução das adições realizadas e auxiliar no processo de dessulfuração, desfosforação e desoxidação do aço. Esse processo de borbulhamento pode ser efetuado através de plugues ou tijolos porosos nas panelas (no fundo ou na parede lateral) ou ainda através de lanças submersas no aço líquido. Os principais gases utilizados durante a etapa de refino são Argônio e Nitrogênio, que por serem inertes não reagem quimicamente com o aço líquido, promovendo então o deslocamento do mesmo e aumentando toda a cinética do processo (RIZZO, 2006).

### 3.2.2 Ferroligas

As ferroligas são denominadas como ligas metálicas ferrosas compostas de ferro, outros metais e elementos como silício e carbono, possuem por finalidade a incorporação de elementos de liga ao aço, como: silício, manganês, cromo, níquel, molibdênio, nióbio, vanádio, boro e nitrogênio. A Tabela 3.2 apresenta as principais ferroligas utilizadas para ajuste fino de composição química durante tratamento em Forno Panela (RIZZO, 2006).

Tabela 3.2 - Composição química de ferroligas

Material
Cromo metálico (> 99,5% Cr)
Ferro-Cromo alto C (5-9%C 0,3-1,6%Si 60-80%Cr)
Ferro-Cromo baixo C (0,01-0,1%C 0,4%Si 68-70%Cr)
Ferro-Silício-Cromo (38%Cr 40%Si)
Manganês metálico (99%Mn)
Ferro-Manganês alto C (6,5%C 75-80%Mn)
Ferro-Manganês baixo C (0,08%C 81-85% Mn)
Ferro-Manganês-Silício (0,06%C 64%Mn 30%Si)
Silício-Manganês (0,5-3%C 66,5%Mn 15-20% Si)
Manganês nitrogenado (1,35%C 78%Mn 6%Si 5%N)
Silício Nitrogenado (0,5-1%C 48-52%Si 20-25%N)
Vanádio Nitrogenado (16%N)
Ferro-Silício 50 (0,04%C 49%Si)
Ferro-Silício 65 (0,04%C 67%Si)
Ferro-Silício 75 (0,04%C 76%Si)
Ferro-Silício 90 (0,04%C 94%Si)
Silício metálico (95-99%Si)
Molibdênio metálico (99%Mo)
Óxido de molibdênio (75%Mo 25%O)
Níquel metálico (99%Ni)
Óxido de níquel (77,8%Ni 22,2%O)
Óxido de níquel (90%Ni 10%O)
Grafite (80-98% C)

Fonte: RIZZO (2006)

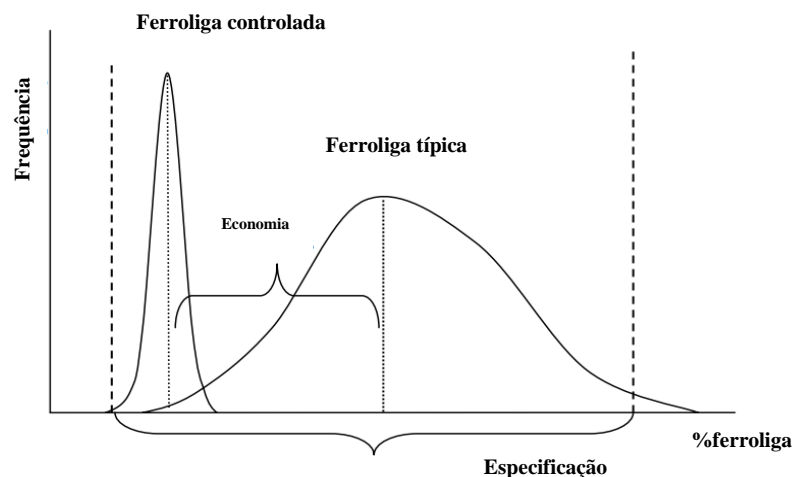
Para efetuar as pesagens desejadas previamente calculadas para cada ferroliga, é utilizado um sistema automático de adição. Esse sistema recebe eletronicamente o código e a quantidade a ser pesada, com isso, são acionadas as válvulas de abertura do silo da ferroliga correspondente que, por gravidade, permite a queda do material sobre uma esteira posicionada embaixo dos silos. Tal esteira encontra-se sobre células de carga, podendo ser chamadas de balanças, que registram em tempo real o peso que está sendo depositado. Quando o peso atinge o valor solicitado, o silo é fechado automaticamente, fazendo com que seja interrompida a queda de material. Após a pesagem, a esteira é movimentada até que a ferroliga pesada caia sobre um segundo silo receptor, próprio para receber todos os materiais pesados. Em seguida, o processo se repete da mesma forma para as seguintes ferroligas solicitadas até que todas tenham sido devidamente pesadas e transferidas (SOARES, 2010).

### 3.2.3 Rendimento de Ferroligas

O rendimento das ferroligas é o cálculo da eficiência de incorporação do material adicionado no aço e tem um importante papel no controle de custos do processo de produção, pois os custos relacionados à ferroligas são significativamente altos. Quando não há o controle adequado dos parâmetros que estão relacionados ao rendimento da ferroliga, a variabilidade do teor de um elemento é muito alta (PEASLEE, 2005).

A Figura 3.5 ilustra a diferença de rendimento de ferroligas entre processos onde os parâmetros para a adição de ligas é controlado, e processos convencionais onde não há o devido controle das adições.

Figura 3.5 Economia de ferroligas com o controle de processo.



Fonte: PEASLEE (2005)

O rendimento das ferroligas é calculado de acordo com as equações 3.1 e 3.2 descritas abaixo:

$$\%N_{calc.} = (Ad \times \%N_f \times 100) \div \text{Peso} \quad (3.1)$$

$$\text{Rendimento} = (\%N_{calc} \div \%N_{real}) \times 100 \quad (3.2)$$

### 3.3 Aços Nitrogenados

O aço é uma liga metálica constituída basicamente de ferro e carbono, com teores de carbono variando entre 0,008% e 2,11% em peso. Alguns elementos de liga podem ser utilizados para modificar as características físico-químicas do aço, de acordo com aplicação final (CHIAVERINI, 1986).

O Nitrogênio pode apresentar tanto efeitos prejudiciais quanto benéficos aos aços em função do teor deste elemento, das etapas de processamento posteriores e de sua aplicação final. Como exemplo, onde é necessária a presença de um determinado teor de nitrogênio, para a produção de aços microligados, o nitrogênio tem um papel fundamental na combinação com os elementos de liga microligantes, principalmente o titânio, com o objetivo de promover um refinamento de grão, permitindo um incremento da resistência, da ductilidade e, simultaneamente, gerando um aumento da tenacidade nestes aços (RIZZO, 2006).

#### 3.3.1 Aplicação Grau FB70

Uma das principais aplicações para os aços microligados de grau FB70 se dá para a produção de tubos trefilados, perfilados e forjados, com utilização em circuitos hidráulicos, cilindros hidráulicos, peças automotivas em geral, rolamentos, máquinas agrícolas, infraestrutura, eixos e semieixos (BURBANO SANDOVAL, 2014)

A norma SAE 1045 rege a produção desse material em relação às propriedades mecânicas, resistência à tração, limite de escoamento e todos os parâmetros relacionados à produção desse material. Nas Tabelas 3.3 e 3.4 são mostradas a composição química e as propriedades requeridas para esse material (VALLOUREC, 2015).

Tabela 3.3 - Composição química definida conforme norma interna.

Composição química (%) em massa									
Grau	Limites	C	Mn	P	S	N	Si	Mo	V
FB70	mín	0,000	1,400	0,000	0,000	0,010	0,200	0,020	0,000
	máx	0,220	1,800	0,050	0,050	0,020	0,500	-	0,018

Fonte: VALLOUREC (2015).

Tabela 3.4 - Valores mínimos exigidos conforme norma SAE.

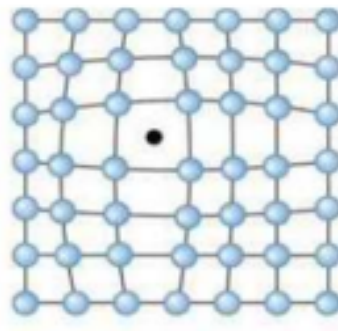
Aços Especiais	
Propriedades	FB70
Limite de escoamento - $f_y$ (Mpa)	$\geq 460$
Limite de resistência - $f_u$ (Mpa)	$\geq 608$
Alongamento - $\Delta L$ (50mm) %	$\geq 20$

Fonte: VALLOUREC (2015).

### 3.4 Solubilidade do Nitrogênio

O Nitrogênio é um elemento gasoso encontrado na atmosfera à temperatura ambiente. No aço, esse componente se encontra na forma elementar, e ocupa sítios intersticiais entre as ligações dos átomos de ferro ou ainda na forma de nitretos e carbonitretos. A Figura 3.6 esquematiza uma molécula de nitrogênio ocupando um espaço vazio (sítio intersticial), entre as ligações atômicas do ferro (BARRETOS, 1995).

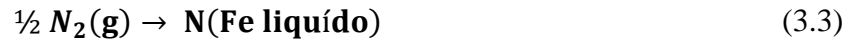
Figura 3.6 - Molécula gasosa não ligada, ocupando um sítio intersticial entre as ligações atômicas



Fonte: SILVA (2005)

A absorção de uma espécie gasosa em um banho metálico está ligada à pressão parcial do gás no metal líquido para uma dada temperatura e uma dada composição química

do aço. A uma temperatura determinada, para um dado tipo de aço a solubilidade de um gás diatômico é função da raiz quadrada da pressão (Lei de Sieverts). Segundo Barretos (1995) a relação termodinâmica de equilíbrio na interface gás-metal é:



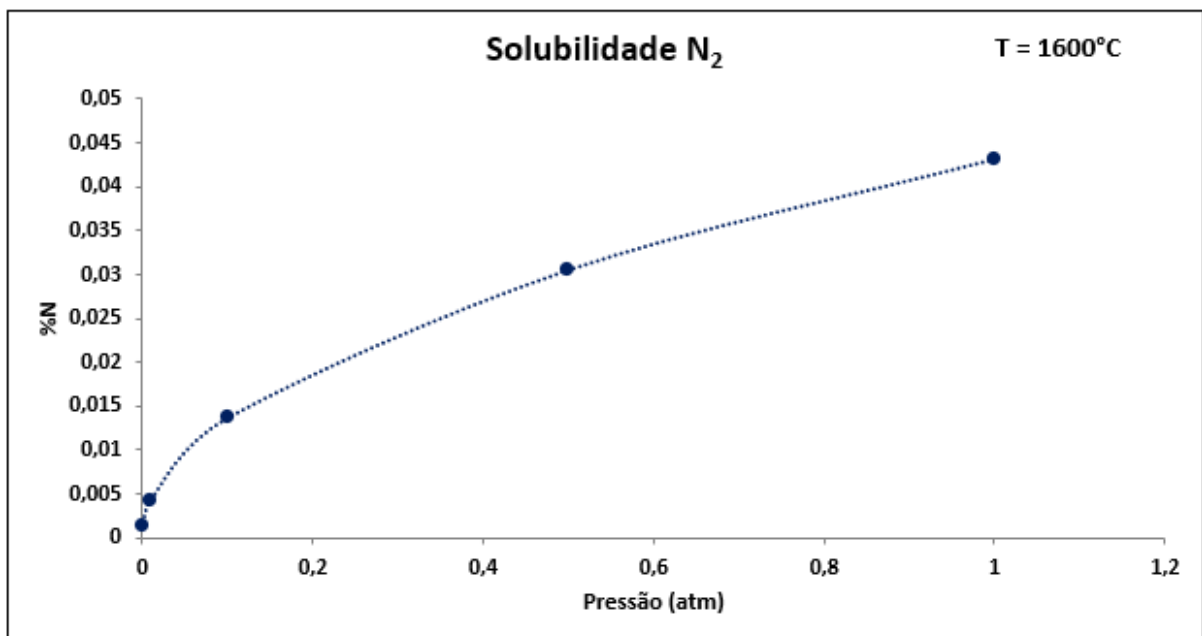
$$\log k = -187,9/T - 1,247 \quad (3.4)$$

$$\Delta G^0 = -4,576 * T * \log k \quad (3.5)$$

$$\%N = k * P_{N_2}^{1/2} \quad (3.6)$$

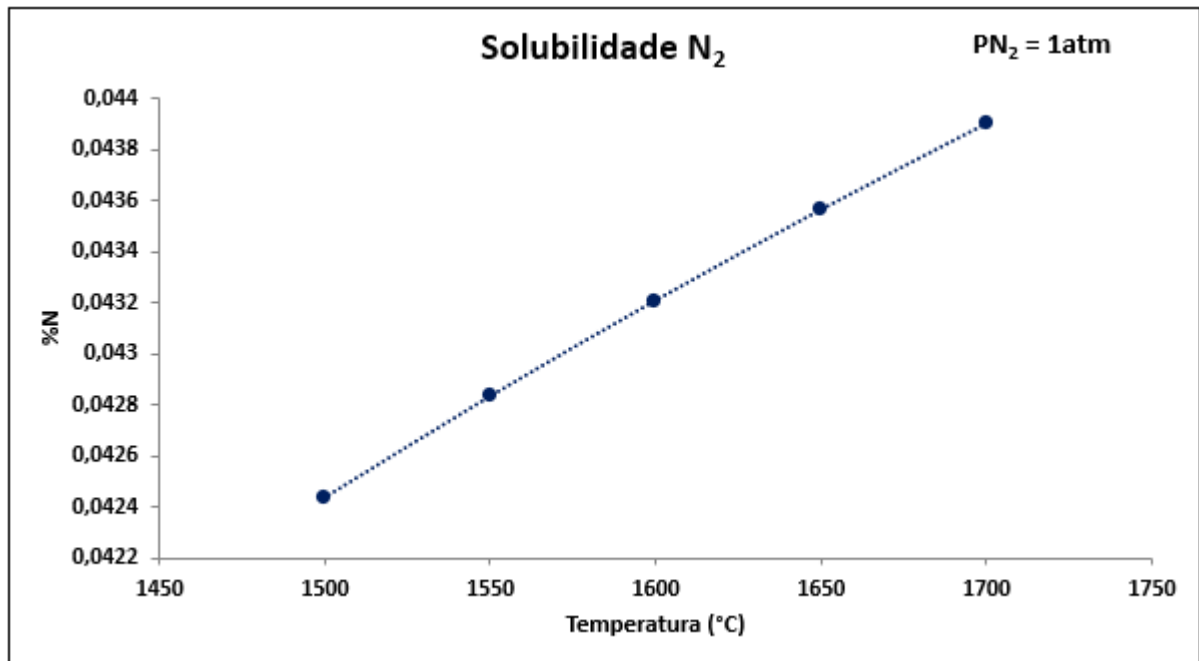
Com isso, dada a equação termodinâmica acima sobre a solubilidade do nitrogênio no aço líquido, as Figuras 3.7 e 3.8 trazem graficamente a evolução do percentual de nitrogênio de equilíbrio com uma variação de temperatura e pressão parcial desse gás, evidenciando o aumento da solubilidade de nitrogênio quanto mais alta a temperatura do aço líquido e a pressão parcial dos gases.

Figura 3.7 - Solubilidade do Nitrogênio calculada segundo às equações 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 a uma condição de temperatura constante de 1600°C.



Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 3.8 - Solubilidade do Nitrogênio calculada segundo às equações 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 a uma condição de pressão constante de 1atm.

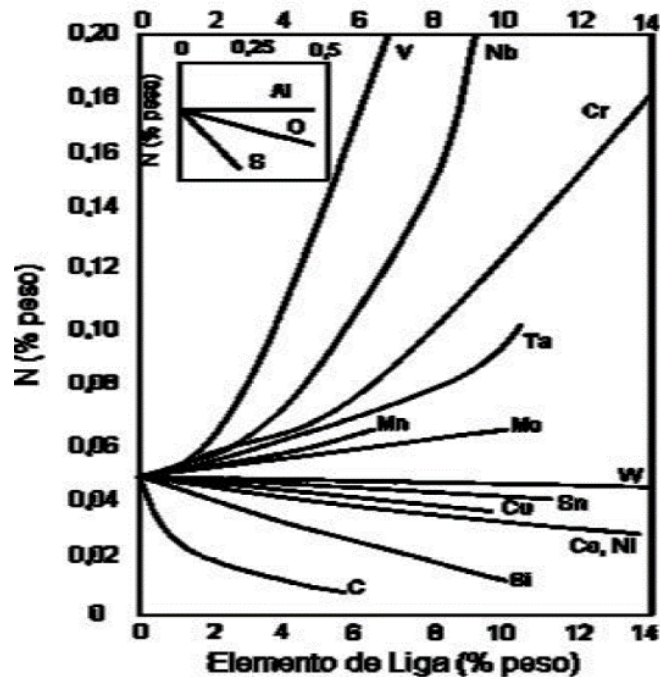


Fonte: Próprio autor (2023)

### 3.4.1 Efeito dos elementos de liga na nitrogação do aço

Os elementos de liga presentes no aço tem grande influência na capacidade de solubilidade do nitrogênio no aço líquido, portanto a presença ou não de alguns elementos irá favorecer ou não a capacidade de reter o nitrogênio adicionado através da adição de ferroligas nitrogenadas ou por meio da injeção desse gás no sistema de borbulhamento do Forno Panela. A Figura 3.9 evidencia o efeito desses elementos na solubilidade do nitrogênio no aço (BARRETOS, 1995).

Figura 3.9 - Efeito dos elementos de liga sobre a solubilidade do Nitrogênio a 1 atm de pressão em ferroligas binários líquidos à 1873K-1600°C.



Fonte: BARRETOS (1995)

Como evidenciado na Figura 3.9, vê-se a influência da concentração de alguns elementos na solubilidade do nitrogênio no ferro líquido. A alta concentração de elementos como o vanádio, nióbio e cromo atuam para o aumento da solubilidade, enquanto outros elementos residuais como oxigênio e enxofre, e também elementos de liga como carbono e silício favorecem uma redução da mesma (BARRETOS, 1995).

O forte efeito de alguns elementos substitucionais sobre a solubilidade do nitrogênio pode, também ser entendida através da análise da configuração sólida, a distribuição dos átomos no reticulado cristalino e a distribuição dos elétrons nesse reticulado promovem uma redistribuição da densidade eletrônica do ferro devido à presença de carbono ou nitrogênio em solução. Os átomos de nitrogênio têm dificuldade em ocupar sítios intersticiais vizinhos, a estrutura fica ordenada e, em consequência, há mais elétrons livres e é maior o caráter metálico da ligação (TSCHIPTSCHIN, 2015).

### 3.4.2 Processos de Nitrogenação

Um estudo realizado sobre a nitrogenação do aço 1637D com a adição de ferroligas de Ferro Manganês Nitrogenado (FeMnN) e Nitrovan16 (16% de Nitrogênio), trouxe resultados expressivos quanto à utilização de ambas as ferroligas, sendo realizada a adição das mesmas durante o tratamento de refino secundário na estação do forno panela (OLIVEIRA, 2020).

Foram testadas três ferroligas nitrogenadas no forno panela: fio de FeMnN, granel de FeMnN e Nitrovan 16, como fontes de incorporação de nitrogênio. Portanto, para cada uma das ferroligas de teste, foi utilizada a combinação com rinsagem via nitrogênio no lugar de argônio (OLIVEIRA, 2020).

Nos dois primeiros testes com a utilização do FeMnN em fios e granel, dentre as corridas produzidas com a adição de FeMnN granulado, a média de incorporação de nitrogênio foi de 155ppm, que em comparação com a adição de fios, as ferroligas apresentaram um valor menor, porém acima do valor esperado pela previsão do aço 1637D. No caso do Nitrovan, a média de incorporação do elemento foi de 151ppm para as corridas testadas, apresentando valores muito próximos em média em comparação à liga de FeMnN (OLIVEIRA, 2020).

As tabelas 3.5 e 3.6 evidenciam os resultados obtidos em cada teste realizado no trabalho:

Tabela 3.5 - Composições químicas das corridas elaboradas com rinsagem via Nitrogênio e adição de FeMnN granulado.

Lote	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	V	N	Ceq
41327402	0,4000	1,1000	0,2000	0,0190	0,0220	0,0800	0,1400	0,0400	0,0200	0,0100	0,0500	0,0167	0,6200
41327403	0,6300	1,0800	0,2100	0,0150	0,0160	0,0130	0,0800	0,0400	0,0100	0,0100	0,0500	0,0161	0,5700
41327404	0,3900	1,0700	0,1900	0,0150	0,0220	0,1100	0,0900	0,0300	0,0100	0,0100	0,0500	0,0158	0,6000
41327405	0,3900	1,0700	0,2100	0,0140	0,0170	0,1000	0,0800	0,0300	0,0100	0,0200	0,0500	0,0158	0,6000
41327406	0,3500	1,0800	0,1800	0,0150	0,0170	0,1000	0,1000	0,0700	0,0100	0,0200	0,0500	0,0157	0,5700
41327407	0,3700	1,0800	0,2100	0,0200	0,0190	0,1200	0,1000	0,0500	0,0100	0,0200	0,0500	0,0146	0,5900
41327408	0,3500	1,0800	0,2000	0,0100	0,0170	0,1100	0,0900	0,0500	0,0100	0,0100	0,0500	0,0153	0,5700
41327409	0,3600	1,0900	0,1900	0,0180	0,0120	0,1100	0,0800	0,0500	0,0100	0,0100	0,0500	0,0141	0,5800
41327410	0,3700	1,0900	0,2400	0,0160	0,0150	0,1400	0,0800	0,0700	0,0100	0,0200	0,0500	0,0151	0,5900

Fonte: OLIVEIRA (2020).

Tabela 3.6 - Composições químicas de corridas elaboradas com rinsagem via Nitrogênio e adição de liga Nitrovan16

Lote	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	V	N	Ceq
41327503	0,3700	1,0600	0,0200	0,0140	0,0200	0,1100	0,1000	0,0500	0,0100	0,0200	0,0500	0,0162	0,5800
41327504	0,3700	1,0800	0,2000	0,0180	0,0200	0,1000	0,0900	0,0400	0,0100	0,0100	0,0500	0,0138	0,5900
41327505	0,3800	1,0900	0,2300	0,0140	0,0190	0,0900	0,0800	0,0400	0,0100	0,0200	0,0500	0,0149	0,5900
41327506	0,3500	1,0900	0,2000	0,0180	0,0190	0,1200	0,0800	0,0500	0,0100	0,0200	0,0500	0,0155	0,5700
41327507	0,3600	1,0800	0,2000	0,0180	0,0210	0,1300	0,0700	0,0500	0,0100	0,0200	0,0500	0,0151	0,5800
41327508	0,3800	1,1100	0,2100	0,0120	0,0200	0,1100	0,0800	0,0400	0,0100	0,0200	0,0500	0,0156	0,6000
41327509	0,3800	1,0700	0,2000	0,0130	0,0200	0,1000	0,0900	0,0400	0,0100	0,0200	0,0500	0,0148	0,6000

Fonte: OLIVEIRA (2020)

Os resultados demonstrados acima nas tabelas 3.5 e 3.6, evidenciam a capacidade da utilização do FeMnN no aço microligado grau FB70, dada a composição química de Manganês ser inferior à faixa mínima especificada para essa grade, o que não prejudica o acerto químico desse aço, tendo em vista que a incorporação de Nitrogênio será atendida para ambos os casos. Já a utilização de Nitrovan16 não será possível para o grau FB70, devido a faixa máxima especificada de Vanádio ser inferior à especificação do aço 1637D (OLIVEIRA, 2020).

## 4 METODOLOGIA

Para a realização desse trabalho, foram avaliadas as possíveis ferroligas a serem utilizadas no processo de nitrogenação na estação de refino secundário em forno panela após processamento e refino primário em forno elétrico a arco (FEA), para o atendimento da composição química especificada do aço microligado grau FB70. As ligas selecionadas foram adicionadas e testadas durante a etapa de refino de acordo com os parâmetros de processo e condições ideais para avaliação. Foi também feita a avaliação estatística dos dados de rendimento de nitrogênio, tempos de tratamento e custo com a utilização do *software minitab*.

### 4.1 Seleção das Ferroligas Estudadas

Os critérios estabelecidos para se definir quais ferroligas seriam objetos de estudo do presente trabalho foram a influência do elemento de liga na solubilidade do nitrogênio no aço líquido, e a capacidade em atender a composição química especificada do aço grau FB70 tanto do elemento predominante na ferroliga, quanto do nitrogênio de acordo com a Tabela 3.3. Com isso, para se garantir a composição química adequada do aço em estudo, as ferroligas utilizadas foram as de FeSiN (Ferro Silício Nitrogenado) e FeMnN (Ferro Manganês Nitrogenado). A Tabela 4.1 mostra as composições químicas médias de cada um desses materiais:

Tabela 4.1 - Composição média, fornecida pelos fabricantes, dos insumos que serão adicionados.

Ferroliga	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Fe (%)	Si (%)	Mn (%)	N (%)	C (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Ca (%)
Ferro Silício Nitrogenado	3500	50	14	-	30	0,5	0,1	0,05	1,5	1
Ferro Manganês Nitrogenado	6500	20	2	72	5	2	0,3	0,03	-	-

Fonte: Próprio autor (2023).

### 4.2 Testes de Rendimento

Nesta etapa do trabalho, durante a fase de refino secundário na estação do Forno Panela, foram testadas as adições das ferroligas nitrogenadas (FeSiN e FeMnN) juntamente ao borbulhamento com nitrogênio através de plugues porosos localizados no fundo da panela, como fontes de incorporação de nitrogênio. Para os testes as ferroligas foram testadas

separadamente em 10 diferentes corridas cada, sendo utilizada a quantidade máxima específica para o atendimento da composição química de Silício, Manganês e Nitrogênio de acordo com a Tabela 3.3, considerando um peso médio de panela de 140 toneladas e a composição química do aço no início do processamento na estação do Forno Panela. A Tabela 4.2 mostra a composição química média de chegada no Forno Panela para o aço grau FB70.

Tabela 4.2 - Composição química média no início do tratamento em Forno Panela para o aço grau FB70.

<b>Composição química inicial (%) em massa</b>						
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>N</b>	<b>Si</b>	<b>Mo</b>
0,100	0,150	0,010	0,050	0,003	0,150	0,040

Fonte: Próprio autor (2023).

### 4.3 Parâmetros de Processo

A fim de garantir a melhor condição possível para um aumento da solubilidade de nitrogênio no aço líquido de acordo com os parâmetros que influenciam em tal solubilidade, e padronizar a operação para normalização dos testes, foram seguidos alguns parâmetros de processo em cada produção de teste, descritos abaixo:

<b>Oxidação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Foi feita a desoxidação de aço e escória com Alumínio, e medição do ppm de oxigênio do aço até que a oxidação do mesmo esteja menor que 50ppm.</li> </ul>
<b>Temperatura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O Forno Panela garantiu uma temperatura mínima para a adição das ferroligas de 1600°C.</li> </ul>
<b>Quantidade adicionada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A quantidade adicionada foi de 250kg FeSiN e no teste de FeMnN 1500kg de ferroliga.</li> </ul>
<b>Pressão de injeção</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A injeção de nitrogênio via plugue foi realizada com uma vazão de 600NI/min e uma pressão mínima da linha de 10bar.</li> </ul>

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Rendimento de Nitrogênio

As 20 corridas deste estudo foram tratadas na estação do Forno Panela conforme as condições previstas nos materiais e métodos com a utilização das ferroligas de FeSiN e FeMnN. Após o tratamento de cada corrida, o equivalente a uma produção, foram realizados os cálculos do rendimento de nitrogênio de acordo com a equação apresentada no capítulo 3.2.3 para cada uma delas com a utilização das ferroligas específicas. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os resultados obtidos de rendimento para cada corrida tratada:

Figura 5.1 Resultados em percentual dos rendimentos obtidos em cada produção (Minitab®).

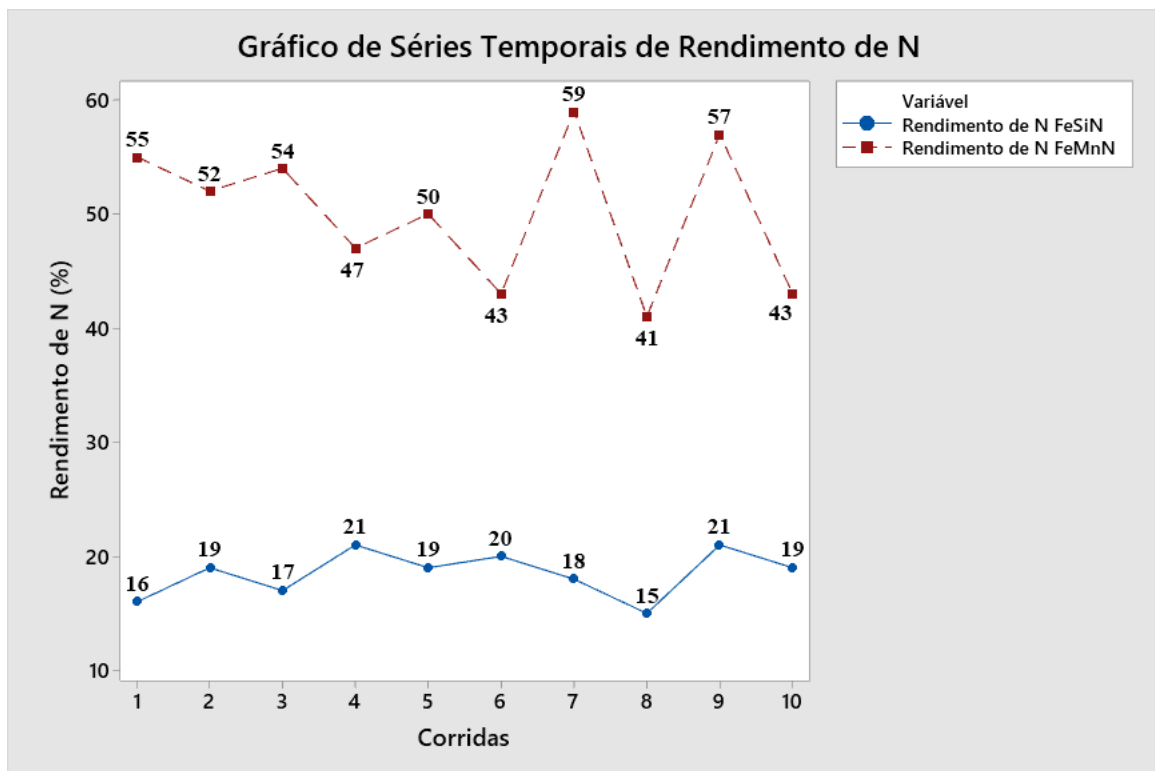
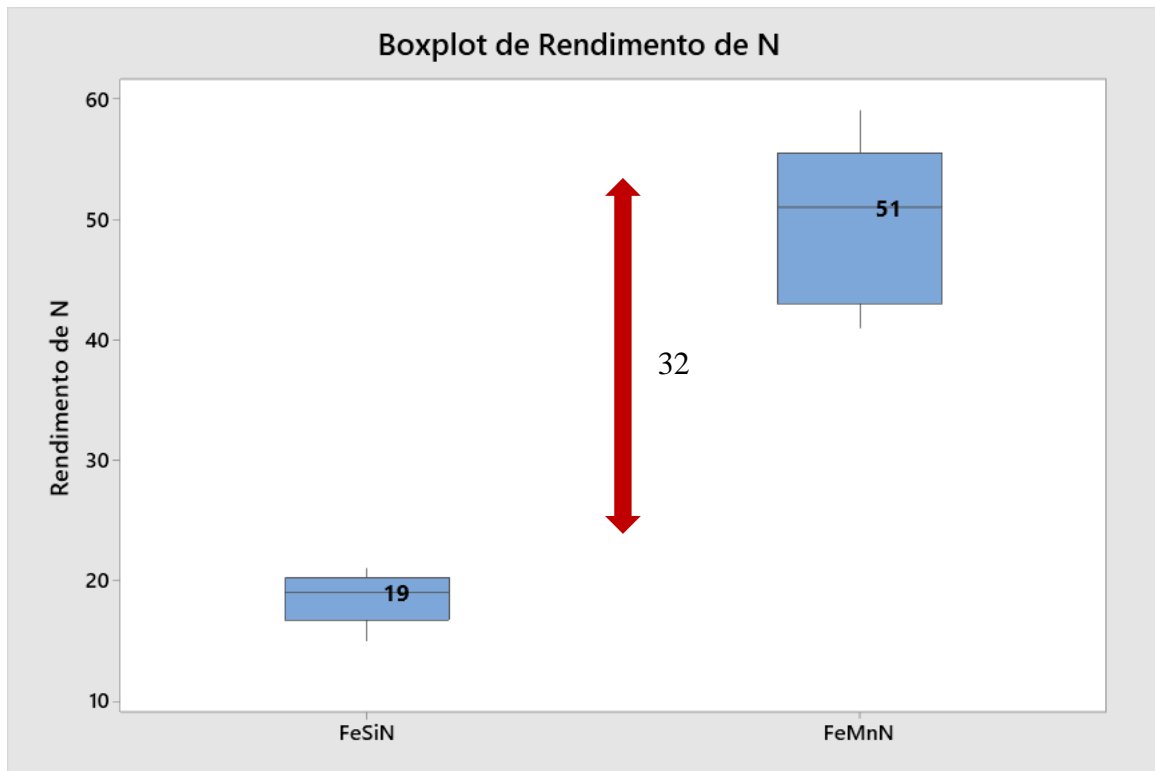
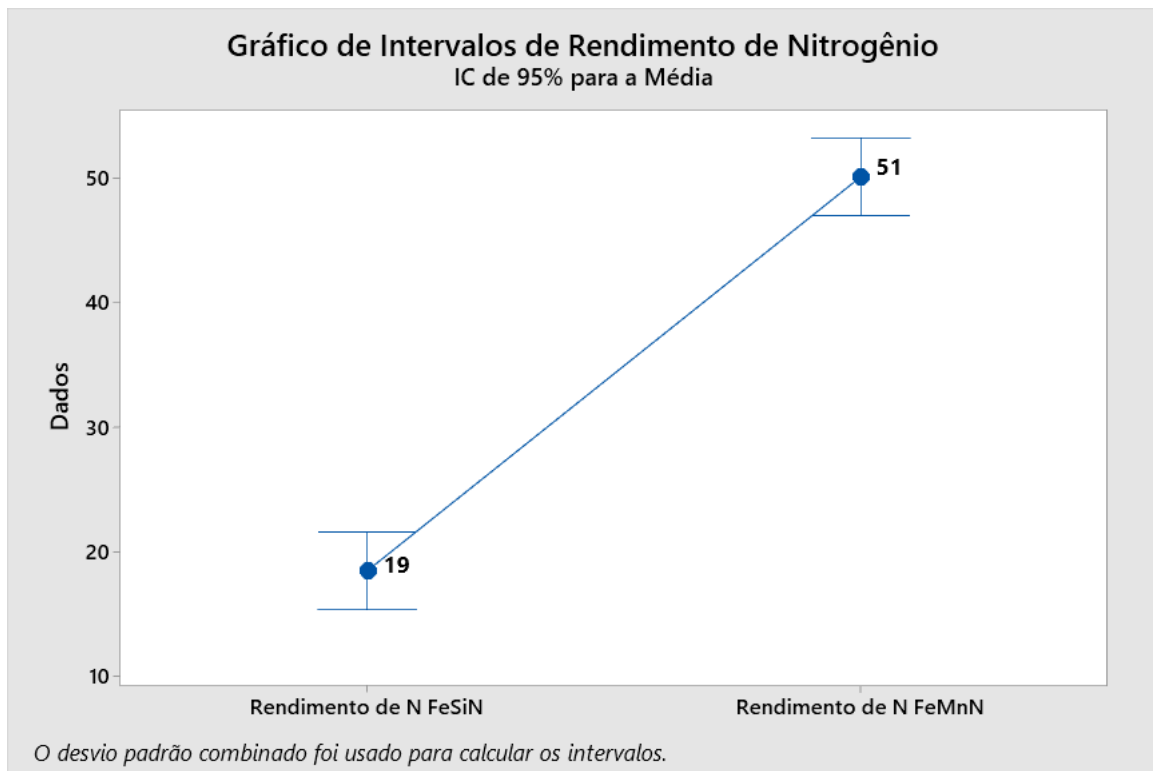


Figura 5.2 Resultados dos rendimentos obtidos em toda a produção (Minitab®).



Os resultados dos testes de nitrogenação demonstram que o rendimento com a utilização da liga de FeMnN é consideravelmente maior, alcançando cerca de 32% a mais de rendimento de nitrogênio quando comparado o mesmo com a utilização de FeSiN. Isto pode ser explicado de acordo com o demonstrado na Figura 3.9, o manganês favorece o aumento da solubilidade do nitrogênio no aço, enquanto o silício atua de forma contrária à solubilidade. Para se ter a avaliação estatística sobre os resultados de rendimento, foi feito através do minitab a comparação entre médias entre os dois grupos com o método ANOVA com um fator. A Figura 5.4 demonstra o gráfico de intervalos de rendimento com o teste ANOVA para avaliação do rendimento de nitrogênio com a utilização de cada ferroliga testada para nitrogenação.

Figura 5.3 Gráfico de intervalos dos rendimento de nitrogênio para a utilização das ferroligas de FeSiN e FeMnN (Minitab®).



Outro ponto observado foi que devido à baixa densidade da liga de FeSiN quando comparada à densidade do aço, após sua adição, toda a liga ficou sobrenadando na panela, reduzindo assim a cinética de reação para o incremento do nitrogênio no aço.

## 5.2 Oxidação do Aço

Como visto no capítulo 3.4.1, o oxigênio possui grande influência negativa quanto à solubilidade do nitrogênio no aço líquido, dito isso, durante os testes uma importante ocorrência veio a acontecer quando se teve uma adição da ferroliga de FeSiN em uma corrida com o ppm de oxigênio próximo à faixa máxima padronizada para a realização dos testes. Ao se realizar a adição da ferroliga em uma corrida com 49 ppm de oxigênio, uma grande espumação na panela aconteceu vindo a transbordar escória por todo o carro de tratamento da estação do Forno Panela, acarretando um grande risco à segurança operacional, a Figura 5.3 evidencia o fato ocorrido após a espumação durante o tratamento da corrida.

Figura 5.4 Estação de Tratamento do Forno Panela Após Espumação.

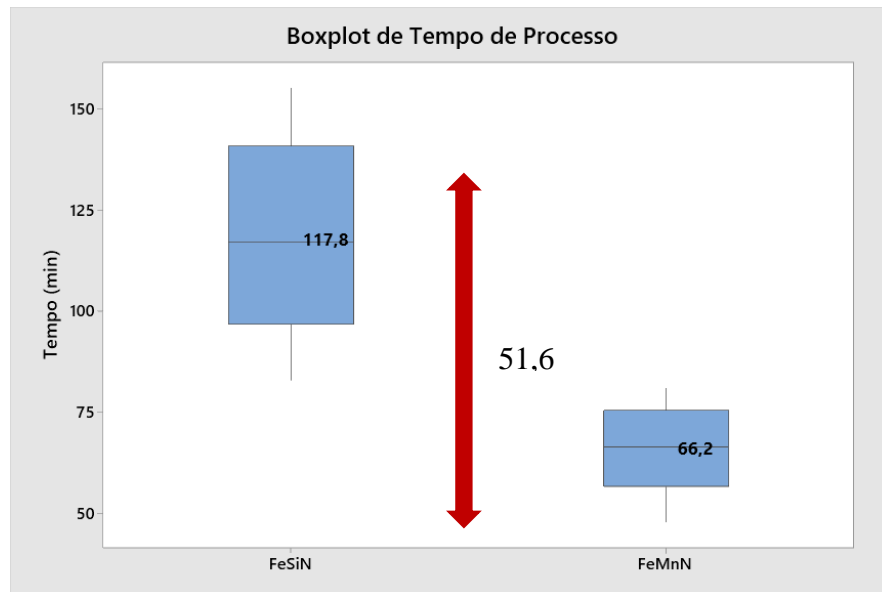


Fonte: Próprio autor (2023).

### 5.3 Tempo de Processo

As etapas descritas no capítulo 3.2.1 acerca da operação no Forno Panela podem ser multiplicadas devido à complexidade dos aços e incertezas sobre o rendimento das ferroligas. Como evidenciado acima, o rendimento com os testes das ferroligas de FeSiN e FeMnN obtiveram resultados bem diferentes entre si, o que acarretou para alguns testes um aumento das etapas de tratamento, como o acerto da composição química através da adição das ferroligas, aquecimento e amostragem do aço, o que aumentou o tempo total de processamento de cada corrida, com um maior tempo de processo para os testes com a ferroliga de FeSiN de 52 minutos em média . A Figura 5.3.1 demonstra os resultados para os tempos de tratamento para cada um dos testes.

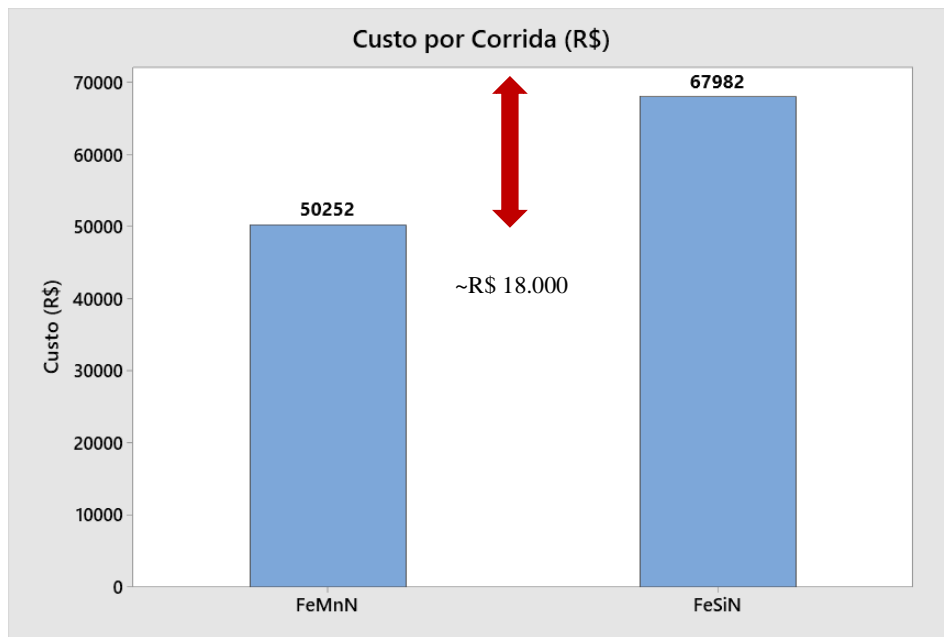
Figura 5.5 Tempos de Tratamento dos Testes de Rendimento (Minitab®).



#### 5.4 Custo de Produção

Os custos relacionados à adição de ferroligas para o atendimento da composição química dos aços são relativamente altos, e a otimização dessas adições faz com que o produto tenha um valor agregado maior ou menor dado a quantidade das ferroligas utilizadas e seus respectivos custos. Uma coisa importante a ser observada nos testes, é que dada a composição química do aço microligado grau FB70 evidenciada na tabela 3.3, a utilização da ferroliga de FeSiN faz com que o atendimento da faixa de silício, já seja atingida através da adição da mesma, fazendo com que o acerto de manganês seja feito por uma liga com um alto teor de pureza na ferroliga, aumentando o custo para o processamento do aço. Para a utilização do FeMnN, devido à alta quantidade de manganês na composição química desse aço, o consumo dessa ferroliga não interfere na utilização de ferroligas com um grau de pureza menor e custo relativamente baixo, deixando assim a produção desse aço mais viável economicamente em torno de R\$18.000,00 por corrida produzida. A Figura 5.4.1 mostra o custo de acerto químico do aço microligado grau FB70 com a utilização de cada liga.

Figura 5.6 Custo de acerto químico do aço microligado grau FB70 com a utilização de cada ferroliga (Minitab®).



Dada a redução no tempo de tratamento das corridas com a utilização do FeMnN, outro ponto importante é que tempos menores de produção promovem a redução no consumo de energia elétrica para o processamento das corridas do aço microligado grau FB70. A Tabela 5.4.1 evidencia o consumo de energia elétrica por minuto para a produção desse aço.

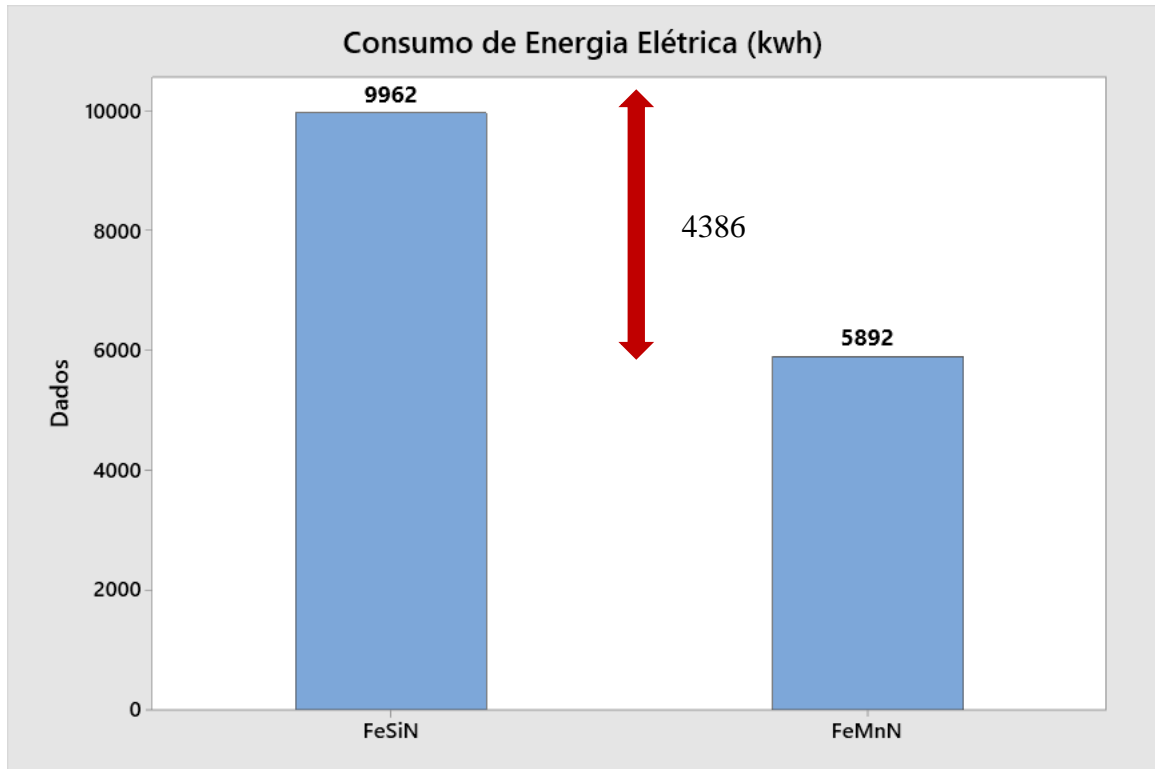
Tabela 5.4.1 Consumo de energia elétrica por minuto.

Energia Elétrica	Kwh/min
Consumo por corrida	85

Fonte: Próprio autor (2023).

Como evidenciado acima, a redução média de 51,6 minutos no tempo total de processamento de cada corrida desse aço, promove então um menor consumo de energia elétrica, economizando em torno de 4386 kwh por corrida, que considerando uma tarifa média industrial na faixa de 0,32 R\$/kwh, representa uma economia no consumo de energia por corrida de R\$ 1.403,52. A Figura 5.4.2 mostra o consumo de energia elétrica por tipo de ferroliga utilizada para o tratamento das corridas.

Figura 5.7 Consumo de energia elétrica com a utilização de cada ferroliga (Minitab®).



Como demonstrado acima, foi totalizado então uma economia de energia elétrica e em consumo de ferroligas de aproximadamente R\$ 19.400,00 para a produção do aço microligado grau FB70 com a utilização na ferroliga de FeMnN para nitrogação quando comparada à utilização da ferroliga de FeSiN.

## 6 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados concluiu-se que a utilização do FeMnN como fonte para a incorporação de nitrogênio e o acerto da composição química do aço microligado grau FB70, é muito mais viável economicamente quando se comparada a liga de FeSiN. O melhor rendimento da ferroliga de FeMnN traz uma melhor confiabilidade operacional, reduzindo em grande parte os tempos de acerto de composição química e amostragem do aço, o que gera um ótimo benefício durante a etapa de refino secundário do aço, aumento a produtividade da planta e gerando uma economia em consumo de energia elétrica.

Um dos principais pontos destacados no trabalho se dá quanto à segurança operacional, foi visto que um teor elevado de oxigênio no aço prejudica a solubilidade do nitrogênio, mas também promove uma grande espumação na panela, com transbordamento de escória, quando a ferroliga de FeSiN é adicionada em corridas com um teor elevado de oxigênio, gerando um grande risco operacional, o que não acontece em um mesmo cenário quando a ferroliga de FeMnN é adicionada.

Foram considerados então três principais pilares para a avaliação da ferroliga a ser utilizada para o acerto químico do aço em estudo, segurança, produtividade e custo. Estes fatores foram fundamentais para se obter um processo confiável operacionalmente e seguro para o atendimento da composição química do aço microligado grau FB70 durante a etapa de refino secundário em Forno Panela.

Em decorrência destes fatos, foi possível aumentar o rendimento de nitrogênio em 32%, reduzir o tempo médio de tratamento desse aço em 52 minutos, o custo em energia elétrica em R\$ 1.403,52 por corrida, e o custo com consumo de ferroligas para o acerto da composição química do aço em R\$18.000,00 por corrida, reduzindo ainda a exposição operacional à transbordamentos de escória na estação do Forno Panela. Portanto, a partir disso, a ferroliga de FeMnN será a utilizada para a nitrogenação e acerto da composição química do aço microligado grau FB70, tendo uma economia total do projeto de R\$ 2.254.000,00 com a substituição da ferroliga de FeSiN.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANUÁRIO Estatístico. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- ANUÁRIO Estatístico. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- BARRETOS, Marcelo dos Santos. Aciaria elétrica: nitrogênio em aços SAE 1045. 1995.
- BRADASCHIA, C. Siderurgia para não-siderurgistas. 1986.
- BURBANO SANDOVAL, Carolina Fernanda. Modelos elasto-plásticos e sua influência no processo de dimensionamento de componentes mecânicos. 2014.
- CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 2015. 599p.
- COSTA E SILVA, André Luiz V. Refino dos aços. São Paulo : Blucher, 2023.
- OLIVEIRA S., Larissa. Estudo da incorporação de nitrogênio em aços para a produção de vergalhão CA50. 2020. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PEASLEE KD, et al, Alloy Recovery and Control in Steel Melting (2005). Faculty Research & Creative Works. Paper 523.
- RIBEIRO, D. B. Apostila de Refino Secundário dos Aços – Programa de Educação Continuada da ABM, Belo Horizonte, 2002.
- RIZZO, E.M.S. Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços. São Paulo-Brasil: ABM, 2006.
- SCAL, M. AC –532 Processos do forno-panela. Belo Horizonte:GERDAU MODULOS DE ACIARIA, 2012.
- SILVA, P. S. J. Influência de solutos intersticiais em nióbio e ligas nióbio-zircônio. 2005.
- SOARES, Jerônimo Reus Camboim. Controle da informação no registro de consumo de ferroligas durante a produção de aços especiais. 2010.
- TSCHIPTSCHIN, A. P. Mundo dos aços especiais: Processo de fabricação. Mod. 1. 33 p. Açominas, 2015.
- VALLOUREC: Tubos Mecânicos. 1. ed. Belo Horizonte: CatMec, 2015. 52 p.