



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

JEOVÁ DA SILVA MELO

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE FERRO-LIGAS UTILIZADAS NO REFINO
SECUNDÁRIO VIA FORNO-PANELA DE UMA ACIARIA ELÉTRICA**

FORTALEZA – CE

2019

JEOVÁ DA SILVA MELO

REDUÇÃO DO CONSUMO DE FERRO-LIGAS UTILIZADAS NO REFINO
SECUNDÁRIO VIA FORNO-PANELA DE UMA ACIARIA ELÉTRICA

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do diploma de Engenheiro Metalurgista.

Orientadora: Profa. Dra. Janaína Machado.

FORTALEZA – CE

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- Mlr MELO, JEOVÁ DA SILVA.
 REDUÇÃO DO CONSUMO DE FERRO LIGAS UTILIZADAS NO REFINO SECUNDÁRIO VIA
 FORNO-PANELA DE UMA ACIARIA ELÉTRICA / JEOVÁ DA SILVA MELO. – 2019.
 63 f.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
 Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.
 Orientação: Profa. Dra. JANAINA GONCALVES MARIA DA SILVA MACHADO .
1. Refino secundário. 2. Metalurgia de Panela. 3. Forno-Panela. 4. Elementos de Liga. 5. Ferro-Silício-
 Manganês. I. Título.

CDD 669

JEOVÁ DA SILVA MELO

REDUÇÃO DO CONSUMO DE FERRO-LIGAS UTILIZADAS NO REFINO
SECUNDÁRIO VIA FORNO-PANELA DE UMA ACIARIA ELÉTRICA

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Metalurgista.

Orientador: Profa. Dra. Janaína Machado.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Janaina Goncalves Maria da Silva Machado (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Francisco Alberto Marreiros da Rocha Filho
Gerdau (GAB)

A minha mãe, Maria das Graças,
por ter dedicado a vida aos filhos.
A meu pai, Edilson,
por sempre ter acreditado no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria das Graças Cunha da Silva e Edilson Rodrigues de Melo, pela indiscutível formação como pessoa e profissional, ensinando incansavelmente todos os dias o valor do conhecimento e trabalho árduo.

A Profa. Dra. Janaína Machado, pela excelente orientação, reconhecimento e apoio nos principais momentos da minha carreira profissional.

Aos irmãos que fiz durante a graduação, Jamil Nobre de Castro e Fabrício Damasceno Braga, pelo apoio, pelas críticas, pelos conhecimentos compartilhados e pelos momentos de descontração, fundamentais para alívio da rotina de trabalhar e estudar.

Aos meus professores da época de ensino médio, especialmente a minha eterna professora Aline Parente, por todo apoio, pela paciência, pelas infinitas ajudas com o português e por sempre acreditar que vou vencer, seja pessoalmente ou profissionalmente.

Aos meus amigos aciaristas da Gerdau Cearense, em especial a Marcos Alberto Fernandes e Francisco Bernardo Castro que, desde o início, abraçaram a causa e apoiaram todos os meus testes “malucos”.

Aos professores e amigos participantes da banca examinadora Alberto Rocha e Elineudo Moura pelo tempo dedicado, pelas valiosas colaborações e pelas sugestões.

“Em um momento havia dois caminhos a percorrer. Eu escolhi o menos percorrido, e isso fez toda a diferença”.

Robert Frost.

RESUMO

Com a evolução dos processos siderúrgicos, grandes avanços foram alcançados em todas as etapas da fabricação do aço, sendo uma das principais delas a metalurgia secundária, que pode ser definida como o trabalho metalúrgico de ajuste da composição química e da temperatura realizados fora do forno primário de fusão. Em primeiro lugar, sabe-se que, tanto as ações realizadas na etapa de refino primário, quanto as de refino secundário, terão efeito direto sobre a composição química do aço a ser fabricado. Diante disso, direta ou indiretamente, tais ações afetarão um conjunto de propriedades dos aços. Portanto, faz-se necessário um melhor conhecimento sobre o efeito dos elementos de liga e residuais sobre as propriedades dos aços, haja vista que, ao longo do tempo, as demandas sobre os processos de refino vêm aumentando significativamente, conseqüentemente, tornando-se imprescindível para a competitividade de uma usina a capacidade de controlar cada vez mais e com maior precisão os elementos de uma forma geral presentes no aço. Deste modo, este trabalho pretende contribuir com um estudo direcionado à redução do consumo das principais ferro-ligas utilizadas na etapa de refino secundário via forno-panela, sendo elas Ferro-Silício-Manganês e Ferro-Silício 75, e o carburante grafite, de forma a avaliar as conseqüências nas propriedades mecânicas, analisar os possíveis ganhos e identificar o melhor padrão de adições que atenda às características metalúrgicas do produto final. O estudo apresenta a construção de análises estatísticas, como cartas de controle, testes de normalidade e análise de capacidade ou capacidade, para verificação da influência das novas receitas nas propriedades de: limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento; nos principais produtos fabricados pela *mini-mill* em questão, isto é, vergalhões ou barras nervuradas para construção civil. Feito isso, realizaram-se testes para o estreitamento de faixas de composição química, implementando um balanço de massa via planilha eletrônica, com extensão SOLVER, para cálculos de previsão da adição ideal de ferro-ligas e carburantes, realizando um deslocamento de média para o aço SAE 1017 e concluindo com comparações entre os resultados obtidos e os resultados da receita utilizada anteriormente no processo, em que foi comprovado que tal deslocamento não alterou as principais propriedades do produto final, ou seja, o objetivo foi atingido.

Palavras-chave: Ferro-Silício-Manganês. Ferro-Silício 75. Grafite. Refino secundário. Metalurgia de Panela. Forno-Panela. Elementos de Liga. Redução do Consumo de Ligas.

ABSTRACT

With the evolution of steelmaking processes, great advances have been achieved in all stages of steelmaking, one of the main ones is secondary metallurgy, which can be defined as metallurgical work to adjust the chemical composition and temperature carried out outside the primary furnace of fusion. In the first place, it is known that both actions carried out in the primary refining stage as well as in the secondary refining stage will have a direct effect on the chemical composition of the steel to be manufactured. Thus, directly or indirectly, such actions will affect a set of properties of the steels. Therefore, it is necessary to have a better knowledge about the effect of the alloying and residual elements on the properties of the steels, since over time the demands on the refining processes have been increasing significantly, consequently becoming essential for the competitiveness of a power plant to be able to control more and more accurately the elements generally present in steel. In this way, this work intends to contribute with a study directed to the reduction of the consumption of the main ferroalloys used in the secondary refining stage through the ladle furnace, ferro silico manganese and ferrosilicon 75, and graphite fuel to evaluate the consequences on the mechanical properties, to analyze the possible gains and to identify the best additions standard that meets the metallurgical characteristics of the final product. The study presents the construction of statistical analyses, such as control charts, normality tests, and capacity or capability analysis, to verify the influence of the new recipes on the properties of: yield limit, tensile strength limit and elongation; in the main products manufactured by a mini-mill, that is, rebars or ribbed bars for civil construction. After this, tests were performed for the narrowing of bands of chemical composition, implementing a mass balance via a spreadsheet with SOLVER extension for prediction calculations of the ideal addition of ferroalloys and fuels, performing a mean displacement for SAE 1017 steel and concluding with comparisons between the results obtained and the results of the revenue previously used in the process. In that it was proven that such displacement did not alter the main properties of the final product, that is, the objective was achieved.

Keywords: Ferro Silico Manganese. FerroSilicon 75. Graphite. Secondary Refining. Ladle Metallurgy. Ladle Furnace. Alloy Elements. Reduction of the consumption of alloys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Fluxograma simplificado do processo siderúrgico de uma usina semi-integrada.....	15
Figura 2 -	Evolução dos Fornos Elétricos a Arco ao longo dos anos.....	15
Figura 3 -	Representação esquemática de uma estação de refino secundário com forno-panela.....	21
Figura 4 -	Representação sintetizada das funções do forno-panela.....	22
Figura 5 -	Diagrama de Ellingham - Variação da energia livre padrão por mol de oxigênio com a temperatura para vários óxidos.....	24
Figura 6 -	Arranjo físico interno do espectrômetro de emissão ótica.....	28
Figura 7 -	Curva de calibração (intensidade de corrente elétrica x concentração química do elemento).....	29
Figura 8 -	Ferro-ligas utilizadas. A) Ferro-Silício-Manganês. B) Ferro-Silício 75. C) Grafite.....	33
Figura 9 -	Espectrômetro utilizado para análise e registro de composição química do aço.....	34
Figura 10 -	Análises estatísticas da composição inicial do elemento Carbono.....	36
Figura 11 -	Análises estatísticas da composição inicial do elemento Manganês.....	37
Figura 12 -	Análises estatísticas da composição inicial do elemento Silício.....	38
Figura 13 -	Análise de capacidade da composição final do elemento Carbono.....	39
Figura 14 -	Análise de capacidade da composição final do elemento Manganês.....	40
Figura 15 -	Análise de capacidade da composição final do elemento Silício.....	40
Figura 16 -	Análise de capacidade do limite de escoamento na condição 1.....	41
Figura 17 -	Análise de capacidade do limite de resistência a tração na condição 1.....	41
Figura 18 -	Análise de capacidade do alongamento na condição 1.....	42
Figura 19 -	Interface geral da planilha de balanço de massa no software Excel.....	44
Figura 20 -	Interface de configuração da extensão SOLVER.....	44

Figura 21 - Mensagem de resultado da extensão SOLVER.....	45
Figura 22 - Análise de capacidade da utilização de grafite para ajuste do elemento carbono.....	47
Figura 23 - Análise de capacidade da utilização de ferro-silício-manganês para ajuste do elemento manganês.....	47
Figura 24 - Análise de capacidade da utilização de ferro-silício para ajuste do elemento silício.....	48
Figura 25 - Análise de capacidade do elemento carbono após deslocamento de média.....	49
Figura 26 - Análise de capacidade do elemento manganês após deslocamento de média...	49
Figura 27 - Análise de capacidade do elemento silício após deslocamento de média.....	50
Figura 28 - Análise de capacidade da utilização de grafite após realização de deslocamento de média para ajuste do elemento carbono.....	51
Figura 29 - Análise de capacidade da utilização de Ferro-Silício após realização de deslocamento de média para ajuste do elemento silício.....	52
Figura 30 - Análise de capacidade da utilização de Ferro-Silício-Manganês após realização de deslocamento de média para ajuste do elemento manganês.....	52
Figura 31 - Análise de capacidade do limite de escoamento após deslocamento de média.....	54
Figura 32 - Análise de capacidade do limite de resistência a tração após deslocamento de média.....	54
Figura 33 - Análise de capacidade do alongamento após deslocamento de média.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rendimentos médios típicos por elementos de liga.....	26
Tabela 2 – Principais elementos de liga e suas características.....	27
Tabela 3 – Composição média, fornecida pelos fabricantes, dos principais insumos, que são adicionados para ajuste de composição	34
Tabela 4 – Composição química do aço SAE 1017.....	43
Tabela 5 – Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado.....	43
Tabela 6 – Concentração dos valores de C, Mn e Si na condição 1.....	46
Tabela 7 – Comparação dos valores de C, Mn e Si nas condições 1 e 2.....	50
Tabela 8 – Comparação dos valores de adição dos principais insumos nas condições 1 e 2.....	53
Tabela 9 – Comparação dos valores das principais propriedades mecânicas de vergalhões nas condições 1 e 2.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FEA	Forno Elétrico a Arco
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
Fe-Si-Mn	Ferro-Silício-Manganês
Fe-Si 75	Ferro-Silício 75
EBT	Eccentric Bottom Tapping
SAE	Society of Automotive Engineers
LSL	Limite Inferior Especificado
USL	Limite Superior Especificado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivos Gerais.....	17
2.2	Objetivos Específicos.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Vazamento do aço líquido.....	18
3.2	Adição de ferro-ligas, desoxidantes e fundentes.....	19
3.2.1	<i>Conceito de ferro-ligas</i>	19
3.2.2	<i>Sistema automatizado de adição de ferro-ligas</i>	20
3.2.3	<i>Sistema manual de adição de ferro-ligas</i>	20
3.2.4	<i>Equipamento: forno-panela</i>	21
3.3	Desoxidação do aço e da escória.....	23
3.4	Ajuste de composição química.....	25
3.4.1	<i>Espectrometria de massa</i>	27
3.5	Balanço de massa.....	29
3.6	Análises estatísticas.....	30
3.6.1	<i>Estatística Descritiva</i>	31
3.6.2	<i>Análise de regressão: Solver</i>	31
4	METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	33
4.1	Seleção das ferro-ligas estudadas.....	33
4.2	Coleta de dados para amostragem de composição química.....	34
4.3	Análise dos dados de composição química inicial.....	35
4.4	Análise dos dados de composição química final – condição 1.....	39
4.5	Premissas para elaboração do Balanço de Massa.....	42
5	RESULTADOS	46
5.1	Definição do valor objetivado de composição química final.....	46
5.2	Análise da redução do consumo de ferro-ligas após realização do deslocamento de média.....	51
5.3	Análise do atendimento as propriedades mecânicas após realização do deslocamento de média.....	53

6	CONCLUSÕES	57
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
8	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

O aço, no decorrer do desenvolvimento da humanidade, tornou-se um material essencial à vida moderna. Tal material está presente em todos os setores da nossa vida, seja na construção civil, aviação, automobilismo, instalações de redes de telecomunicação, utensílios domésticos e na construção de equipamentos dos mais diversos tipos. A difusão do conhecimento sobre os processos de fabricação do aço tornou o seu uso no dia a dia ainda mais amplo e fez que seus variados tipos de processo de fabricação se tornassem de conhecimento comum entre os seus produtores. Com isso, para a sobrevivência e manutenção do negócio, os produtores de aço necessitam tornar suas usinas competitivas por meio da redução de custos, principalmente na redução do consumo de matérias primas, e aumento de produtividade concomitantemente com a qualidade. Para viabilizar isso, estudos de melhoria e mudanças do processo, assim como ações estratégicas, devem ser tomadas.

O aparecimento das *mini-mills**, por exemplo, trouxe grandes e rápidas mudanças na forma de se fabricar aço, visto que o seu conceito foi de alto interesse dos produtores; tratando-se de usinas compactas com alta flexibilidade de processo, podendo atender a diversos mercados. Tal característica torna as *mini-mills* usinas extremamente competitivas, pois necessita de uma mão de obra reduzida e de baixo investimento inicial, comparado a uma usina integrada.

A principal característica de uma *mini-mill* é a utilização de Fornos Elétricos a Arco (FEA) em suas aciarias, sendo sua planta geral constituída do pátio de sucatas, da aciaria e da laminação.

Diferente das usinas integradas, as *mini-mills* iniciam seu processo produtivo direto da fusão da carga metálica vinda do pátio de sucatas, constituída basicamente de sucata metálica processada e sucata metálica a processar, ambas oriundas de obsolescência, das indústrias e da própria usina. Ou seja, o fluxo de produção de uma *mini-mill* ou usina semi-integrada possui menos etapas, visto que irá partir direto do refino primário.

A **figura 1** mostra uma ilustração da planta siderúrgica utilizada em uma *mini-mill*.

* As *mini-mills* são identificadas como usinas siderúrgicas que operam aciarias elétricas e têm a sucata metálica como principal matéria-prima, caracterizando uma rota tecnológica semi-integrada.

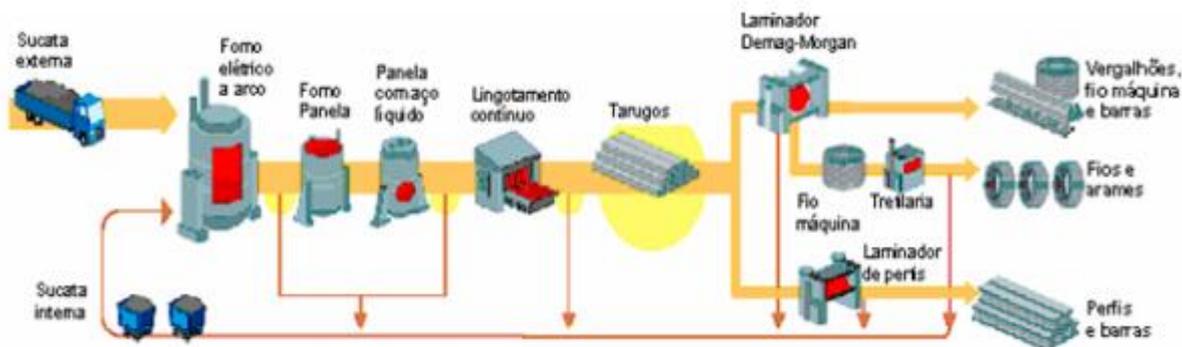


Figura 1. Fluxograma simplificado do processo siderúrgico de uma usina semi-integrada.
Adaptado de [1].

Com o acelerado avanço econômico e demanda por aço no mercado mundial, a tecnologia utilizada nas mini-mills evoluiu no mesmo ritmo. A necessidade por processos cada vez mais eficientes, ou seja, utilizando menos insumos e entregando maiores volumes de aço com qualidade cada vez mais elevada, tornou-se imprescindível para a sobrevivência das usinas siderúrgicas.

Realizando uma análise breve da evolução dos FEA's, ao longo dos anos, vemos na **figura 2** que uma das tecnologias implantadas por volta dos anos 80 foi a metalurgia secundária. Daí por diante, tal etapa do processo de fabricação do aço foi explorada por diversos aciaristas, desenvolvendo-se a patamares bem superiores aos da época em que foi implantada.

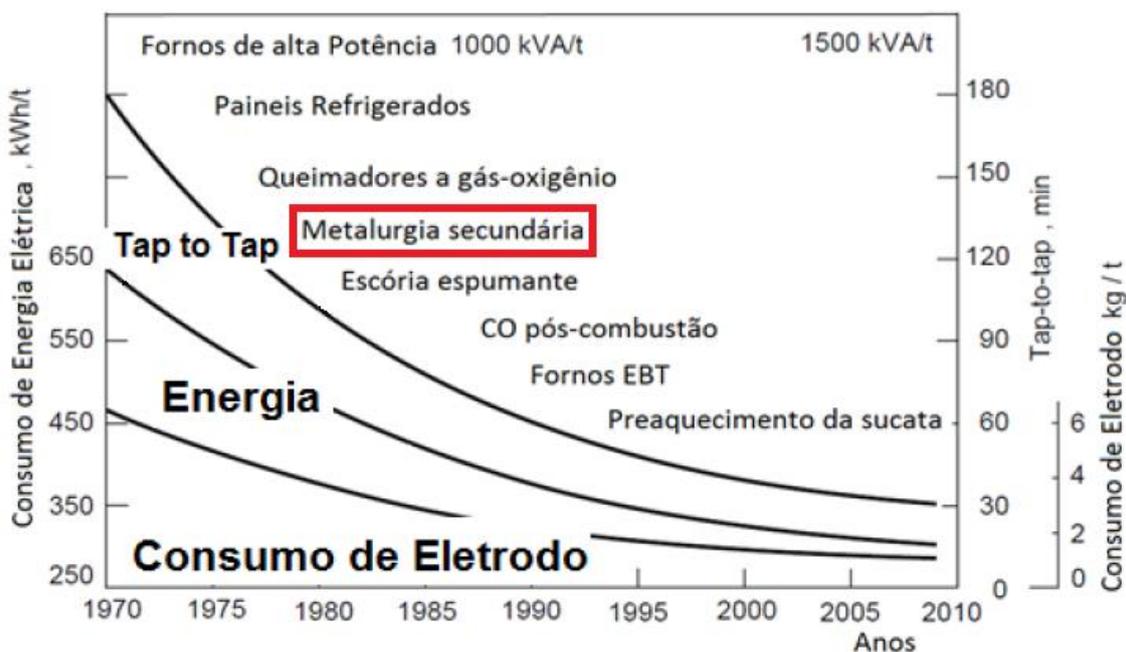


Figura 2. Evolução dos Fornos Elétricos a Arco ao longo dos anos.
Adaptado de [2].

Além disso, a etapa de refino secundário trouxe um aumento de produtividade para as aciarias no mundo todo, visto que proporciona maior versatilidade para o processo, fazendo com que a aciaria não perca ritmo em caso de eventuais falhas de sequenciamento. Portanto, um controle robusto e eficiente dessa etapa do processo traz como consequência uma maior estabilidade e desempenho para toda a aciaria de uma mini-mill.

Diante disso, o presente trabalho será direcionado à otimização da etapa de refino secundário, com foco na redução da utilização dos seus principais insumos, no caso as ferro-ligas Fe-Si-Mn e Fe-Si 75 e o carburante grafite. O refino secundário ou metalurgia secundária é de fundamental importância na produção do aço, pois será nessa etapa em que serão realizados os ajustes de composição química e temperatura do aço que posteriormente será encaminhado para o lingotamento contínuo, gerando o produto da aciaria que podem ser placas, blocos ou tarugos.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

- Realizar otimização do uso dos principais insumos utilizados na etapa de refino secundário com rota via forno-panela de uma mini-mill.
- Confrontar os resultados das principais propriedades mecânicas de produtos acabados de uma mini-mill obtidos antes e após a otimização da utilização de insumos.
- Diminuir os custos com insumos na etapa do refino secundário e garantir o controle de qualidade do produto final, atendendo todas as faixas da especificação desse produto.

2.2. Objetivos Específicos

- Levantar dados de composição química inicial e final, assim como das principais propriedades mecânicas do aço SAE 1017.
- Implementar balanço de massa, via planilha eletrônica com extensão SOLVER, para previsão de adições de ferro-ligas e carburantes no refino secundário de uma aciaria elétrica.
- Reduzir a utilização de ferro-ligas e carburantes com a otimização do valor ideal das adições direcionados para o limite inferior da faixa de composição química, realizando um deslocamento de média.
- Realizar análises estatísticas de carta de controle, teste de normalidade e capacidade, verificando o comportamento e distribuição dos dados antes e após a realização do deslocamento de média e utilização do balanço de massa.
- Verificar se a realização do deslocamento de média irá impactar ou não ao atendimento das principais propriedades mecânicas do produto estudado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Vazamento do aço líquido

O processo de refino secundário se inicia no momento em que o aço é vazado na panela, passando de condições extremamente oxidantes existentes no Forno Elétrico a Arco a condições extremamente redutoras na panela [3].

Nos primeiros fornos, denominados fornos de bica, o aço era vazado por meio de um canal de vazamento horizontal, localizado a 180° graus da posição da porta de escória, localizado acima do nível de escória, necessitando de uma grande inclinação para o vazamento. Os fornos mais modernos são dotados de um sistema de vazamento excêntrico (EBT – Eccentric Bottom Tapping) que consiste em um furo vertical, localizado excentricamente em um dos lados do forno. Esse sistema torna o tempo de vazamento mais longo, no entanto, permite um maior controle da passagem de escória para a panela, pelo fato do jato de aço ser mais fechado e, além disso, reduz a absorção de nitrogênio e hidrogênio durante o vazamento [3].

É no Forno Elétrico a Arco que ocorre o refino oxidante, e essa é uma etapa do processo produtivo do aço em que ocorrem três processos metalúrgicos importantes: fusão, descarburização e desfosforação do aço. Tais processos dependem de um considerável aporte de oxigênio para o sistema. Por isso, dizemos que o Forno Elétrico a Arco trabalha em condições extremamente oxidantes. Conseqüentemente, a composição química final do aço a ser fabricado não vai ser alcançada nessa etapa, visto que muitos elementos da composição química dos aços são facilmente oxidados. Durante o vazamento, fundentes, desoxidantes e algumas ligas são adicionadas no jato de aço para aproveitar o efeito de turbulência, com as primeiras adições de agentes desoxidantes para o banho e para a escória. A partir daí, durante todo processo de Refino Secundário, os níveis de oxigênio devem ser reduzidos cada vez mais ao ponto que todas as adições seguintes de ligas sejam incorporadas ao banho com os melhores rendimentos e menores custos [5].

Dessa maneira, o oxigênio residual, presente no aço após a etapa do refino primário, irá reagir preferencialmente com esses elementos para formar óxidos, os quais irão para a escória.

3.2. Adição de ferro-ligas, desoxidantes e fundentes

Como foi dito anteriormente, algumas ferro-ligas, fundentes e desoxidantes são adicionados durante o vazamento do Forno Elétrico a Arco. Das ferro-ligas adicionadas, parte delas será consumida na desoxidação, e o restante será incorporado ao aço, alterando sua composição química. A realização dessas adições pode ser feita de duas maneiras: de forma automatizada, com um sistema de silos, e de forma manual, com utilização de pás ou sacos devidamente pesados.

3.2.1 Conceito de ferro-ligas

As ferro-ligas são denominadas como ligas metalicoferrosas compostas de ferro e de outros metais que possuem por finalidade a incorporação de elementos de liga ao aço, como: silício, manganês, cromo, níquel, molibdênio, nióbio, vanádio, boro e tungstênio. À primeira vista, parece mais interessante adicionar os elementos de liga no seu estado puro (grau comercial de pureza), de modo a reduzir a quantidade mássica utilizada, simplificando assim os métodos ou instalações de adição, ganhando espaço para armazenamento de materiais e facilitando a dissolução e homogeneização das ligas no aço líquido. No entanto, alguns elementos de liga devem ser adicionados na forma de ferro-liga devido a uma série de fatores. Por exemplo, alguns elementos de liga apresentam um elevado ponto de fusão no estado puro, como é o caso do Nb (2468°C), V (1900°C), Ti (1675°C), Cr (1890°C), B (2300°C), os quais não seriam fundidos ou demandariam um longo tempo para fundir na temperatura do banho metálico e, além disso, adicioná-los na forma de ferro-ligas custa muito menos do que o metal puro e sua incorporação no aço é muito facilitada [4].

A realização das adições de fundentes na aciaria pode ser feita de duas maneiras, como com as ferro-ligas, e é necessária principalmente para a remoção de impurezas durante o refino do aço fabricado e para o controle da basicidade da escória gerada. Além disso, tais fundentes atuam como controladores do ponto de fusão e da viscosidade da escória. Os principais fundentes utilizados nas aciarias são: cal calcítica, cal dolomita e fluorita. A composição desses elementos favorece o equilíbrio da escória, fazendo com que não seja provocada uma corrosão significativa no revestimento refratário dos fornos e panelas utilizados na aciaria. A **figura 3** mostra uma imagem

esquemática de uma estação de refino secundário com forno-panela e seus silos de adições de ferro-ligas e fundentes automatizados.

3.2.2 Sistema automatizado de adição de ferro-ligas

O sistema de pesagem de ligas possui a função de efetuar as pesagens desejadas previamente calculadas para cada ferro-liga. Esse sistema recebe eletronicamente o código e a quantidade a ser pesada, com isso, são acionadas as válvulas de abertura do silo da ferro-liga 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 ferro-liga 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 ferro-ligas solicitadas até que todas tenham sido devidamente pesadas e transferidas [10].

3.2.3 Sistema manual de adição de ferro-ligas

O sistema manual de adição de ferro-ligas é utilizado para realização de adições de materiais que não podem ser adicionados diretamente no vazamento do aço líquido (sistema automatizado), que é o caso do grafite, por exemplo, assim como para adições de ajuste fino de correção de composição química, ou seja, em pequenas quantidades. As adições são realizadas com o sistema de rinsagem e forno-panela ligados diretamente ao chamado olho do aço, região central da panela de aço líquido onde é formado uma espécie de redemoinho por conta da agitação do aço líquido provocado pelo sistema de rinsagem, tornando mais eficiente a incorporação do elemento desejado.

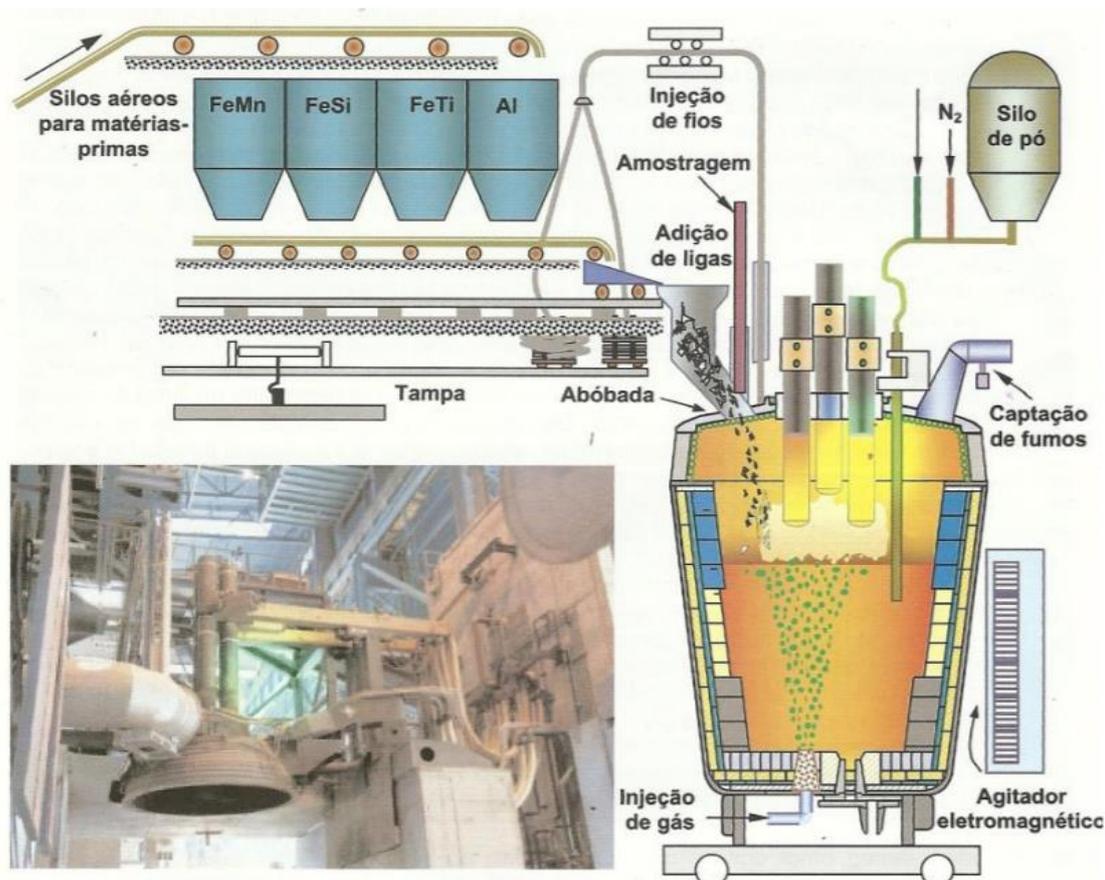


Figura 3. Representação esquemática de uma estação de refino secundário com forno-panela. Adaptado de [6].

3.2.4 Equipamento: forno-panela

O Forno-Panela é um equipamento com muitas utilidades para o refino secundário do aço líquido, sendo as principais delas o ajuste e a homogeneização da composição de química, o controle de temperatura, a desoxidação e a dessulfuração do aço.

A sequência de operações normalmente realizadas no forno panela estão descritas a seguir [6]:

1. A panela, contendo o aço líquido proveniente do forno de refino primário, é transportada para o forno panela.
2. São feitas as adições de ferro-ligas ou metais puros para correção da composição química, com base na amostra retirada após o vazamento que é analisada por um espectrômetro de massa.
3. A desoxidação com elementos que possuem maior afinidade pelo oxigênio, normalmente silício e/ou alumínio, pode ser efetuada.

4. Também é necessário adicionar cal ou escória sintética para adequar o volume de escória na panela, que impede a exposição do arco elétrico durante o aquecimento para ajuste de temperatura do aço líquido.
5. O forno é ligado para o primeiro aquecimento e a tendência de queda acentuada da temperatura, provocada pela realização das adições, se reverte. O tempo de forno ligado pode variar de 10 a 15 minutos, normalmente não excedendo esse limite, pelo fato de que a temperatura da escória é continuamente elevada, podendo prejudicar o revestimento da linha de escória da panela e da abóbada do forno.
6. Após esses tratamentos iniciais, realiza-se uma nova amostragem do aço e processa-se a desoxidação e/ou correção da composição química, caso ainda não tenha sido efetuada por completa, adicionando-se as ligas para correção.
7. Inicia-se o segundo aquecimento, cujo tempo é calculado com base na temperatura final objetivada. Nesta etapa, o incremento de temperatura é constante, podendo atingir de 3,5 a 6°C/minuto, dependendo da potência empregada no forno.
8. Para concluir o processo, retira-se uma amostra final e o aço é liberado para o lingotamento, se não forem necessárias novas correções.

A **figura 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.

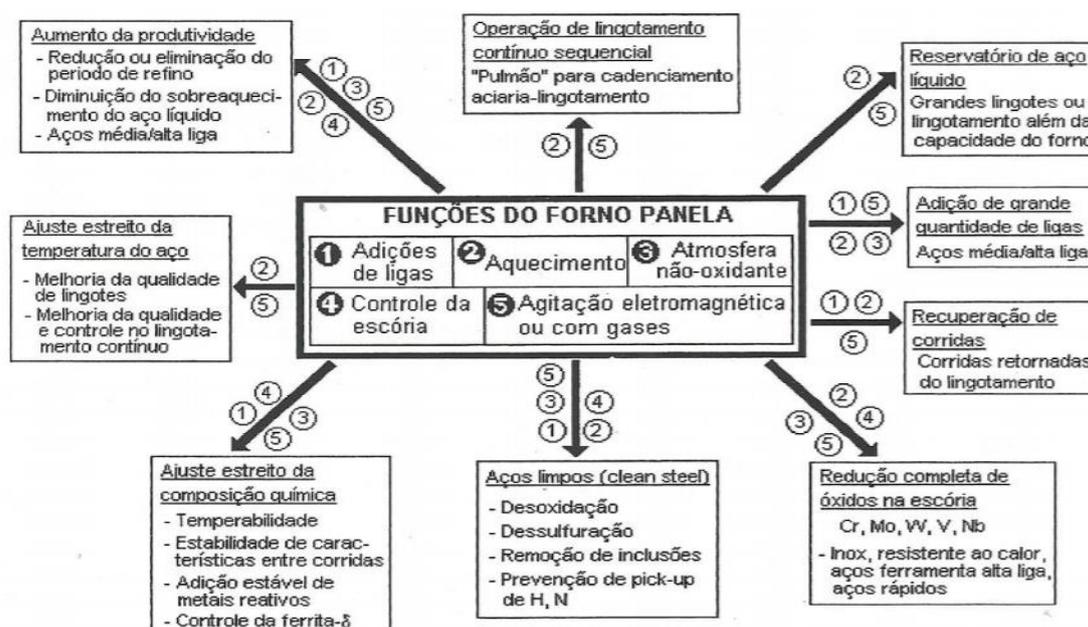


Figura 4. Representação sintetizada das funções do forno-panela. Adaptado de [9].

3.3. Desoxidação do aço e da escória

O aço líquido é vazado na panela apresentando um elevado teor de oxigênio dissolvido, bem como com uma quantidade expressiva de escória oxidante. A solubilidade do oxigênio no aço líquido é de 2.500 ppm na temperatura de cerca de 1.640°C. Entretanto ela decresce durante o resfriamento e cai fortemente durante a solidificação, atingindo somente 30 ppm no aço sólido. A desoxidação é realizada pela adição de uma quantidade apropriada de ferro-ligas. Os óxidos CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ são as formas mais estáveis de se encontrar os elementos Ca, Si, Al e Fe na natureza, por exemplo. Isso é uma demonstração prática da afinidade de determinados elementos pelo oxigênio. Ao se adicionar algum desses elementos no aço, formam-se óxidos que podem ficar retidos no aço ou se deslocarem para a escória. Já o elemento carbono é uma exceção, já que o produto da desoxidação é o monóxido de carbono, ou seja, um gás que não ficará retido no aço ou na escória. Diante disso, a desoxidação é o processo de redução do teor de [O] (oxigênio dissolvido no aço), desde o vazamento até a liberação do Forno-Panela, através da adição de elementos com maior afinidade pelo oxigênio. A afinidade de um metal pelo oxigênio ou a dificuldade de remover esse elemento químico do óxido formado é tratada pelo diagrama de Ellingham, que mostra o equilíbrio entre metais e óxidos no estado padrão, em que uma análise desse diagrama permite tirar diversas conclusões sobre a estabilidade dos óxidos presentes no aço [11].

A observação do diagrama, representado na **figura 5**, fornece uma visualização do poder que cada sistema tem para reduzir a pressão de oxigênio. Por exemplo, o sistema Ca(s) - CaO(s) consegue reduzir a pressão de oxigênio mais fortemente que o sistema Si(s) - SiO₂(s). Diz-se que CaO é mais estável que a SiO₂, por exemplo. Além disso, pelo mesmo motivo, numa dada temperatura, um determinado elemento metálico opera como redutor sobre todos os compostos, cujas linhas representativas estiverem situadas acima deste elemento. Dessa forma, a observação do diagrama permite a obtenção de explicação a respeito da co-redução de óxidos constituintes de um minério ou previsões sobre a escorificação seletiva de um metal bruto. Outra aplicação do diagrama de Ellingham, correspondente aos óxidos, é que a simples observação dos mesmos permite comparar o poder redutor de um metal em relação ao óxido de outro metal. Assim, ao analisar o diagrama, podemos constatar que a 1000°C o alumínio pode reduzir a sílica, enquanto o cromo não pode fazer o mesmo.

Portanto, os elementos silício e manganês poderão reduzir o ferro, realizando sua desoxidação. Com isso o produto do processo de desoxidação por manganês e silício pode ser desde a sílica sólida até o silicato líquido de manganês, em que a sílica sólida é fácil de ser retirada do banho e de se fixar na escória [12].

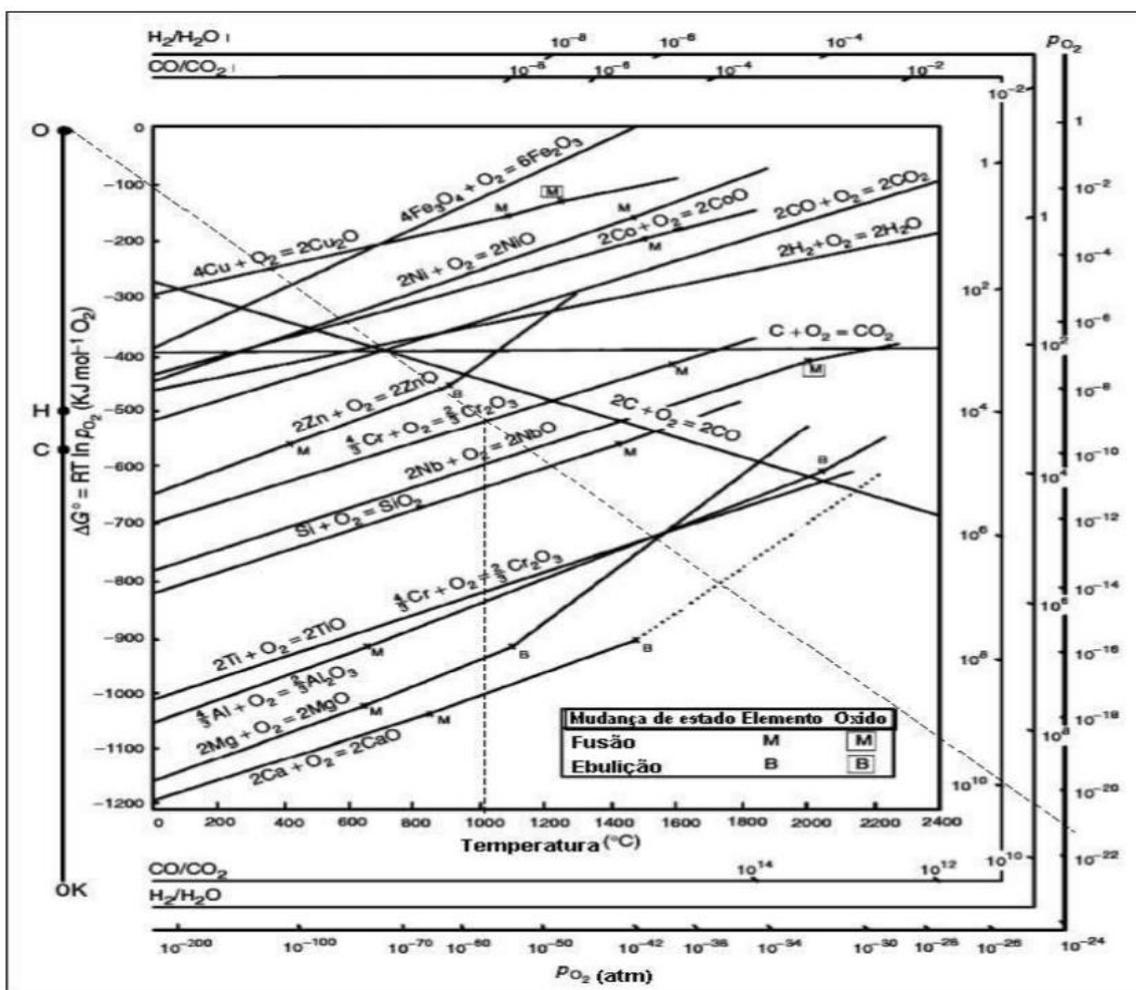


Figura 5. Diagrama de Ellingham - Variação da energia livre padrão por mol de oxigênio com a temperatura para vários óxidos. Adaptado de [13].

Assim como o aço, a escória também tem que ser desoxidada, visto que é incompatível que tenhamos um reduzido nível de oxigênio no aço e um elevado teor de óxidos fracos na escória. Com isso, para que a escória seja desoxidada (ou reduzida), dois processos são essenciais: a diluição e a aplicação de redutores de escória. Na diluição, o intuito é modificar a composição química da escória em busca de uma basicidade preestabelecida, em que são adicionados, por meio do processo de diluição, os formadores de escória ou fluxantes, tais como: alumina calcinada, cal e fluorita. Na desoxidação da escória, o aumento da basicidade precisa ser acompanhado não só pela redução do teor de oxigênio no aço, mas, também, pela redução do teor dos óxidos FeO

+ MnO na escória, pois quanto maior a basicidade da escória, menor o teor de FeO + MnO da mesma e, conseqüentemente, menor o valor de oxigênio dissolvido no aço. Como a escória está aproximadamente em equilíbrio com o aço, é incompatível ter reduzido nível de oxigênio no aço e elevado teor de FeO + MnO na escória. Deste conceito surgiu o processo de aplicação de redutores de escória, em que são adicionados desoxidantes propriamente ditos para reduzir os óxidos FeO + MnO remanescentes da escória vazada. Os redutores ou desoxidantes de escória usualmente utilizados são o CaC₂, FeSi em pó, Al granulado, SiC e, eventualmente, CaSi. Todos esses compostos possuem maior afinidade pelo oxigênio do que o ferro e o manganês. Os mais fortes são o CaSi e Al, seguidos do CaC₂. Independentemente do desoxidante utilizado, FeO e MnO vão se transformar em SiO₂, Al₂O₃, CaO na escória ou em CO na forma de gás. Tal fato ocorre porque estes novos óxidos são muito fortes e não vão mais liberar o oxigênio para reoxidar o aço líquido, com isso a escória passa a ser inerte e há recuperação de Fe e Mn que estavam perdidos na escória. A coloração da escória é um meio muito simples de avaliar o progresso da desoxidação com o uso de redutores. Enquanto houver FeO e MnO na escória, a coloração será escura, e quanto menor o percentual desses óxidos na escória, mais próximo de branca sua coloração ficará [11].

3.4. Ajuste de composição química

Uma das principais dificuldades na produção do aço é a necessidade de que todos os seus elementos estejam dentro das faixas de composição química exigidas pelas normas e especificação do produto. Entretanto, a composição final da liga é normalmente diferente da sua composição inicial, que se altera no curso do processo de fusão e refino. Além disso, antes de liberar uma panela de aço para ser lingotada, não somente os elementos especificados da liga devem estar dentro de determinados limites, mas também os elementos indesejáveis (impurezas) ou residuais devem estar abaixo de limites especificados. Por isso a etapa de ajuste da composição química é uma das mais importantes no processo de fabricação do aço.

É indispensável que sempre sejam considerados os rendimentos tanto das ferro-ligas utilizadas, assim como os rendimentos médios de cada elemento que se deseja incorporar no aço, visto que todas as ferro-ligas utilizadas possuem teores de impurezas [6].

A **tabela 1** mostra, de forma esquemática, os rendimentos dos principais elementos de liga utilizados para ajuste de composição em aços.

Tabela 1 – Rendimentos médios típicos por elementos de liga. Adaptado de [20].

Elemento	Rendimento médio (%) nas estações de refino secundário do tipo desgaseificação a vácuo, forno panela ou aquecimentos químico (CAS-OB)	Rendimento médio no caso da adição em convertedores a oxigênio ou na etapa de metalurgia de panela
C	95%	66%
Mn	95%	66%
Si	98%	69%
S	80%	56%
P	98%	69%
Cr	99%	69%
Al	90%	63%
B	100%	70%
Ni	100%	70%
Nb	100%	70%
Ti	90%	63%
V	100%	70%
Mo	100%	70%
As	100%	70%
Ca	15%	10%
O	100%	70%
N	40%	28%
H	100%	70%
Fe	100%	70%

A composição de um aço é alterada em função do interesse de sua aplicação final, conferindo ao material diferentes graus de resistência mecânica, ductilidade, soldabilidade, resistência à corrosão, entre outros. A **tabela 2** mostra de forma sintetizada o que os principais elementos de liga incorporados ao aço adicionam como características finais.

Tabela 2 – Principais elementos de liga e suas características. Adaptado de [15].

Elementos de liga	Influência na estrutura	Influências nas propriedades	Aplicações	Produtos
Níquel	Refina o grão. Diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço.	Aumento da resistência à tração. Alta ductilidade.	Aço para construção mecânica. Aço inoxidável. Aço resistente a altas temperaturas.	Peças para automóveis. Utensílios domésticos. Caixas para tratamento térmico.
Manganês	Estabiliza os carbonetos. Ajuda a criar microestrutura dura por meio de têmpera. Diminui a velocidade de resfriamento.	Aumento da resistência mecânica e temperabilidade da peça. Resistência ao choque.	Aço para construção mecânica.	Peças para automóveis e peças para uso geral em engenharia mecânica.
Cromo	Forma carbonetos. Acelera o crescimento dos grãos.	Aumento da resistência à corrosão e à oxidação. Aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços para construção mecânica. Aços-ferramenta. Aços inoxidáveis.	Produtos para a indústria química; talheres; válvulas e peças para fornos. Ferramentas de corte.
Molibdênio	Influência na estabilização do carboneto.	Alta dureza ao rubro. Aumento de resistência à tração. Aumento de temperabilidade.	Aços-ferramenta. Aço cromo-níquel. Substituto do tungstênio em aços rápidos.	Ferramentas de corte.
Vanádio	Inibe o crescimento dos grãos. Forma carbonetos.	Maior resistência mecânica. Maior tenacidade e temperabilidade. Resistência à fadiga à abrasão.	Aços cromo-vanádio.	Ferramentas de corte.
Tungstênio	Forma carbonetos muito duros. Diminui a velocidade das transformações. Inibe o crescimento dos grãos.	Aumento da dureza. Aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços rápidos. Aços-ferramenta.	Ferramentas de corte.
Cobalto	Forma carbonetos (fracamente).	Aumento da dureza. Resistência à tração. Resistência à corrosão e à erosão.	Aços rápidos. Elemento de liga em aços magnéticos.	Lâminas de turbina de motores a jato.
Silício	Auxilia na desoxidação. Auxilia na grafitização. Aumenta a fluidez.	Aumento da resistência à oxidação em temperaturas elevadas. Melhora da temperabilidade e de resistência à tração.	Aços com alto teor de carbono. Aços para fundição em areia.	Peças fundidas.

Para realização desse ajuste, a composição química do aço líquido deve ser monitorada. Esse monitoramento é feito por meio de espectrometria de emissão ótica.

3.4.1 Espectrometria de emissão ótica

A espectrometria de emissão ótica utiliza-se do princípio do movimento de íons em campos elétricos e magnéticos para classificá-los de acordo com sua relação massa-carga. Desta maneira, a espectrometria de massas é uma técnica analítica por meio da qual as substâncias químicas se identificam, separando os íons gasosos em campos elétricos e magnéticos. O dispositivo que realiza esta operação, o espectrômetro de massa, utiliza meios elétricos para detectar os íons produzidos a partir de átomos ou

moléculas, separando os positivos dos negativos. Esse equipamento oferece informação qualitativa e quantitativa sobre a composição atômica de materiais inorgânicos e orgânicos. Os espectrômetros de massas constam de quatro partes básicas: um sistema de manipulação para introduzir a amostra desconhecida no equipamento; uma fonte de íons, na qual é produzido um feixe de partículas proveniente da amostra; um analisador que separa partículas de acordo com a massa, e um detector, no qual os íons separados são recolhidos e caracterizados. A espectrometria de emissão ótica é um método para identificar os diferentes átomos que compõem uma substância. Seu princípio de funcionamento é o bombardeamento de uma substância com elétrons para produzir íons, ou átomos eletricamente carregados. Os íons atravessam um campo magnético que curva suas trajetórias de modos diferentes, dependendo de suas massas. O campo separa os íons em um padrão chamado de espectro de massa. A massa e a carga dos íons podem ser medidas por sua posição no espectro, indicando assim o percentual em massa de cada elemento presente. O feixe de luz difratado consiste num arranjo de feixes de luzes coloridas bem definidas, sendo cada um característico de um elemento químico e a variação da intensidade da luz de cada elemento função de sua concentração na amostra. Sabendo-se disso, cada feixe de luz colorida é canalizado para equipamentos sensíveis às tonalidades e às intensidades dessas luzes. Esses equipamentos, conhecidos como foto-tubos, são capazes de converter a energia luminosa em intensidade de corrente elétrica [15]. A **figura 6** mostra, de maneira esquemática, o interior e os componentes de um espectrômetro de emissão ótica.

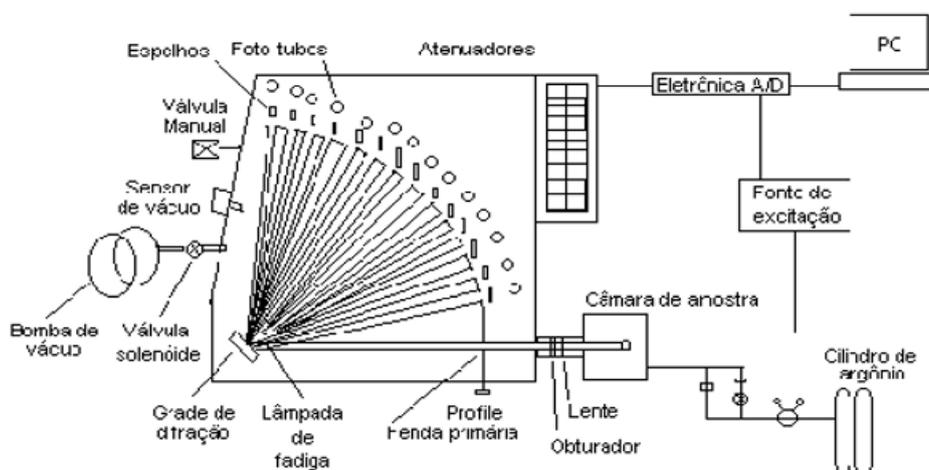


Figura 6. Arranjo físico interno do espectrômetro de emissão ótica. Adaptado de [21].

Dessa forma, quanto maior for a concentração do elemento na amostra, maior será a corrente elétrica gerada pelo foto-tubo posicionado para detectá-lo. Essa relação intensidade de luz e corrente elétrica fornece dados para o levantamento de curvas de calibração para cada elemento, bastando apenas que a intensidade de corrente elétrica medida seja aplicada à equação da curva, mostrada na **figura 7**, para se ter uma estimativa da concentração do elemento na amostra em questão [15].

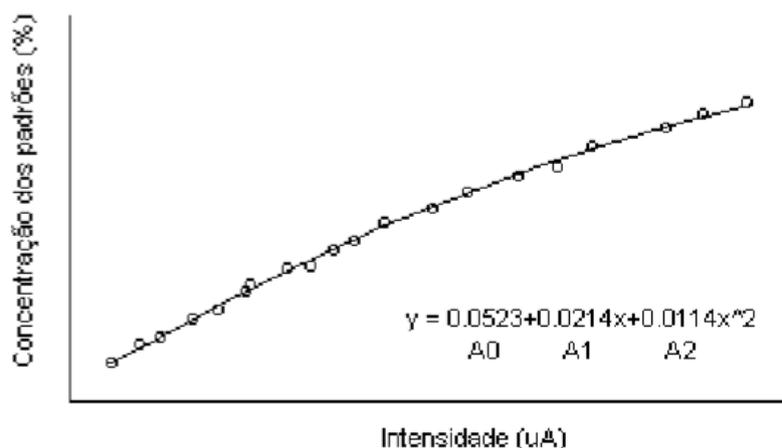


Figura 7. Curva de calibração (intensidade de corrente elétrica x concentração química do elemento). Adaptado de [21].

3.5. Balanço de massa

Sabemos que, segundo a lei de conservação das massas de Lavoisier: “*Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma*”, e nesse conceito é fundamentado o balanço de massa ou balanço de materiais. Em processos industriais, o balanço de massa é uma ferramenta de extrema importância. De um modo geral, o balanço de massa possui a finalidade de auxiliar no controle dos processos de produção, dimensionamento de equipamentos, medição de resultados e sua maximização.

A maioria dos processos dentro de uma usina siderúrgica é contínuo ou por batelada (no refino secundário temos vazamento do aço líquido, adição de ferro-ligas, ajuste de composição química e temperatura).

Para desenvolvimento de um balanço de massa é necessário conhecer alguns dados, por exemplo, pesos e composições químicas de todos os materiais que vão entrar no sistema. Com isso, o balanço de massa de um determinado sistema compõe o seu

modelo matemático, tendo um melhor controle do processo. Como todo modelo matemático, o balanço de massa também está sujeito a erros e a desvios. Identificar os erros e desvios do balanço de massa é fundamental para o seu bom funcionamento. Temos, então, como principais causas para o não acerto exato de um balanço de massa os [14]:

- Erros de pesagem;
- Erros de Análise química;
- Erros de amostragem;
- Erros de equipamentos (calibração);
- Erros de premissas (variáveis imensuráveis).

3.6. Análises estatísticas

O controle estatístico de um processo trata-se de um conjunto de técnicas utilizadas para controlar seja a qualidade, a produção ou a variação de um processo, comparando-se continuamente os resultados de um processo (sendo teste ou não) a um padrão, identificando, assim, a partir de dados estatísticos, as tendências e variações significativas que um processo pode ter, em busca de reduzir essas variações ou identificar oportunidades com base no comportamento dos dados. As ferramentas mais utilizadas no controle estatístico de processos são [8]:

1. Gráficos de pareto
2. Diagramas de causa e efeito (Ishikawa)
3. Histogramas
4. Curvas de distribuição
5. Cartas de controle
6. Capabilidade de processo.

3.6.1. Estatística Descritiva

Segundo ISO/TR 10017, o termo “estatística descritiva” refere-se a procedimentos que resumem e apresentam dados quantitativos, de maneira que revele as características da distribuição de dados. As características dos dados referem-se a seu valor central (mais comumente descrito pela média aritmética, mas que também podem incluir média ponderada, média harmônica, mediana etc.), e sua amplitude de âmbito ou dispersão (normalmente medidos pela faixa ou desvio-padrão). Uma outra característica interessante é a distribuição dos dados, para a qual existem medições quantitativas que descrevem a forma da distribuição (como o grau de “obliquidade”, que descreve simetria). A informação fornecida pela estatística descritiva normalmente pode ser transmitida rápida e eficazmente por uma variedade de gráficos que incluem apresentações de dados relativamente simples, tais como: gráficos de tendência, gráficos de dispersão, gráficos de barras, histogramas e gráficos de capacidade [18].

3.6.2. Análise de regressão: Solver

A análise de regressão é uma ferramenta estatística bem conhecida e amplamente utilizada. Conforme norma ISO/TR 10017, que fornece um guia para a seleção de técnicas estatísticas que possam ser úteis a uma organização no desenvolvimento, implementação, manutenção e melhoria da gestão da qualidade, a análise de regressão relaciona o comportamento de uma característica de interesse (geralmente chamada de “variável resposta”) a fatores potencialmente causais (geralmente chamados de “variáveis explicativas”). Tal relacionamento é especificado por um modelo que pode vir da ciência, da economia, da engenharia etc., ou pode ser derivado empiricamente. O objetivo é ajudar a entender a causa potencial de variação na resposta e explicar quanto cada fator contribui para essa variação [17].

É permitido ao usuário, por meio da análise de regressão: examinar hipóteses sobre a influência de variáveis explanatórias potenciais sobre a resposta e utilizar essas informações para descrever a mudança estimada na resposta para uma mudança em uma variável explanatória; prever o valor da variável de resposta; prever a faixa de valores dentro da qual a resposta deve se encaixar; estimar a direção e o grau de

associação entre a variável resposta e a explanatória. A percepção produzida pela análise de regressão se deve à sua capacidade de descrever padrões em dados de resposta concisamente, comparar subconjuntos de dados diferentes, mas relacionados, e analisar relações de causa e efeito em potencial. Quando as relações são bem esquematizadas, a análise de regressão pode fornecer uma estimativa das magnitudes relativas ao efeito de variáveis explanatórias, assim como as resistências relativas a essas variáveis. Essas informações são potencialmente valiosas no controle e melhoria de resultados de processo [16].

Formalmente, uma análise de regressão exigiria um número infinito de padrões de medição de calibração para realizar uma verificação completa. Obviamente, isso não é viável e a calibração é baseada em um pequeno número de variáveis, cujos valores são distribuídos ao longo da faixa de medição considerada. Isso significa que um conhecimento prévio do comportamento do sistema de medição é necessário para realizar um ajuste adequado da função. Para esse propósito, a estatística é aplicada [19].

A partir desse ponto de vista, existe uma grande variedade de métodos (abordagens e/ou algoritmos), que não são comumente usados, para realizar uma análise de regressão. Uma das razões para explicar por que esses diferentes tipos de regressão são desconhecidos é que a maioria dos métodos de regressão não é implementada nos softwares mais conhecidos e difundidos, mas, sim, em programas de fins específicos (e de alto custo). Conseqüentemente, o método dos mínimos quadrados (MMQ) é amplamente utilizado como se fosse o único método existente, embora, comumente, as premissas iniciais que devem ser atendidas não sejam verificadas ou, em outras palavras, a confiabilidade desse método de regressão em problemas específicos não seja assegurada.

Dessa maneira, uma metodologia prática, confiável e fácil para encontrar diferentes coeficientes de regressão por diversas análises é por meio de um add-in no Excel, chamado Solver. O Solver é um aplicativo simples, porém extremamente poderoso, desenvolvido pela Frontline Solvers® (www.solver.com) para otimizar um parâmetro numérico. Ele encontra um valor especificado em uma célula de destino, satisfazendo uma condição imposta, que é calculada a partir de outras células que estão funcionalmente ligadas (células evolutivas), por exemplo, a um máximo ou a um mínimo. O valor de cada célula variável é alterado por um incremento adequado definido por um algoritmo específico, ao mesmo tempo que é calculado o novo valor da

célula-alvo. Esse processo iterativo é repetido até que o ótimo tenha sido encontrado e pode ser controlado com as opções do Solver [17].

4 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta parte do trabalho serão descritas as análises e procedimentos utilizados para tomadas de decisões e realização de experimentos ao longo do trabalho.

4.1. Seleção das ferro-ligas estudadas

O critério estabelecido para se definir quais ferro-ligas seriam objetos de estudo do presente trabalho foi a importância do elemento de liga para as propriedades mecânicas finais do produto a ser fabricado, tais elementos são: carbono, manganês e silício.

Com isso, as ferro-ligas estudadas serão a Ferro-Silício 75 e Ferro-Silício-Manganês. Além dessas ferro-ligas, também será analisado o insumo grafite que é utilizado para ajuste do elemento carbono na composição final do aço, visto que tal elemento influenciará diretamente nas propriedades mecânicas do aço.

A imagem abaixo mostra o aspecto superficial de cada um desses insumos e logo em seguida a **tabela 3** mostra a composição média de cada um desses materiais.



Figura 8. Ferro-ligas utilizadas. A) Ferro-Silício-Manganês. B) Ferro-Silício 75. C) Grafite.

Fonte: autor

Tabela 3 – Composição média, fornecida pelos fabricantes, dos principais insumos, que são adicionados para ajuste de composição. Fonte: autor.

Material	Composição da liga (%)					
	Ferro (Fe)	Carbono (C)	Silício (Si)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
Ferro-Silício-Manganês	19,7	3,0	12,0	65,0	0,3	-
Ferro-Silício 75	23,8	1,2	75	-	-	-
Grafite	-	92	-	-	0,1	0,1

4.2. Coleta de dados para amostragem de composição química

Para a realização da montagem do balanço de massa, faz-se necessário saber o valor da composição química da corrida em pelo menos três momentos: momentos antes do vazamento da corrida no FEA, assim que a panela de aço líquido chega ao forno-panela e antes de liberar a panela de aço líquido para o lingotamento contínuo. Todas essas amostras foram analisadas em um espectrômetro da Shimadzu, modelo PDA-7000, como mostra a **figura 9**, em que o método utilizado foi o PDA (Pulse Height Distribution Analysis) em sua configuração básica.



Figura 9. Espectrômetro utilizado para análise e registro de composição química do aço.

Uma ponteira de amostragem é inserida no aço líquido e faz-se o vazamento de uma pequena amostra num molde de alumínio, que é levado ao laboratório para análise de sua composição química por meio do espectrômetro. Dessa forma, é obtida, como resultado, a porcentagem de cada elemento da composição do aço que está sendo elaborado. Esse resultado é registrado e remetido à análise que o compara com os limites da faixa de composição que a liga determina.

4.3. Análise dos dados de composição química inicial

Com uma amostragem por volta de 150 análises de composição inicial, os dados exportados do espectrômetro de massa foram tratados para a realização de 3 principais análises estatísticas, sendo elas: cartas de controle, testes de normalidade e análise de capacidade. Tais dados foram compilados em um banco de dados, utilizando o software da suíte de produtividade da Microsoft, o Excel, a fim de realizar nesses dados segmentações e tratamentos de refino de dados. Posteriormente esses dados foram encaminhados para o software de análise estatística MiniTab versão 2016.

As **figuras 10, 11 e 12** mostram o resultado das análises estatísticas realizadas nos três principais elementos do aço em estudo nesse trabalho (Carbono, Manganês e Silício), nas amostragens realizadas de composição inicial.

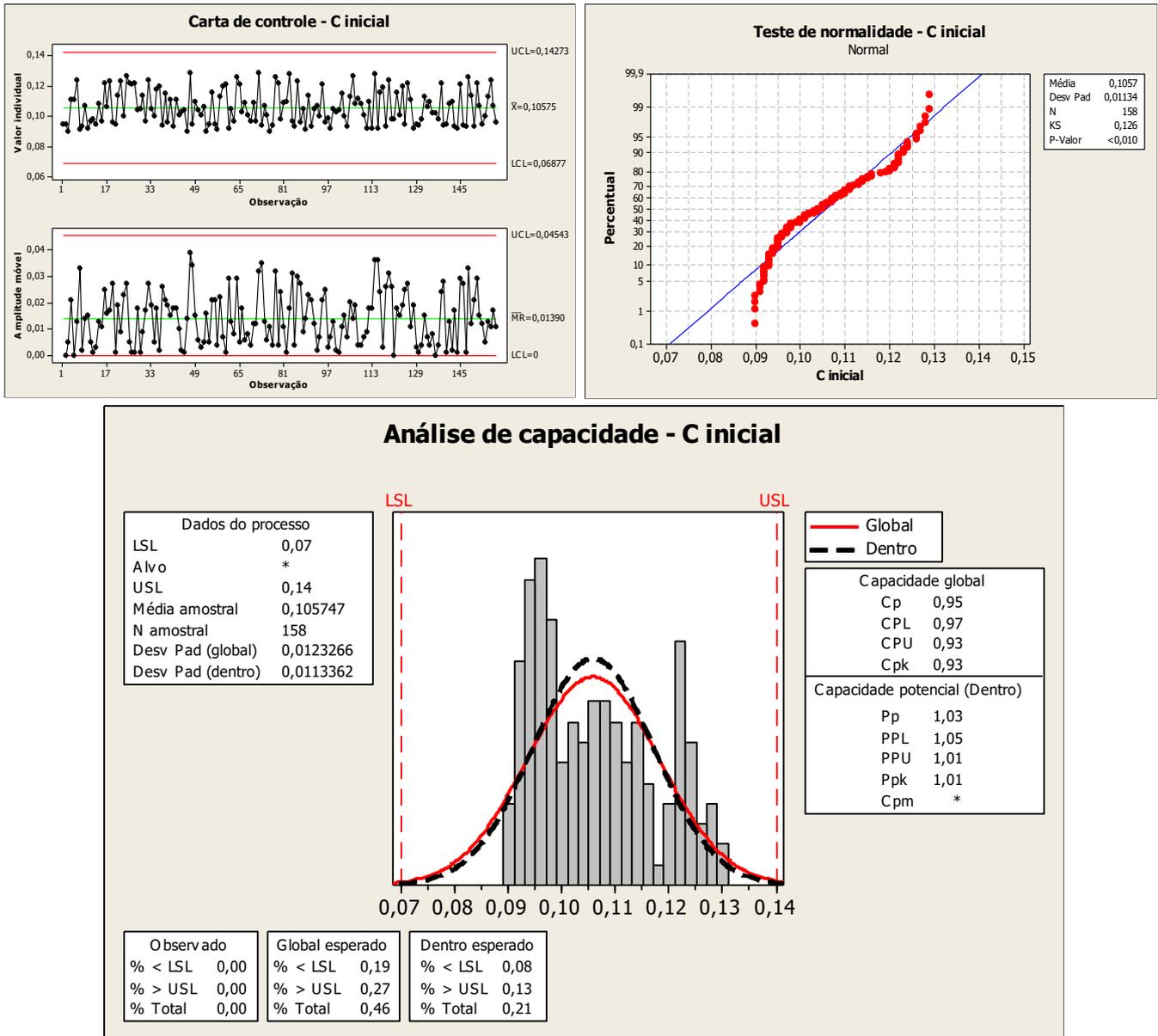


Figura 10. Análises estatísticas da composição inicial do elemento Carbono.

Fonte: autor.

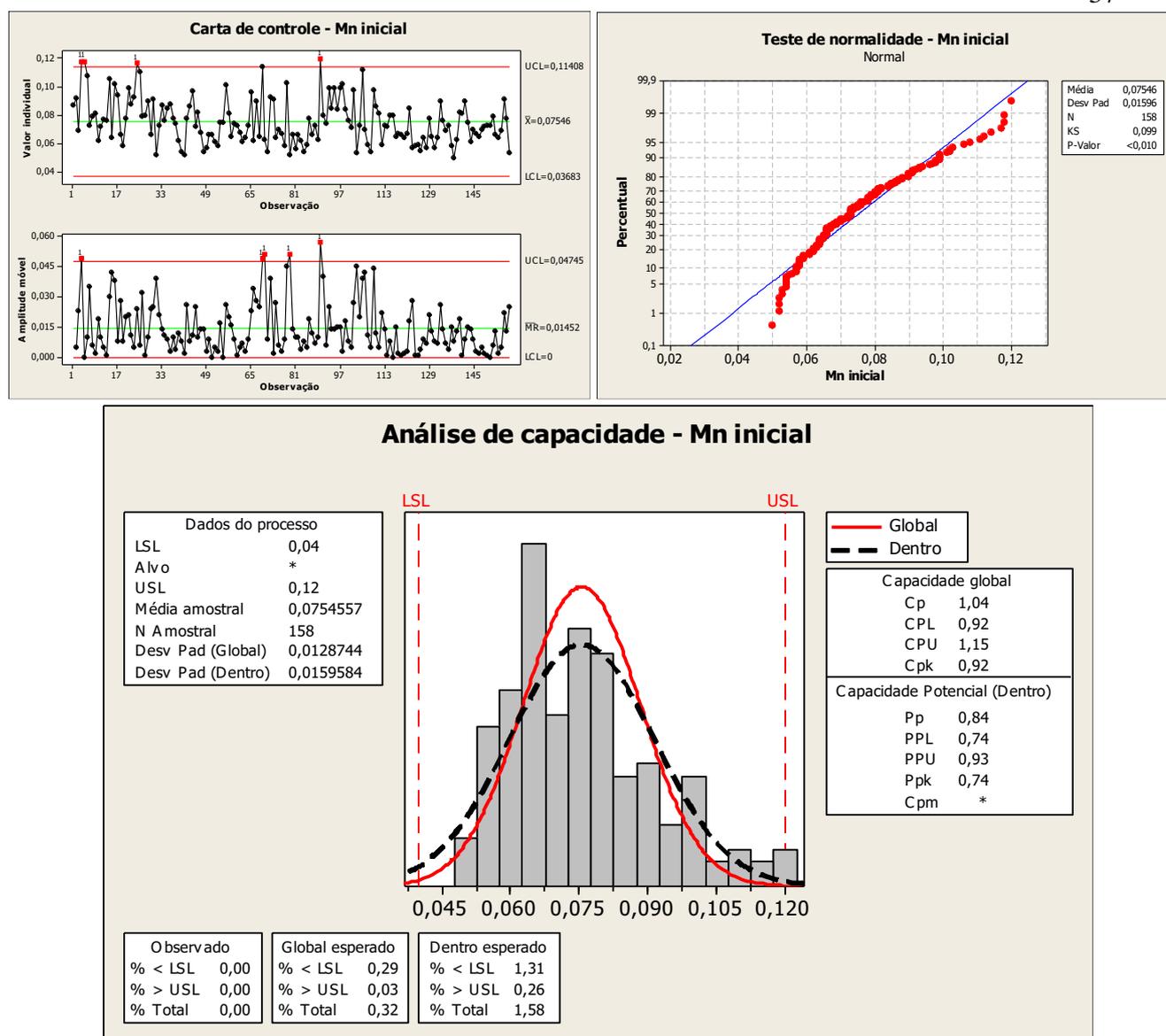


Figura 11. Análises estatísticas da composição inicial do elemento Manganês.

Fonte: autor.

Para se iniciar a análise dos dados, foi verificado o comportamento de cada um dos elementos em questão por meio das cartas de controle, em que podemos verificar para todos uma certa variação, e além disso os testes de normalidade para os três elementos confirmou que tais dados não possuem comportamento normal em uma única região, ou seja, existem mais de uma concentração nos dados, visto que o p-valor encontrado para todos é menor que 0,05.

Diante disso, tendo verificado tais condições, mesmo assim foi assumido a realização de análises de capacidade ou capacidade, pois tais observações ainda fornecem informações importantes quanto ao comportamento e à distribuição dos dados.

A partir dessas análises, foram identificadas algumas oportunidades de melhoria do processo, visto que, ao analisar os valores de C_p^{**} e C_{pk}^{***} , notamos novamente que, para todos os casos, os valores de C_{pk} são menores que os valores de C_p , ou seja, a concentração global dos dados pode sofrer deslocamentos nas suas distribuições, em que quanto mais próximo da distribuição potencial (Dentro) mostrada, melhor será para o processo.

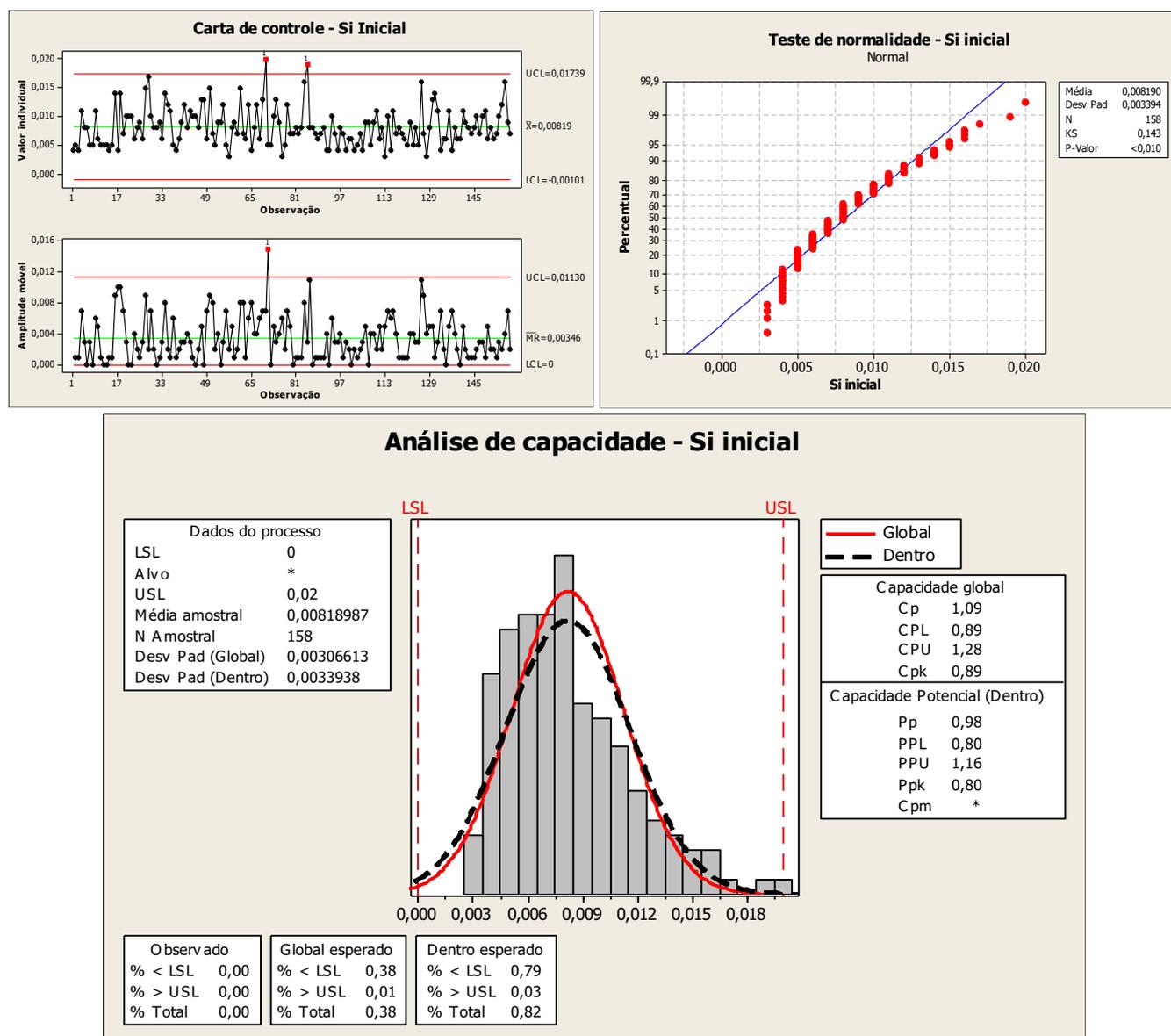


Figura 12. Análises estatísticas da composição inicial do elemento Silício.

Fonte: autor.

** C_p é uma medida da capacidade potencial do processo, sendo uma razão que compara os valores de dispersão da especificação e dispersão do processo.

*** C_{pk} é uma medida da capacidade potencial do processo e igual ao mínimo de C_{PL} e C_{PU} , sendo uma razão entre a distância da média do processo para o limite especificado mais próximo e a dispersão unilateral do processo.

4.4. Análise dos dados de composição química final – condição 1

A mesma metodologia utilizada para o tratamento dos dados de composição inicial foi aplicada para os dados de composição química final das amostras. Nesta etapa, foi concentrada a análise do comportamento e distribuição dos dados, utilizando como principal ferramenta a análise de capacidade ou capacidade, verificando as possibilidades de deslocamento de média para cada um dos elementos, visto que, quanto mais próximo do mínimo estiver a média, menos ferro-ligas serão consumidas sem necessidade. As **figuras 13, 14 e 15** mostram a distribuição antes da realização da viabilização de deslocamento de média.

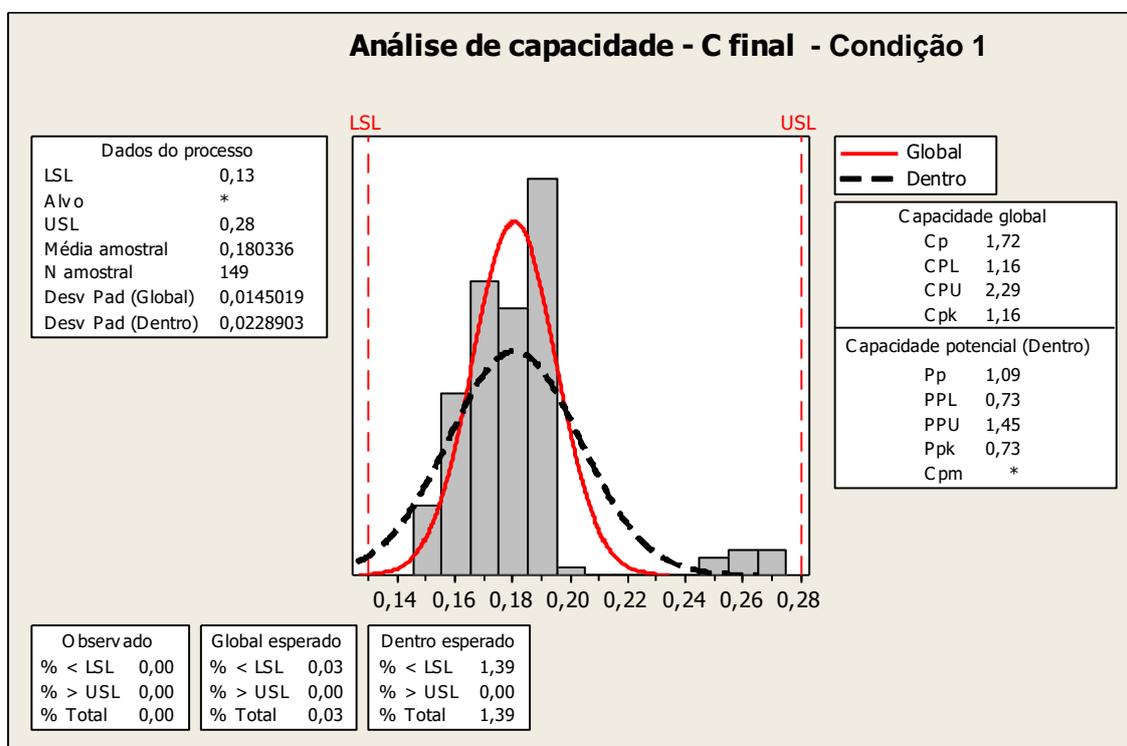


Figura 13. Análise de capacidade da composição final do elemento Carbono.

Fonte: autor.

Para realizarmos o deslocamento de média das composições químicas dos principais elementos de liga do aço em estudo nesse trabalho, faz-se necessário verificar se essa mudança não impactará nas propriedades finais dos produtos no quais esse aço será aplicado, que nesse caso são os vergalhões ou barras nervuradas para construção civil, em que suas principais propriedades são: limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento.

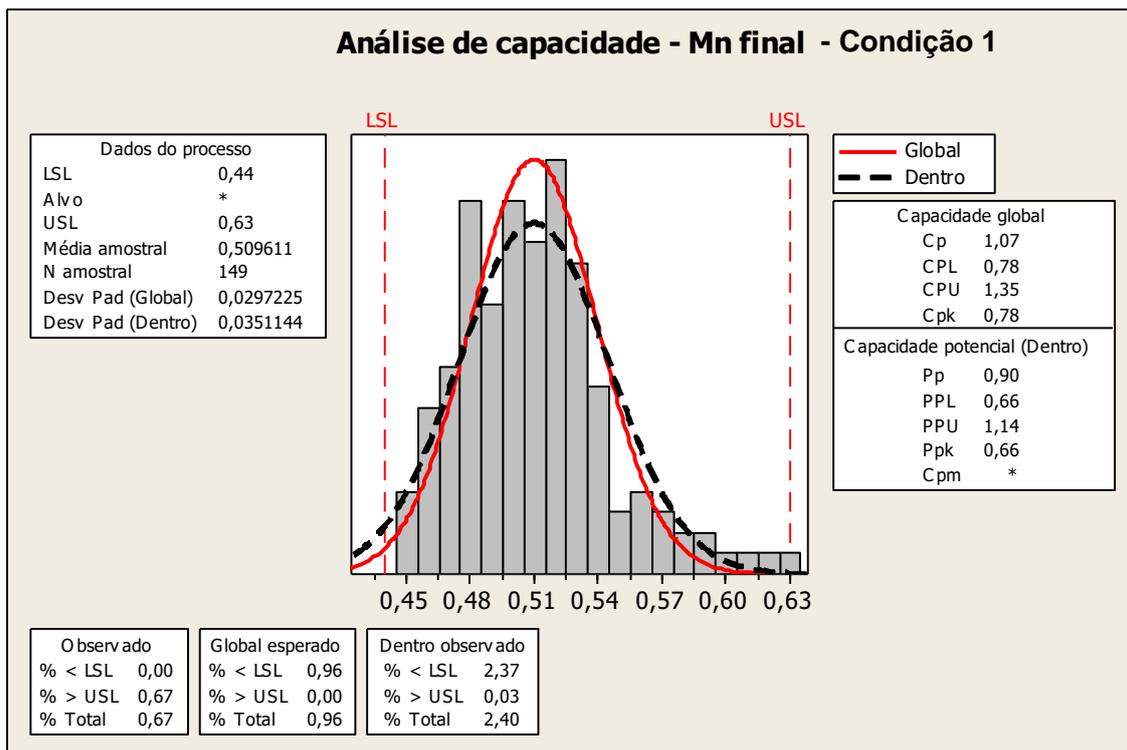


Figura 14. Análise de capacidade da composição final do elemento Manganês.

Fonte: autor.

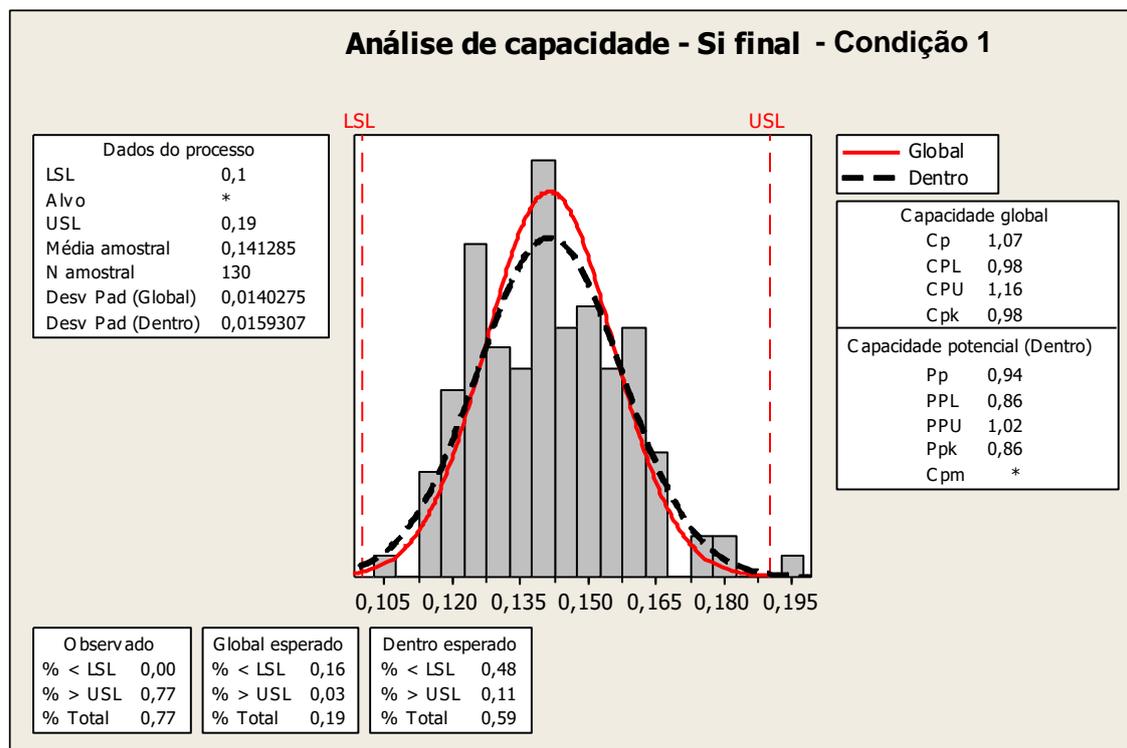


Figura 15. Análise de capacidade da composição final do elemento Silício.

Fonte: autor.

Diante disso, as **figuras 16, 17 e 18** mostram como estão distribuídos os dados dessas características com as composições finais antes de ser realizado o deslocamento de média.

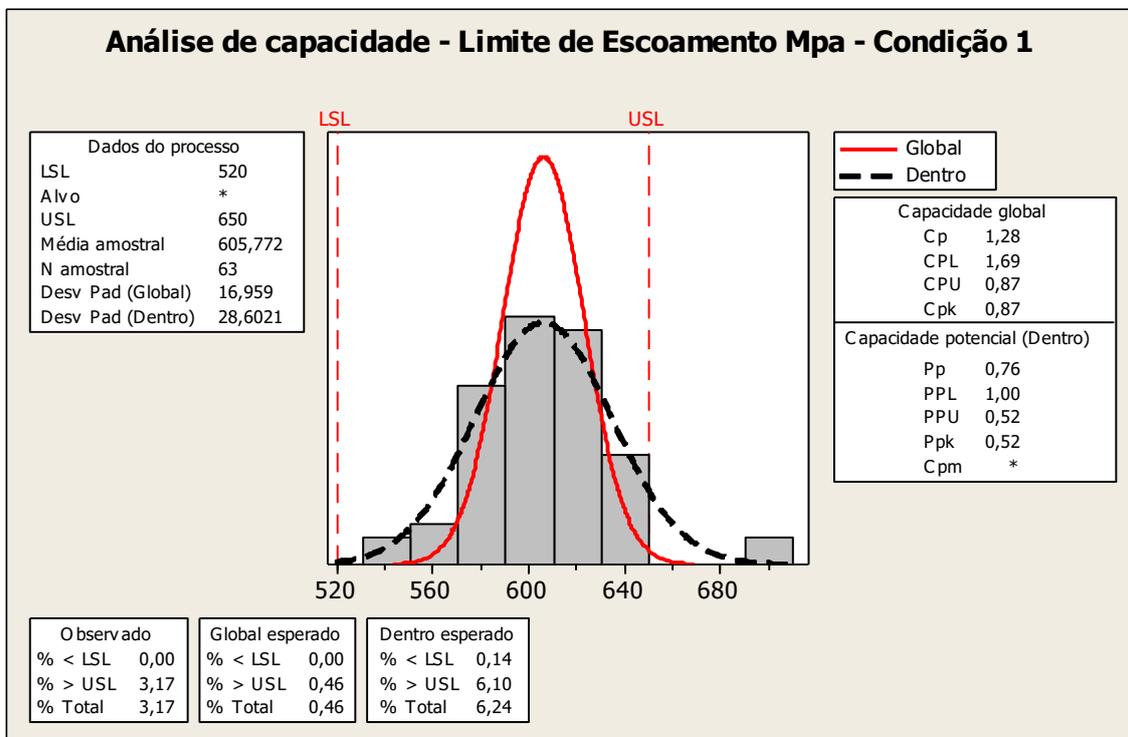


Figura 16. Análise de capacidade do limite de escoamento na condição 1.

Fonte: autor

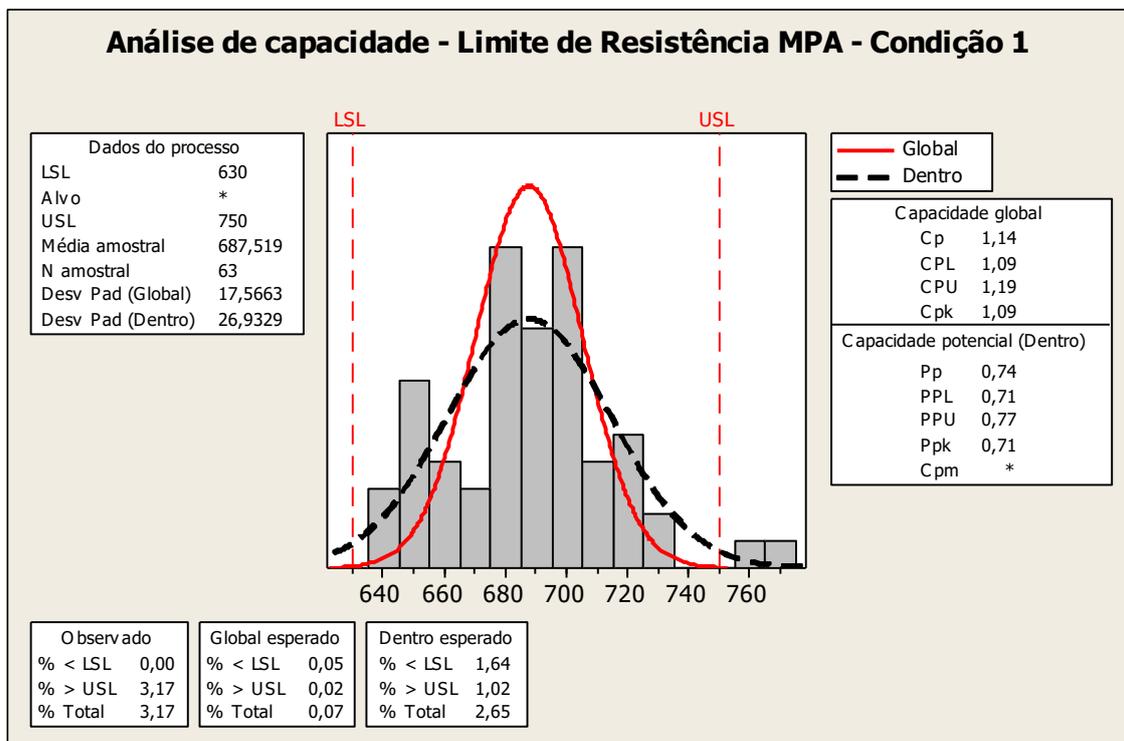


Figura 17. Análise de capacidade do limite de resistência a tração na condição 1.

Fonte: autor

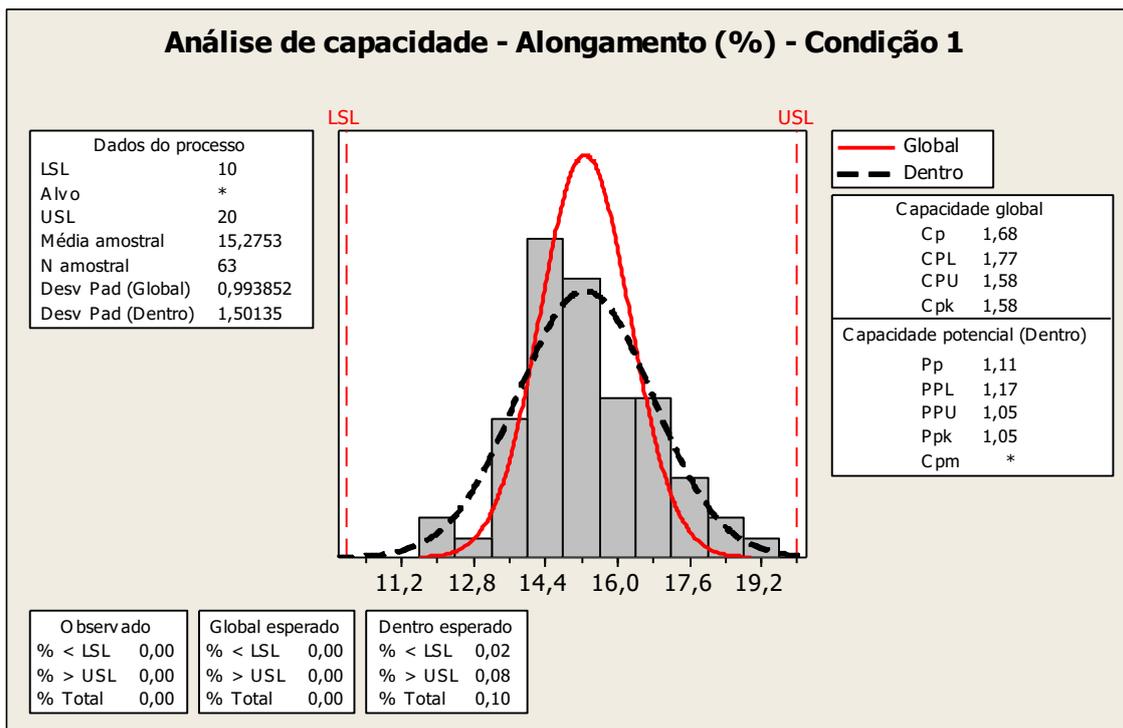


Figura 18. Análise de capacidade do alongamento na condição 1.

Fonte: autor

Após o mapeamento das distribuições e do comportamento das principais propriedades mecânicas exigidas pelo produto que o aço será empregado, é necessária a utilização de uma ferramenta que direcione, de maneira assertiva, os valores desejados para o deslocamento de média. Essa ferramenta é o balanço de massa.

4.5. Premissas para elaboração do Balanço de Massa

Para o cálculo do balanço de massa, dado que conhecemos o comportamento da composição inicial, o rendimento dos elementos de liga adicionados no processo e a composição química média das ferro-ligas, podemos estipular um valor dentro da faixa de composição do aço SAE 1017, especificada pela norma NBR NM 87 (**Tabela 4**) e realizar adições otimizadas, obtendo esse valor como composição final, e analisando se ainda assim o comportamento do produto final, de acordo com a NBR 7480 (**Tabela 5**), não foi impactado, ou seja, continua atendendo às normas e à especificação do produto.

Tabela 4 – Composição química do aço SAE 1017. Adaptada de [22].

AÇO	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Fósforo (P) máx.	Enxofre (S) máx.
1017	0,15 – 0,20	0,30 – 0,60	0,15 – 0,30	0,040	0,050

Com isso, o balanço de massa foi desenvolvido, utilizando novamente o software da suíte de produtividade da Microsoft, o Excel, em que a composição inicial alimentou o banco como dados de entrada, e o software devolve como dados de saída o valor das adições ideais para se atingir o valor da composição química final especificada, que neste caso já foi direcionada para o deslocamento de média.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. Adaptada de [23].

Categoria	Valores mínimos de tração				Ensaio de dobramento a 180°		Aderência	
	Resistência característica de escoamento ^a f_{yk} MPa ^e	Limite de resistência ^b f_{st} MPa ^f	Alongamento após ruptura em 10 ϕ ^c A %	Alongamento total na força máxima ^d A_{gt} %	Diâmetro do pino mm		Coeficiente de conformação superficial mínimo η	
					$\phi < 20$	$\phi \geq 20$	$\phi < 10$ mm	$\phi \geq 10$ mm
CA-25	250	1,20 f_y	18	-	2 ϕ	4 ϕ	1,0	1,0
CA-50	500	1,08 f_y	8	5	3 ϕ	6 ϕ	1,0	1,5
CA-60	600	1,05 f_y ^c	5	-	5 ϕ	-	1,0	1,5

^a Valor característico do limite superior de escoamento f_{yk} da ABNT NBR 6118 obtido a partir do LE ou δ_e da ABNT NBR ISO 6892.

^b O mesmo que resistência convencional à ruptura ou resistência convencional à tração (LR ou δ_t da ABNT NBR ISO 6892).

^c ϕ é o diâmetro nominal, conforme 3.4.

^d O alongamento deve ser atendido através do critério de alongamento após ruptura (A) ou alongamento total na força máxima (A_{gt}).

^e Para efeitos práticos de aplicação desta Norma, pode-se admitir 1 MPa = 0,1 kgf/mm².

^f f_{st} mínimo de 660 MPa.

A figura a seguir mostra a interface montada no software Excel para realização do balanço de massa de forma otimizada.

Para se atingir os valores ótimos de adição das ferro-ligas a extensão SOLVER do software Excel foi ativada e adaptada para gerar iterações até se atingir esse valor ideal, com a finalidade de se obter o valor mínimo de custo com base nos

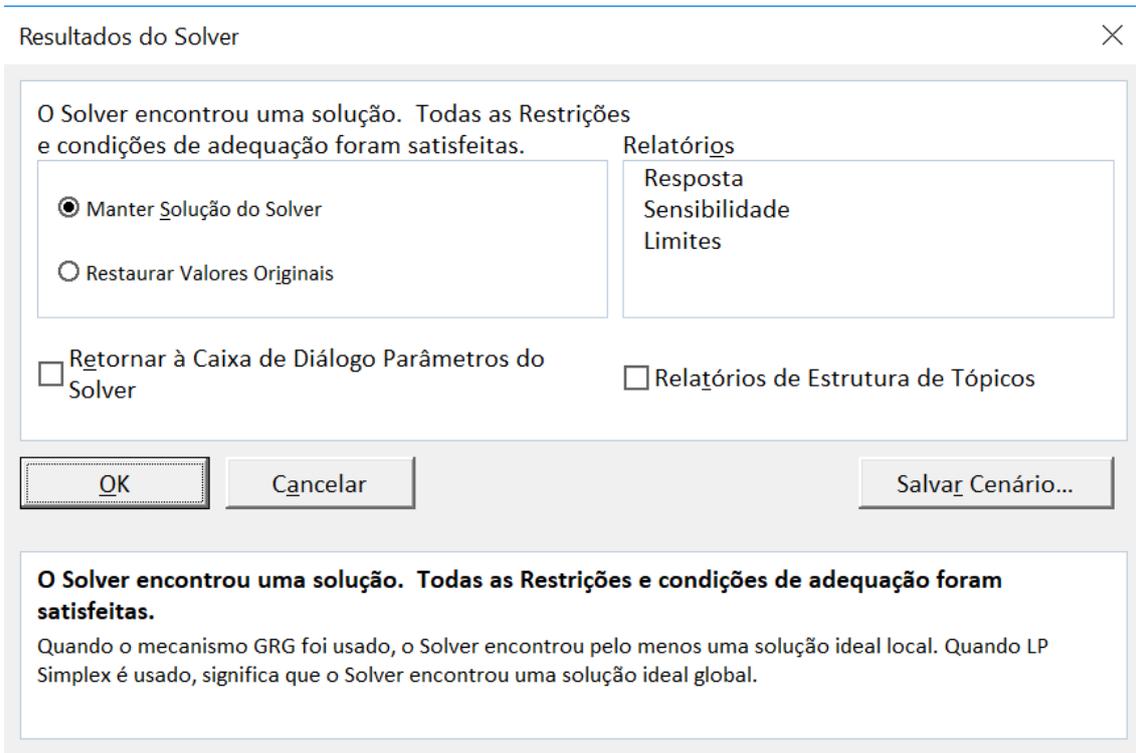


Figura 21. Mensagem de resultado da extensão SOLVER.

Fonte: autor

Considerando essas premissas, o balanço de massa foi criado, em que temos $entradas - saídas - acumulado = 0$, onde as entradas correspondem à quantidade total de ferro-ligas e fundentes adicionados, as saídas consistem na quantidade percentual de elementos de liga incorporados ao aço, e o acumulado é a diferença entre a quantidade total de ferro-ligas e fundentes pela capacidade de incorporação de cada elemento de liga de interesse.

Após a implementação do balanço de massa, foi feita a segmentação dos dados já otimizados, bem como a realização de novas análises estatísticas para comparação das propriedades mecânicas dos vergalhões antes e depois da realização do deslocamento de média. As ferramentas estatísticas utilizadas foram as mesmas para a condição 1: análises de capacidade das três principais propriedades mecânicas do produto a fim de mostrar e comparar o tipo de distribuição estatística e o novo comportamento dos dados.

5 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir dos estudos realizados com as amostras de composição química inicial e final do aço produzido via forno-panela em estudo. As análises novamente contemplarão abordagens de resultados de análises, nesse caso para as principais propriedades mecânicas de vergalhões ou barras nervuradas, conforme dito anteriormente. No primeiro momento das análises, serão analisados os resultados obtidos com a realização do deslocamento de média da faixa de composição química final para os principais elementos estudados nesse trabalho, verificando, em valores absolutos, a redução em Kg dos insumos selecionados. No segundo momento, será realizada a comparação entre as propriedades mecânicas antes e após o deslocamento de média, verificando os impactos nessas propriedades.

5.1. Definição do valor objetivado de composição química final

Foi verificado, nas análises realizadas nos elementos carbono, manganês e silício dentro da condição 1, que os seus valores estão concentrados de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 6 – Concentração dos valores de C, Mn e Si na condição 1. Fonte: autor.

<i>ELEMENTO</i>	<i>Carbono (C)</i>	<i>Manganês (Mn)</i>	<i>Silício (Si)</i>
Concentração média (%)	0,18	0,51	0,14

Nessa condição, o consumo das principais ferro-ligas utilizadas para ajuste de composição, ou seja, Grafite, Ferro-Silício e Ferro-Silício-Manganês, tinha o comportamento como mostra as figuras abaixo.

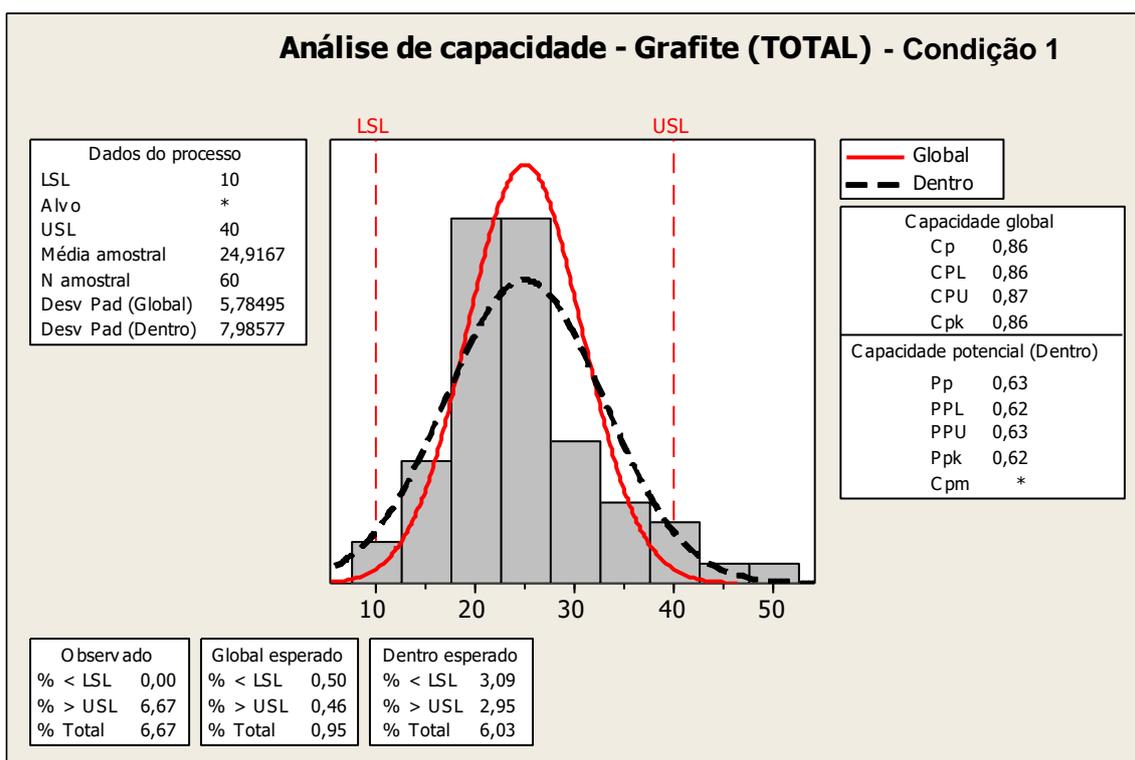


Figura 22. Análise de capacidade da utilização de grafite para ajuste do elemento carbono.

Fonte: autor

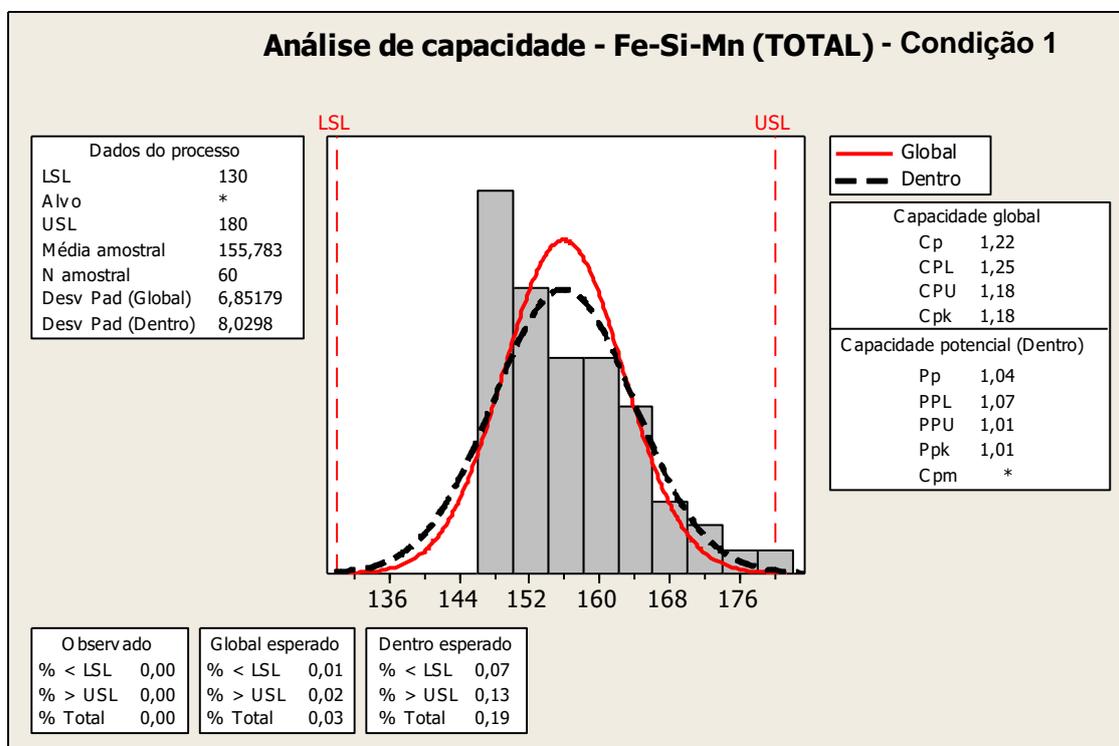


Figura 23. Análise de capacidade da utilização de Ferro-Silício-Manganês para ajuste do elemento manganês.

Fonte: autor

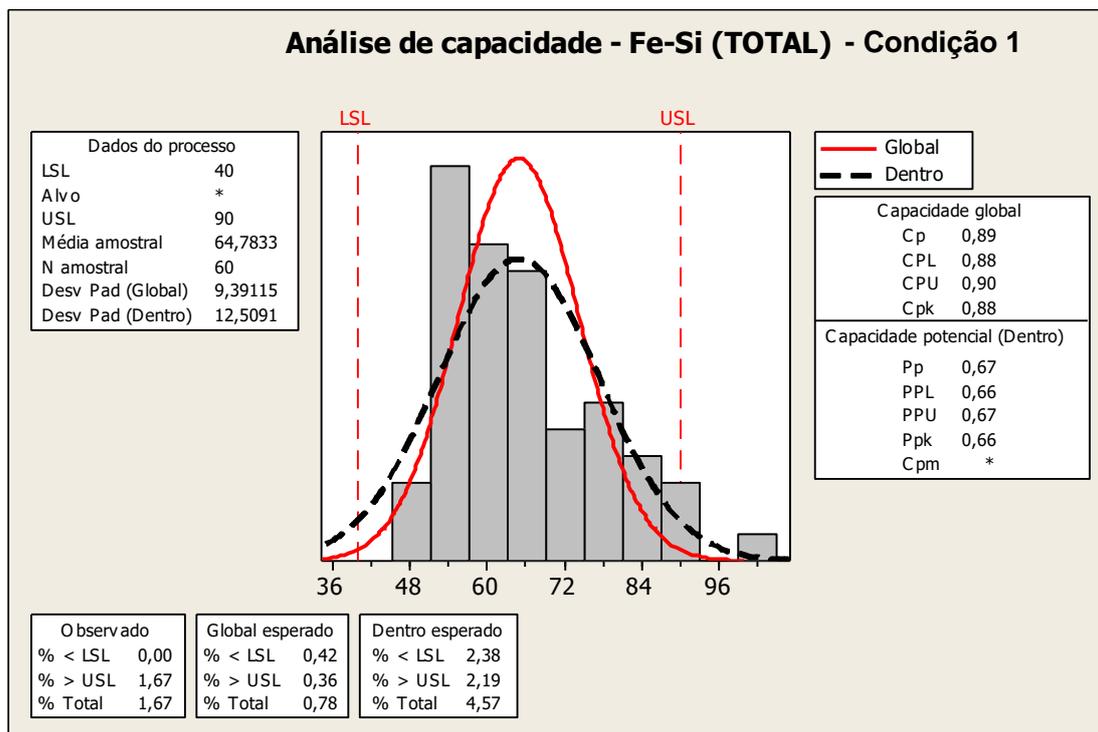


Figura 24. Análise de capacidade da utilização de Ferro-Silício para ajuste do elemento silício.

Fonte: autor

Notamos que para as ferro-ligas Fe-Si-Mn e Fe-Si 75 existe oportunidade de melhoria, visto que, para ambos os casos, o valor de Cpk é menor que o valor de Cp para a distribuição dos dados. Além disso, também foi verificado que, para o insumo grafite, os valores de Cpk e Cp são iguais, podendo afirmar, assim, que para esse insumo o valor das adições já está concentrado em uma região assertiva, sendo as oportunidades de melhoria mais restritas e os ganhos mais reduzidos.

Após realização de testes em que foi-se diminuindo progressivamente a média percentual dos principais elementos de liga, os valores ideais atingidos, considerando a variabilidade dos dados e garantindo que não ocorra uma desclassificação por estar abaixo do limite inferior, estão dispostos nas figuras abaixo para cada elemento.

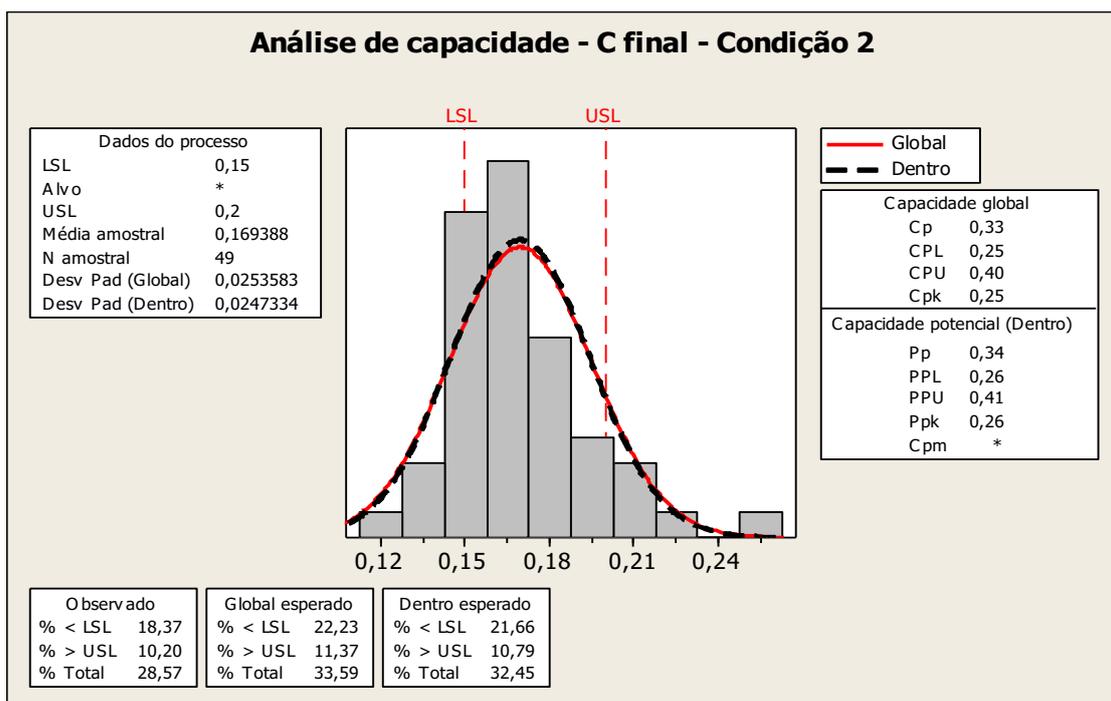


Figura 25. Análise de capacidade do elemento carbono após deslocamento de média.

Fonte: autor

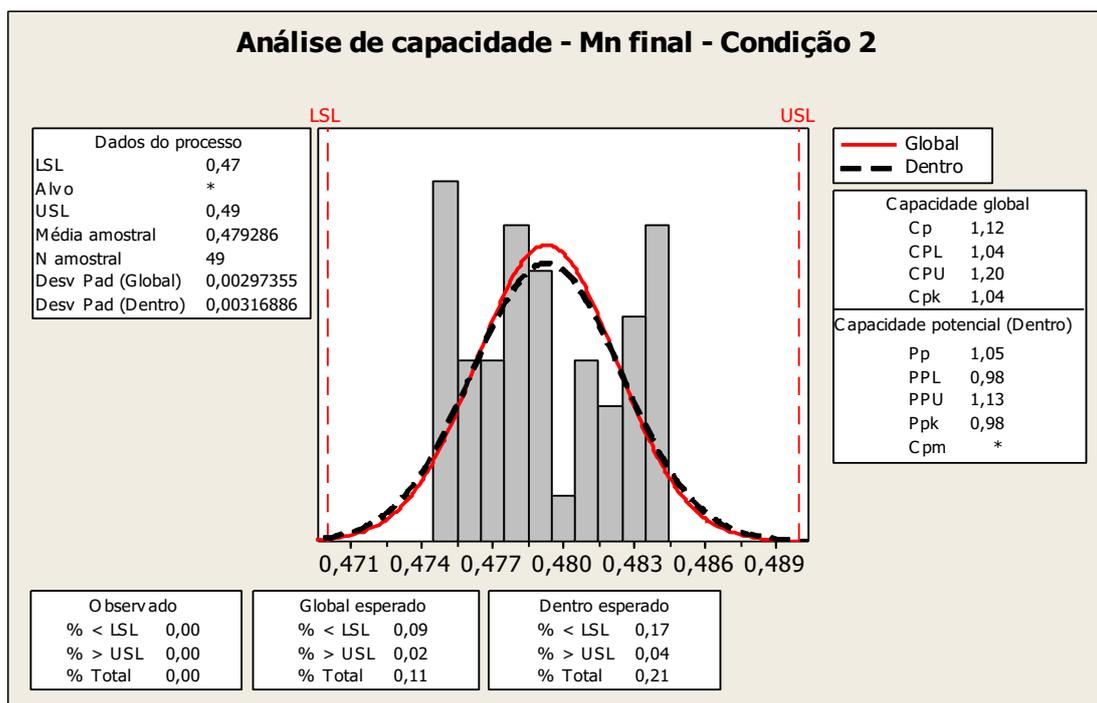


Figura 26. Análise de capacidade do elemento manganês após deslocamento de média.

Fonte: autor

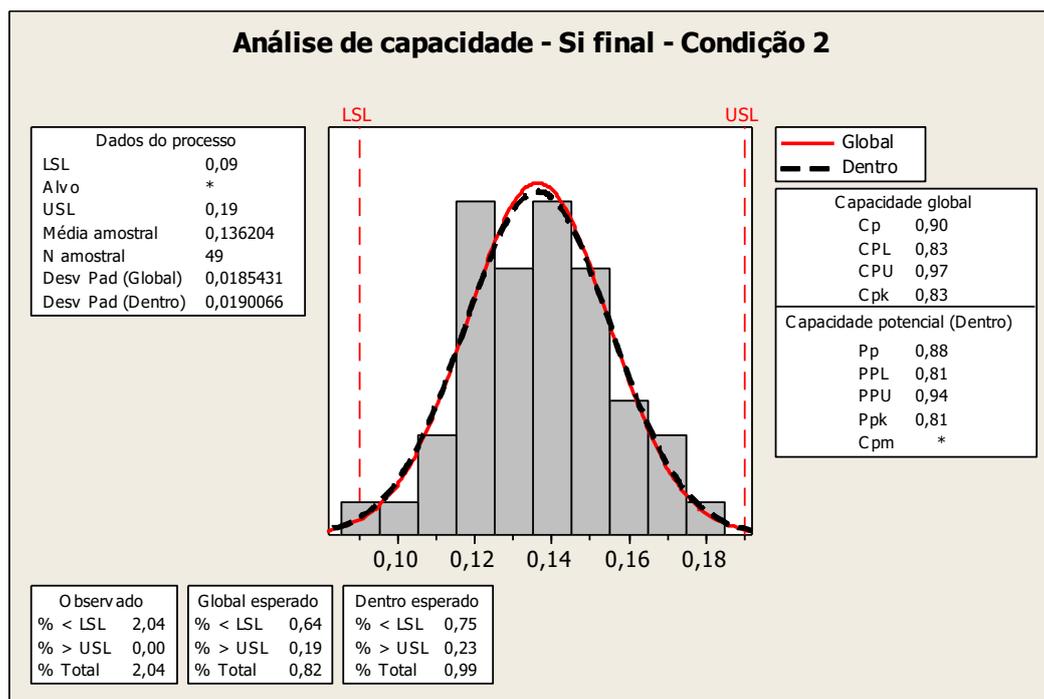


Figura 27. Análise de capacidade do elemento silício após deslocamento de média.

Fonte: autor

A **tabela 7** mostra, de forma sintetizada, os valores de composição final desses elementos antes e depois da realização do deslocamento de média, ou seja, a diferença entre as condições 1 e 2 expostas aqui no presente trabalho.

Tabela 7 – Comparação dos valores de C, Mn e Si nas condições 1e 2. Fonte: autor.

<i>ELEMENTO</i>	<i>Carbono (C)</i>	<i>Manganês (Mn)</i>	<i>Silício (Si)</i>
Concentração média (%) – Condição 1	0,18	0,51	0,14
Concentração média (%) – Condição 2	0,16	0,48	0,13

Vemos que a principal oportunidade detectada foi para o elemento manganês, uma redução de 3 pontos percentuais na faixa média de composição química final. Tais oportunidades vinham sendo detectadas desde a etapa de metodologia desse trabalho, pois nas análises de capacidade do manganês final (**Figura 14**), assim como nas análises de capacidade de adições da liga Fe-Si-Mn, observava-se Cpk menor que Cp.

5.2. Análise da redução do consumo de ferro-ligas após realização do deslocamento de média

Estando definidos os novos valores alvos para a composição final e sendo utilizado o balanço de massa para o cálculo de previsão das adições ideais para se atingir tais valores finais de composição, foi obtido uma redução significativa do uso das principais ferro-ligas utilizadas para ajuste de composição do aço estudado.

As **figuras 28, 29 e 30** mostram os novos valores de adições realizados após a realização do deslocamento de média nas faixas de composição final.

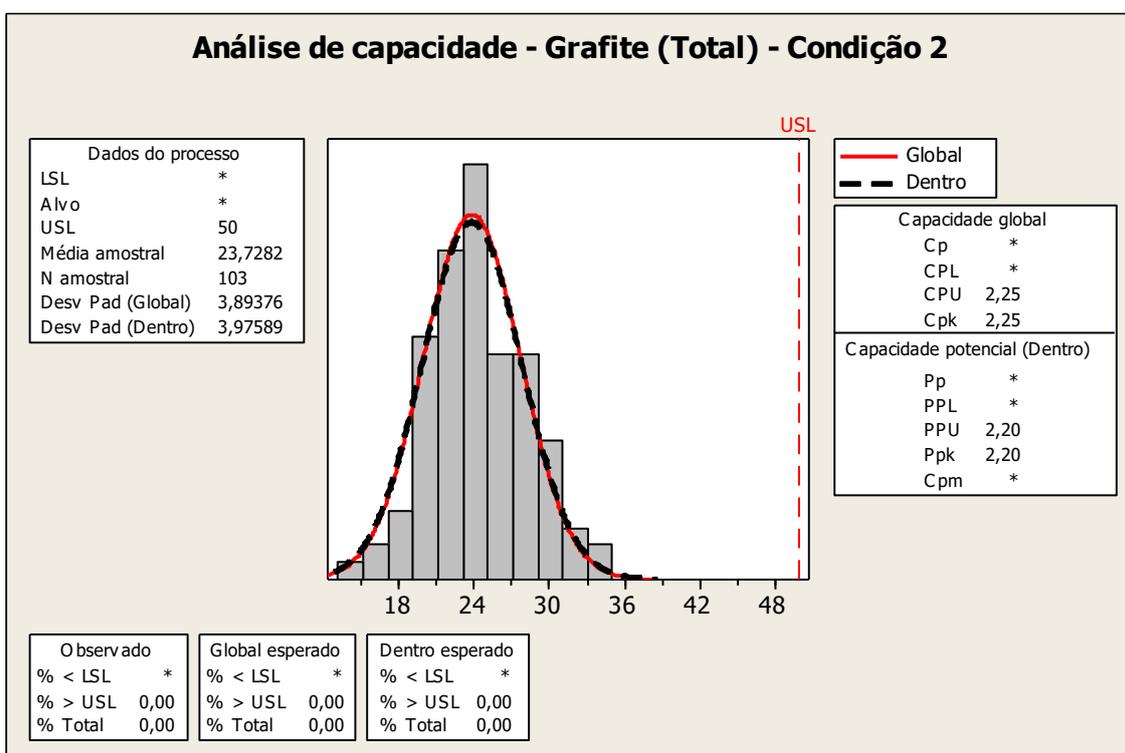


Figura 28. Análise de capacidade da utilização de grafite após realização de deslocamento de média para ajuste do elemento carbono. Fonte: autor

Verificamos que para o insumo grafite, ou seja, o principal responsável pelo ajuste do elemento carbono na composição final do aço, sua distribuição de dados global está bem próxima da sua distribuição potencial. Esse fato está de acordo com a inferência realizada no início da exposição dos resultados desse trabalho, em que foi assumida a hipótese de ganhos menores para esse elemento por já possuir uma distribuição assertiva, com isso sua distribuição foi otimizada com maior facilidade.

Observamos que, para o insumo Fe-Si 75 (**Figura 29**) mesmo após a implementação do balanço de massa para previsão ideal do valor das adições, sua

distribuição global ainda diverge de forma significativa da distribuição potencial. Essa ocorrência se dá pela instabilidade do elemento silício, que é impactado tanto pela liga Fe-Si-Mn que possui silício como impureza, assim como por possuir a maior afinidade pelo oxigênio dentre os principais elementos que compõem o aço aqui estudado.

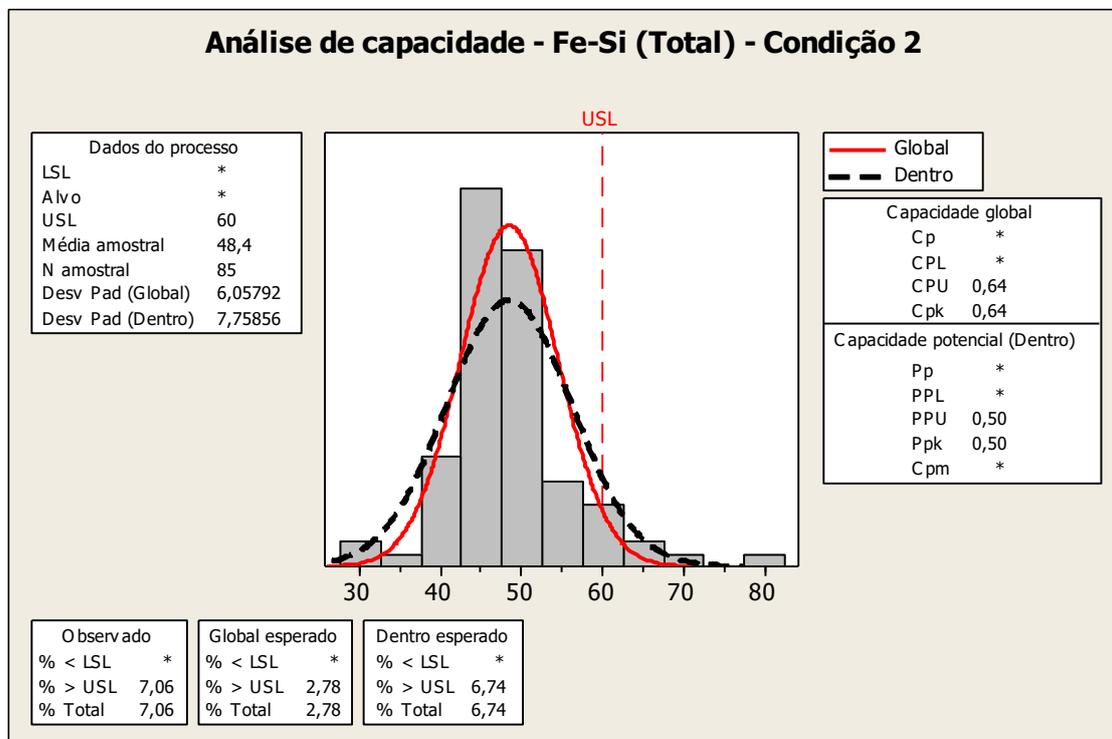


Figura 29. Análise de capacidade da utilização de Ferro-Silício após realização de deslocamento de média para ajuste do elemento silício. Fonte: autor

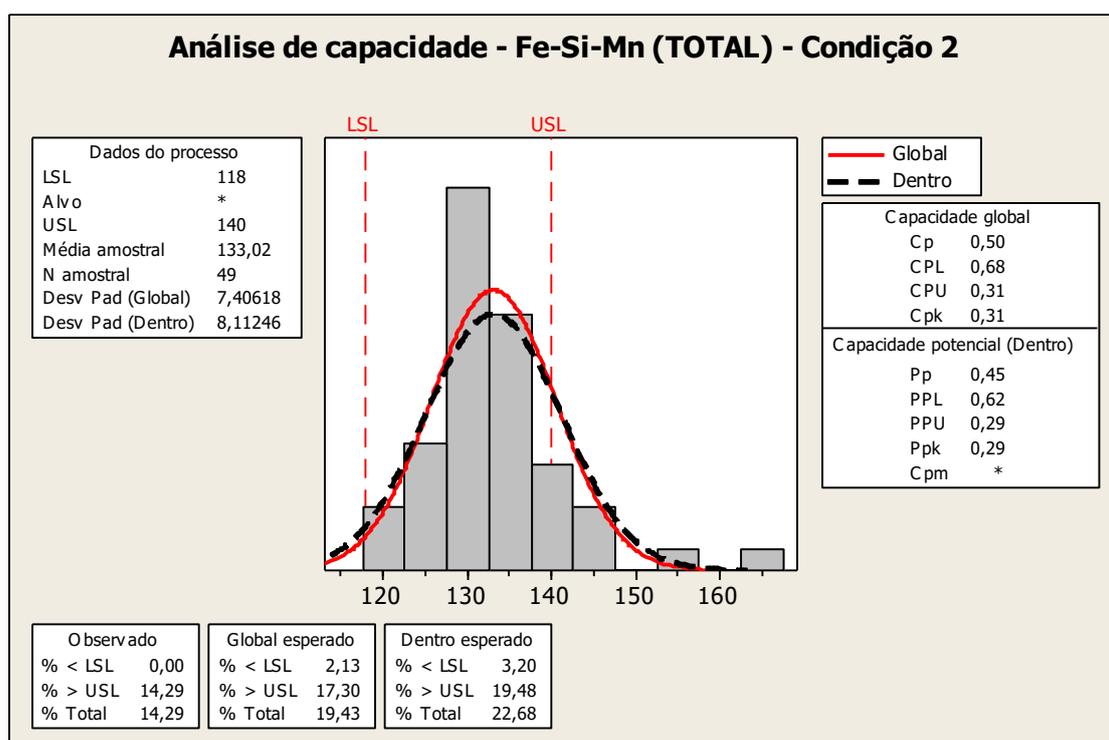


Figura 30. Análise de capacidade da utilização de Ferro-Silício-Manganês após realização de deslocamento de média para ajuste do elemento manganês. Fonte: autor

A **tabela 8** mostra, de forma sintetizada, a redução em valores absolutos do consumo médio das ferro-ligas Ferro-Silício-Manganês, Ferro-Silício 75 e do carburante Grafite, em que se observa uma redução significativa na liga Ferro-Silício-Manganês.

Tabela 8 – Comparação dos valores de adição dos principais insumos nas condições 1 e 2. Fonte: autor.

<i>Material</i>	<i>Fe-Si-Mn</i>	<i>Fe-Si 75</i>	<i>Grafite</i>
Adição média (Kg) – Condição 1	155	64	25
Adição média (Kg) – Condição 2	133	48	23

Verificou-se oportunidade de ganhos em todos os insumos estudados no presente trabalho, sendo o principal deles a redução do consumo de ferro-liga Ferro-Silício-Manganês, uma redução média de 22 Kg dessa liga.

5.3. Análise do atendimento as propriedades mecânicas após realização do deslocamento de média

Verificado e definido os novos valores alvos para a composição final, com a utilização do balanço de massa tendo reduzido em forma de ganho os valores das adições das principais ferro-ligas e carburantes para o aço SAE 1017, será analisado agora se tais mudanças impactaram de forma significativa ao atendimento das propriedades de limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento para vergalhões, tendo como base a NBR 7480.

As **figuras 31, 32 e 33** mostram os novos valores dessas propriedades após a realização do deslocamento de média e redução do valor das ferro-ligas Fe-Si-Mn e Fe-Si 75, assim como do carburante Grafite.

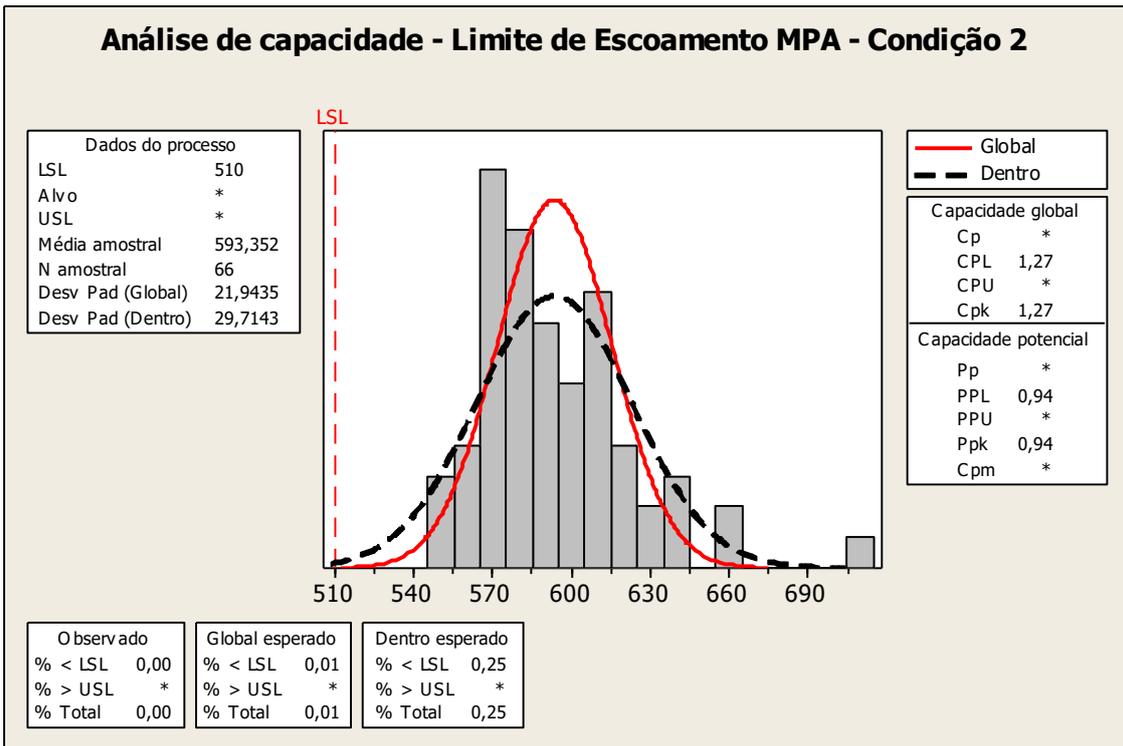


Figura 31. Análise de capacidade do limite de escoamento após deslocamento de média.
Fonte: autor

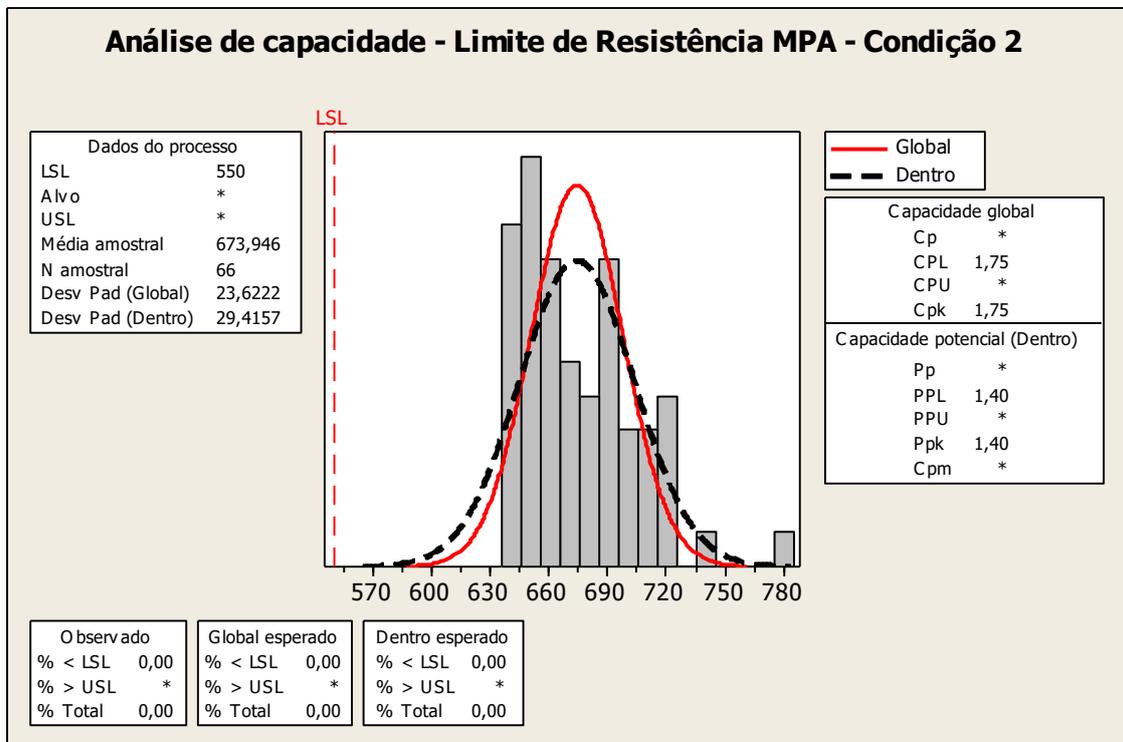


Figura 32. Análise de capacidade do limite de resistência a tração após deslocamento de média.
Fonte: autor

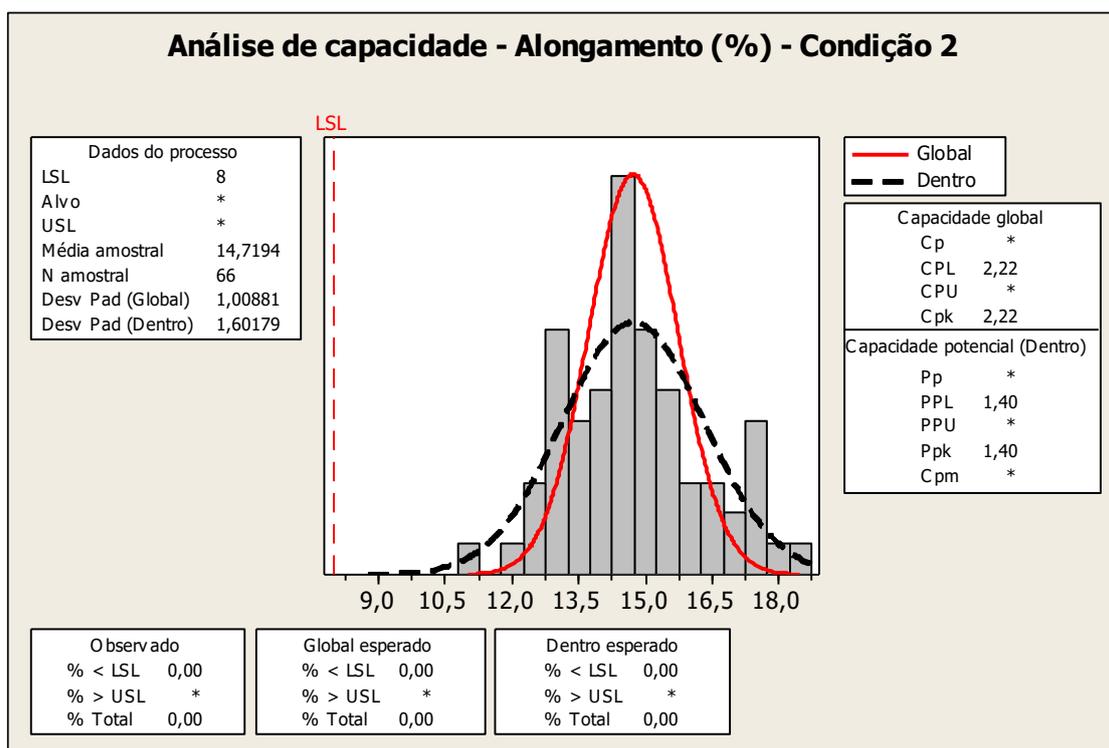


Figura 33. Análise de capacidade do alongamento após deslocamento de média.

Fonte: autor

Verificamos que, para todas as propriedades mecânicas analisadas e comparadas antes e após a realização do deslocamento de média, não houve grandes mudanças de comportamento dos dados.

A **tabela 9** mostra, de forma esquemática, uma comparação entre os valores da concentração dos dados em ambas as condições, ou seja, antes e após a realização do deslocamento de média da faixa de composição química final com a implementação do balanço de massa que fez reduzir todos os valores de adição dos principais insumos que influenciam diretamente nessas propriedades.

Tabela 9 – Comparação dos valores das principais propriedades mecânicas de vergalhões nas condições 1 e 2. Fonte: autor.

<i>Propriedade mecânica</i>	<i>Limite de escoamento (MPa)</i>	<i>Limite de resistência a tração (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>
Valores médios – Condição 1	605	687	15
Valores médios – Condição 2	593	673	14

Ao consultarmos a NBR 7480, o critério para a propriedade de limite de escoamento determina que o valor mínimo a ser atingido para um vergalhão CA 50 é de 500 MPa. Com isso, essa propriedade, após a realização do deslocamento de média, continua obedecendo à norma e à especificação do produto. Além disso, não deslocou de forma significativa o comportamento que o produto possuía anteriormente, visto que a diferença entre os valores da condição 1 e 2 é irrelevante.

Estendendo, de maneira análoga, a mesma análise para a propriedade de limite de resistência à tração, em que, de acordo com a NBR 7480, seu valor mínimo é de 660 Mpa, novamente vemos que, após a realização do deslocamento de média, o produto continua obedecendo a sua norma e a sua especificação.

Por último, para garantir todas as principais propriedades do produto estudado no presente trabalho, vemos que a propriedade de alongamento também é atendida e não sofre alteração relevante após realização do deslocamento de média, haja vista que o valor mínimo exigido pela NBR 7480 é de 5%.

6 CONCLUSÕES

Com a realização desse trabalho, foi possível retirar as seguintes conclusões à medida que se compara os resultados obtidos aos objetivos contratados:

Com relação ao levantamento de dados de composição química e propriedades mecânicas, podemos concluir que:

- Os dados que compõem o processo, em sua maioria, fogem de um comportamento normal. Foi possível evidenciar essa característica dos dados com a realização de testes de normalidade com resultados de P-Valor inferiores a 0,05.
- Confirmou-se que existiam oportunidades de melhoria, visto que a concentração dos dados de composição final estava distante do limite inferior da faixa de composição, exigida pela NBR NM 87.

Com relação à implementação do balanço de massa, via planilha eletrônica com extensão SOLVER para previsão de adições, podemos concluir que:

- A formulação proposta adequou-se bem à realidade do processo estudado e serviu como uma ferramenta de previsão e otimização da quantidade de ferro-ligas e carburantes adicionados para obtenção de uma composição definida.
- Viabilizou a execução do deslocamento de média pretendido na faixa de composição química final, visto que direcionou de maneira assertiva os valores de adição de ferro-ligas e carburantes.

Com relação à redução da utilização de ferro-ligas e carburantes com a otimização do valor ideal, realizando um deslocamento de média, podemos concluir que:

- O objetivo foi atingido, pois realizou-se uma redução em todos os insumos utilizados, sendo a redução mais significativa a de ferro-liga Ferro-Silício-Manganês (Economia de 22 Kg/adiação).
- Verificou-se que o insumo com maior assertividade no processo antes da realização do deslocamento de média era o grafite, tendo o menor ganho dentre os outros insumos após a realização do deslocamento de média.

Com relação à realização de análises estatísticas, verificando o comportamento dos dados antes e após a execução do deslocamento de média, podemos concluir que:

- Tanto para os dados de composição quanto para os dados de propriedades mecânicas, as análises mostraram as possíveis oportunidades de melhoria e evidenciaram os resultados obtidos pela implementação do balanço de massa e realização do deslocamento de média.
- Mostrou que a principal ferro-liga com oportunidade de redução no seu consumo foi a Ferro-Silício-Manganês, assim como que o principal elemento a sofrer deslocamento de média, era o manganês.
- Evidenciou-se que a liga Ferro-Silício 75, mesmo após a implementação do balanço de massa e realização do deslocamento de média, permaneceu com oportunidades de melhoria por ser fortemente impactada por causas especiais.

Com relação à verificação se a realização do deslocamento de média irá impactar ou não ao atendimento das principais propriedades mecânicas do produto estudado, concluímos que:

- Evidenciou-se que a realização do deslocamento de média não interferiu no atendimento em nenhuma das principais propriedades mecânicas exigidas pela NBR 7480:2007.
- Verificou-se que, além de não interferir no atendimento as principais propriedades exigidas por norma, a diferença entre os valores antes e após a realização do deslocamento de média foi irrelevante, ou seja, não houve mudança de cenário.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros podem ser realizados a partir das análises feitas no atual trabalho, com isso serão sugeridas algumas ideias para complemento desse trabalho ou elaboração de novos. As sugestões são:

- Verificar a utilização de ferro-ligas alternativas com custo de fabricação inferior, granulometria e diferentes valores de composição que atendam aos ajustes de composição química exigidos;
- Verificar a utilização de alumínio como desoxidante ao invés de silício, analisando a viabilidade econômica e possíveis impactos para o processo;
- Elaborar uma rede neural artificial para prever os valores de composição final do aço a partir dos principais índices de controle do FEA, Forno-Panela e Lingotamento contínuo.
- Elaborar uma rede neural artificial para previsão dos valores de propriedades mecânicas de vergalhões contemplando adições ideais de ferro-ligas e tratamentos térmicos, como o thermex.

8 REFERÊNCIAS

1. **Cândido, M.R.** Aplicação da transformada Wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco. Apêndice A: Fornos a arco Posição Brasil. Tese de Doutorado Escola Politécnica, 2008.
2. **Toulouevski, Yuri N. e Zinurov, Ilyaz Y.** Innovation in Electric Arc. Canada: springer, 2010.
3. **Figueira, Renato Minelli.** ACI – 504 Operação do FEA. Belo Horizonte: GERDAU MODULOS DE ACIARIA, 2007.
4. **Rizzo, E. M.S.** Introdução aos processos de refino primário dos aços nos fornos elétricos a arco. São Paulo - Brasil: ABM, 2006.
5. **Celiberto, André M.** AC – 535 Adições na panela. Belo Horizonte: GERDAU MODULOS DE ACIARIA, 2007.
6. **Rizzo, E.M.S.** Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços. São Paulo - Brasil: ABM, 2006.
7. **HAIR, J, F., Jr. ANDERSON, R, E., TATHAM, R, L., BLACK W, C.** Multivariate Data Analysis - with readings (fourth edition). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1995. 745 pp.
8. **MORELLATO, S. A.** Modelos de regressão PLS com erros heteroscedásticos, São Carlos. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Carlos, 2010.
9. **RIBEIRO, D. B.;** et. alii, Apostila de Refino Secundário dos Aços – Programa de Educação Continuada da ABM, Belo Horizonte, 2002.
10. **SOARES, J. R. C.** Controle da informação no registro de consumo de ferroligas durante a produção de aços especiais. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio grande do Sul, Departamento de Ciências administrativas. Porto Alegre, 2010.
11. **SCAL, M.** AC – 532 Processos do forno-panela. Belo Horizonte: GERDAU MODULOS DE ACIARIA, 2012.
12. **BOTELHO. T, MEDEIROS. G. E, CASTRO. J. A, COSTA E SILVA, A.L.V.** Estudo da taxa de desoxidação em aços desoxidados ao silício e manganês. In: Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos - ABM, 49. São Paulo, 02 a 04 de Outubro, 2018.
13. **Richardson, F. D., Jeffes, J. H. E.** Journal of Iron and Steel Institute, London, 1948.

14. AGUIAR, P. G. O. Balanço de Massa Integrado do Ferro Gusa entre Altos-Fornos e Aciaria da Aperam South America. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

15. LONGEN, S. Processo automatizado de ajuste da composição química e adição de elementos de liga durante o processo de elaboração do aço fundido. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de tecnologia senai blumenau. Santa Catarina, 2010.

16. GELADI, K: Partial Least Squares Regression: A tutorial, *Analytica Chimica Acta*, No 185 (1986), pp. 1-17

17. Delgado-Aguilar, M. Solver, an Excel application to solve the difficulty in applying diferente univariate linear regression methods. Elsevier, 2018.

18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT ISO/TR 10017: Guia sobre técnicas estatísticas para ABNT NBR ISO 9001:2000. Rio de Janeiro, 2005.

19. LUZ, E. R. Predição de propriedades de gasolinas usando espectroscopia FTIR e regressão por mínimos quadrados parciais. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica (PUC) do Rio de Janeiro, Departamento de Química. Rio de Janeiro, 2003.

20. WORLD STEEL ASSOCIATION. Steel University. The University of Liverpool, 2004.

21. Nascimento, C.C. Modelamento do Rendimento Metálico Em Fornos Elétricos a Arco. Dissertação de Mestrado UFF, 2008.

22. NBR NM 87: Aço carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

23. NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

24. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

25. Shimadzu. [Online] [Citado em: 17 de 05 de 2019.]
<http://www.shimadzu.com.br/>