

Utilização da estatística como ferramenta de tomada de decisão em um estudo de viabilidade técnica do método de *post stirring* em usina siderúrgica

Use of statistics as a decision making tool in a technical feasibility study of the post stirring method in a steel plant

Uso de estadísticas como herramienta de toma de decisiones en un estudio de viabilidad técnica del método post stirring en una planta siderúrgica

Recebido: 01/05/2020 | Revisado: 04/05/2020 | Aceito: 14/05/2020 | Publicado: 23/05/2020

Rafaela Pacheco Malvão dos Santos

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6170-0965>

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ, Brasil

E-mail: rafaela.malvao@gmail.com

Paulo Rogério Camargo

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9757-5438>

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ, Brasil

E-mail: paulo@iconeleanconsulting.com.br

Antonio Henriques de Araujo Junior

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5167-3828>

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ, Brasil

E-mail: anthenriques2001@yahoo.com.br

José Glênio Medeiros de Barros

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6902-599X>

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ, Brasil

E-mail: glenio.barros@gmail.com

Nilo Antonio Souza Sampaio

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6168-785X>

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ, Brasil

E-mail: nilosamp@terra.com.br

José Wilson de Jesus Silva

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0033-2270>

Resumo

O objetivo desse estudo é demonstrar a importância da utilização de ferramentas da qualidade em uma siderúrgica de grande porte. Neste trabalho, é demonstrado o uso de ferramentas estatísticas para apoiar a decisão sobre a utilização do método *Post Stirring*. Este método permite a melhoria da qualidade do aço, com menor custo. Os resultados da aplicação do processo foram comparados com os resultados antes da sua aplicação. Foram empregadas as ferramentas *boxplot*, histograma, teste de hipóteses e regressão linear. Os resultados obtidos a partir da análise das informações coletadas pelos métodos estatísticos foram a base para a tomada de decisão. Os resultados mostraram que a técnica de *Post Stirring* traz uma redução no teor de fósforo e na quantidade de oxigênio dissolvido no aço, promovendo uma grande oportunidade de redução de custo com a redução do consumo de materiais desoxidantes. Além disso, promove significativa melhora da limpidez do aço, trazendo benefícios ao produto final.

Palavras-chave: Post stirring; Siderúrgica; Estatística; Ferramentas da qualidade.

Abstract

The purpose of this study is to demonstrate the importance of using quality tools in a large steel company. In this work, the use of statistical tools to support the decision on the use of the Post Stirring method is demonstrated. This method allows the steel quality improvement with less cost. Results of process application were compared with results before its application. The boxplot, histogram, hypothesis test and linear regression tools were used. Results obtained from analysis of information collected by statistical methods were the basis for decision making. Results showed that the Post Stirring technique brings a reduction in phosphorus content and in the amount of oxygen dissolved in steel, providing a great opportunity to reduce costs by reducing consumption of deoxidizing materials. In addition, it promotes a significant improvement in the steel's clarity, bringing benefits to the final product.

Keywords: Post stirring; Steel; Statistic; Quality tools.

Resumen

El propósito de este estudio es demostrar la importancia del uso de herramientas de calidad en una gran empresa siderúrgica. En este trabajo, se demuestra el uso de herramientas estadísticas para apoyar la decisión sobre el uso del método Post Stirring. Este método permite mejorar la calidad del acero, con menor costo. Los resultados de la aplicación del proceso se compararon con los resultados antes de su aplicación. Se utilizaron las herramientas de diagrama de caja, histograma, prueba de hipótesis y regresión lineal. Los resultados obtenidos del análisis de la información recopilada por los métodos estadísticos fueron la base para la toma de decisiones. Los resultados mostraron que la técnica de Post-Agitación trae una reducción en el contenido de fósforo y en la cantidad de oxígeno disuelto en el acero, proporcionando una gran oportunidad para reducir costos al reducir el consumo de materiales desoxidantes. Además, promueve una mejora significativa en la claridad del acero, aportando beneficios al producto final.

Palabras clave: Post stirring; Acero; Estadísticas; Herramientas de calidad.

1. Introdução

Usinas siderúrgicas integradas fabricam o aço por meio do sopro de oxigênio sob a mistura de ferro-gusa e sucata (carga metálica) em um reator, conhecido como conversor LD. Neste processo, a carga metálica é fundida e, devido ao sopro de oxigênio, ocorre a oxidação dos elementos presentes na carga, como silício, carbono, manganês e fósforo e formando, assim, o aço líquido e a escória (sub-produto). Este processo dura em torno de 18 minutos.

Atualmente, algumas usinas no Brasil e no mundo estão usando as práticas do *Post Stirring*, objetivando garantir a qualidade e redução de custos do processo de fabricação do aço. A técnica de *Post Stirring* consiste em aumentar a agitação do banho após o sopro de oxigênio e, assim, melhorar a cinética das reações. Esta agitação ocorre basicamente com a injeção de argônio após o fim de sopro de oxigênio, utilizando-se ventaneiras localizadas no fundo do conversor.

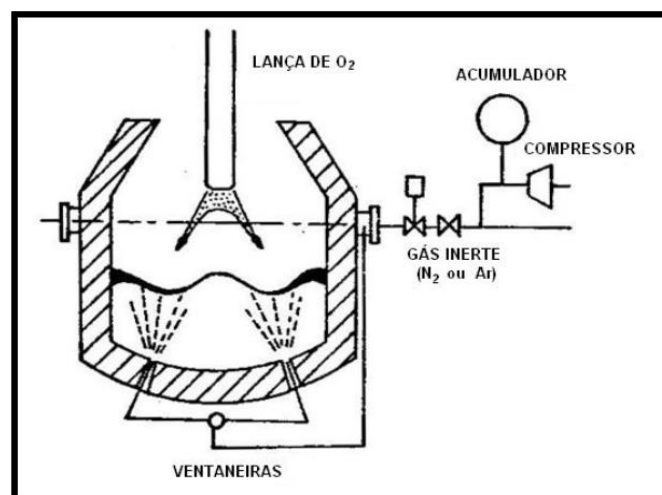
O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade técnica do *Post Stirring* no final do sopro no conversor LD de uma determinada siderúrgica, identificando as principais vantagens e desvantagens referentes ao processo. Para isto, são utilizadas as ferramentas da qualidade e estatística.

O estudo abordou todas as variáveis influenciadas pela prática do *Post Stirring*. Assim, as seguintes variáveis foram consideradas: consumo de alumínio e ferro ligas, rendimento metálico, teores de fósforo, manganês, carbono e oxigênio dissolvidos no aço ao final do sopro, variação de temperatura e teor de FeO na escória. Os dados obtidos a partir dos testes, com e sem o uso do *Post Stirring*, são comparados para avaliar a viabilidade técnica para a inclusão desta etapa no processo de fabricação do aço líquido.

2. Revisão Bibliográfica

Nos conversores LD, o movimento do banho metálico se dá através da energia de impacto do sopro de oxigênio pelo topo, juntamente com a energia da dissipação de bolhas de oxigênio através das ventaneiras localizadas no fundo do reator (Rose e Becker, 1994). Em determinadas regiões do conversor chamadas de “zonas mortas”, o misturamento do banho é difícil, sendo assim, a cinética é uma variável extremamente importante para ocorrer uma intensa agitação, afim de, facilitar a formação de CO (monóxido de carbono). A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do processo de sopro combinado em conversor LD.

Figura 1 – Conversor LD com sopro de gás inerte pelo fundo.



Fonte: Autores.

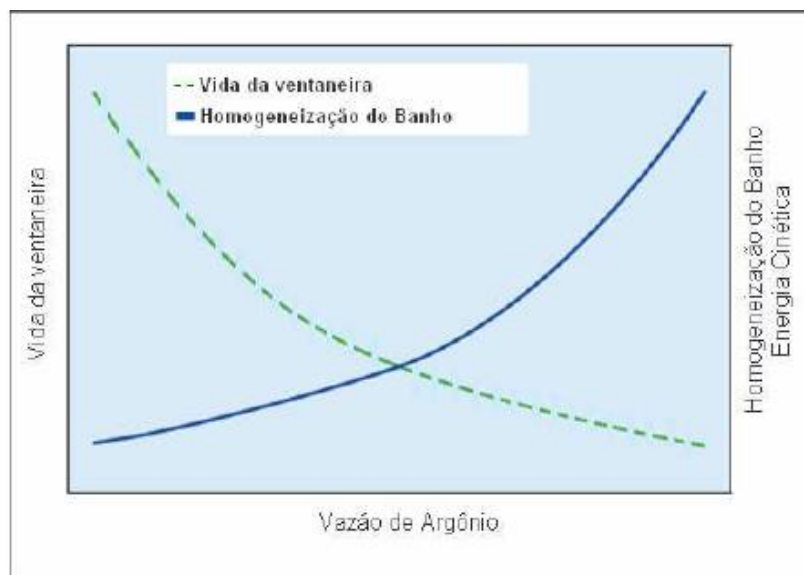
Quanto maior a agitação do banho no interior do reator ocorre uma redução expressiva de oxigênio dissolvido no aço, sendo assim, menor será a quantidade de alumínio que irá

utilizar para desoxidação no refino secundário, conseqüentemente menos alumina formada, portanto um aço mais limpo (Bruckhaus & Lachmund, 2007).

A partir deste sopro pelo fundo no conversor, pode ser desenvolvida a técnica de *Post Stirring* para fabricação de aços. Para este processo, existem vantagens e desvantagens e a decisão de implementá-lo é bastante difícil uma vez que existem diversas variáveis que devem ser analisadas.

O aumento da vazão específica do sopro pelo fundo do conversor aumenta a homogeneização do banho, melhorando a cinética das reações e os resultados operacionais de final de sopro. Porém, isto impacta negativamente, desgastando o refratário da ventaneira. Sendo assim, é preciso encontrar o equilíbrio entre desgaste e eficiência do sopro combinado, o que não é realizado de maneira linear (Ricci et al. 2008), como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Efeito da injeção do argônio pelas ventaneiras:



Fonte: Autores.

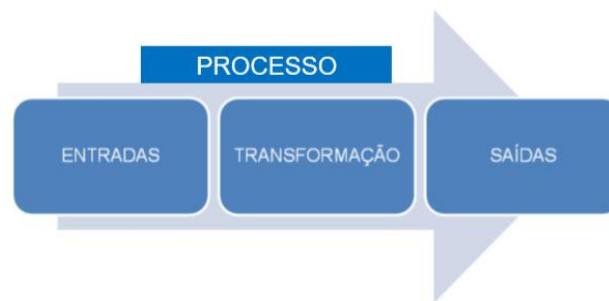
A prática de *Post Stirring* deve ser utilizada de forma controlada, ou seja, apenas quando os méritos (desvio ou resopro por fósforo ou carbono, redução do oxigênio dissolvido) possam ser muito maiores do que os deméritos (desgaste das ventaneiras e fechamento do sopro combinado ou parada do conversor para *relining*).

Em um processo robusto como a produção do aço, a tomada de decisão da alteração de um fluxo produtivo é muito arriscada, pois existem inúmeras variáveis de elevada complexidade.

Sendo assim, as ferramentas de qualidade e a estatística são bases fundamentais para promover uma modificação de processo de forma analítica e assertiva e, por consequência, gerando ganhos financeiros.

Um processo pode ser definido como um conjunto de entradas (insumos ou input), que resultarão em um produto final (saídas ou output), como ilustra a Figura 3 seguinte.

Figura 3 – Definição de processo.



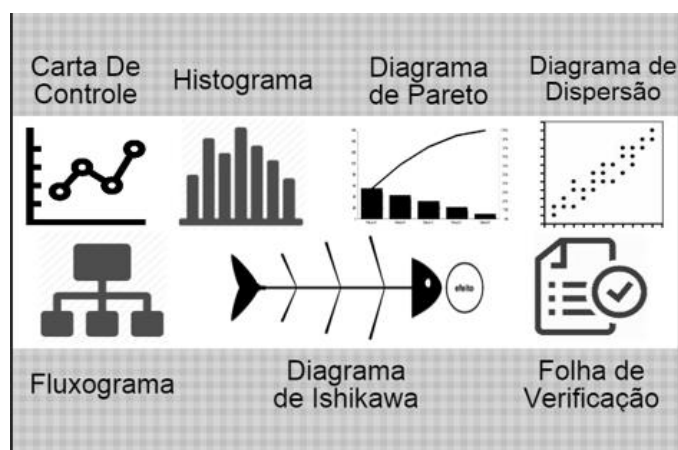
Fonte: Autores.

O processo é um conjunto de causas que provoca um ou mais efeitos. Estes efeitos podem ser positivos ou negativos, porém, a combinação deles promove a melhoria da qualidade, seja ela no processo, produto ou serviços (Dias, 2016).

Uma boa definição de qualidade de um produto ou serviço seria “o que atende perfeitamente, de forma confiável, de forma acessível, de forma segura e no tempo certo às necessidades do cliente” (Campos, 2004).

Marshall et al. (2006) citam o japonês Kaoru Ishikawa como o pai do controle da qualidade total (TQC), o qual conseguiu transformar o método de TQC americano num método com filosofia japonesa. Kaoru Ishikawa foi o responsável por adaptar a cultura japonesa aos ensinamentos de Deming e Juran e complementam que o japonês é o criador das sete ferramentas da qualidade, sendo elas: Gráfico de Pareto, Diagrama de Ishikawa (6M's), Histogramas, Folha de Verificação, Fluxograma, Gráfico de Controle Estatístico do processo (CEP) e Gráfico de Dispersão. Estas ferramentas (Figura 4) formam um conjunto de metodologias e foi difundida como forma de melhorar os serviços e processo das empresas.

Figura 4 – As sete ferramentas da qualidade criadas por Kaoru Ishikawa.



Fonte: Autores.

Corrêa & Corrêa (2006) enfatizam que as sete ferramentas da qualidade, por si só, não resolvem problemas e nem melhoram processos, mas apoiam e auxiliam na tomada de decisões.

O controle de processo foi o fundamento para o desenvolvimento das técnicas de controle estatístico da qualidade. O uso das ferramentas estatísticas, no monitoramento das características de qualidade nos processos produtivos, torna-se necessário para detectar, identificar e analisar quais são os fatores responsáveis pela variabilidade que afeta de maneira imprevisível o processo (Alves, 2003).

O presente trabalho utiliza a estatística como base para o desenvolvimento do estudo de caso, compreendendo as ferramentas de *boxplot*, histograma, teste de hipóteses e regressão linear. Os resultados mostram de que forma a estatística pode auxiliar na tomada de decisão de gestores durante o processo de produção de aço em uma siderúrgica.

3. Metodologia

Uma pesquisa é realizada para se buscar novos saberes para a sociedade como afirmam Pereira et al. (2018) e para que ela tenha aceitação e validação pela comunidade acadêmica e científica torna-se necessário que siga alguma metodologia que permita a reprodutibilidade dos experimentos. O presente estudo trata-se de uma pesquisa experimental em campo, de natureza quantitativa. Foram feitos testes em 102 corridas de aço líquido, nas quais foram coletadas amostras de aço e de escória antes e após o teste de *Post Stirring*. O teste consiste em realizar o *Post Stirring* de 1 minuto, isto é, borbulhar gás inerte (argônio)

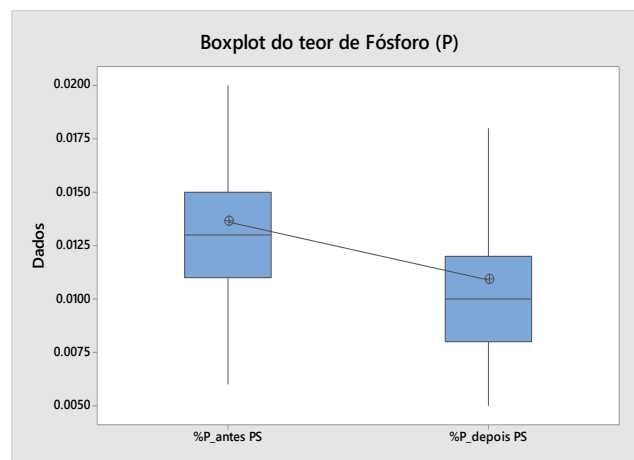
durante 1 min após o sopro de oxigênio. Durante este tempo, a vazão de argônio das ventaneiras no fundo do conversor é aumentada de 2,3 para 20 Nm³/min. Nas amostras de aço, foram analisados os teores de fósforo, carbono e manganês. Nas amostras de escória, foi analisado o teor de ferro na forma de FeO. Em cada corrida, foram medidas a temperatura e a quantidade de oxigênio dissolvido no aço, através de um sensor tipo Celox. Os dados foram analisados e tratados por meio do software estatístico Minitab 18.

4. Resultados e Discussão

Nas amostras de aço líquido, foram analisados 3 elementos: fósforo (P), carbono (C) e Manganês (Mn). Os resultados são apresentados em % em massa.

Houve uma redução do teor de fósforo no aço após o teste de *Post Stirring*, conforme apresentado no boxplot abaixo (Figura 5).

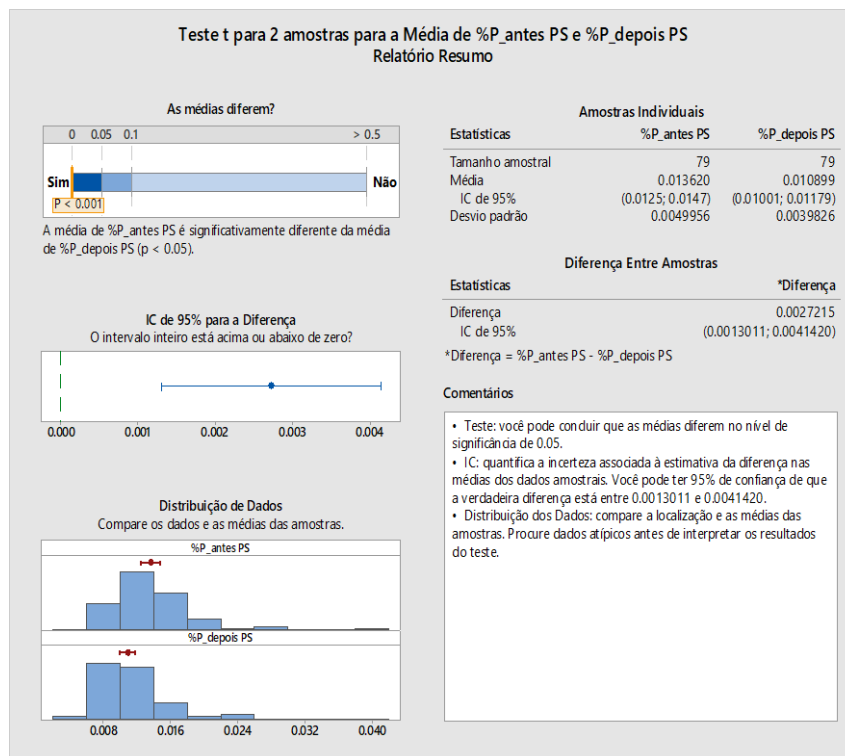
Figura 5 – Boxplot do teor de fósforo antes e depois dos testes de *Post Stirring*.



Fonte: Autores.

Foi realizado um teste de hipóteses para o teor de fósforo (Figura 6) e a análise mostrou que existe uma diferença estatística das amostras antes e depois do teste de *Post Stirring*, com um nível de significância de 95%. Para as amostras de fósforo antes do *Post Stirring* (fim de sopro), o teor de fósforo médio foi de 0,014% com um desvio padrão de $\pm 0,005\%$. Já para as amostras de fósforo após o *Post Stirring*, os teores foram 0,011% e $\pm 0,004\%$.

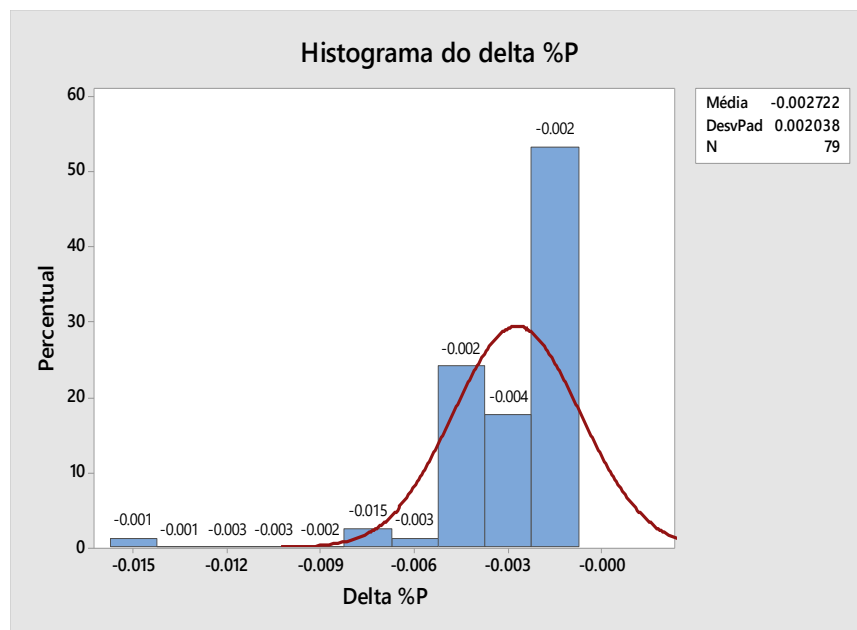
Figura 6 - Teste de hipótese para o teor de fósforo no aço.



Fonte: Autores.

Na Figura 7, é mostrado o histograma da variação do teor de fósforo (delta). O delta de fósforo é calculado pela diferença do teor de fósforo antes e após o *Post Stirring*. Pode ser visto que os valores são negativos, houve uma desfosforação durante o teste de borbulhamento de argônio (*Post Stirring*). A média da redução do teor de fósforo é de 0,003% com um desvio padrão de $\pm 0,002\%$. Através dos resultados, com o teste de *Post Stirring* por 1 minuto, é esperado uma redução média de 20% do teor de fósforo no aço.

Figura 7 – Histograma da variação do teor de fósforo no aço.



Fonte: Autores.

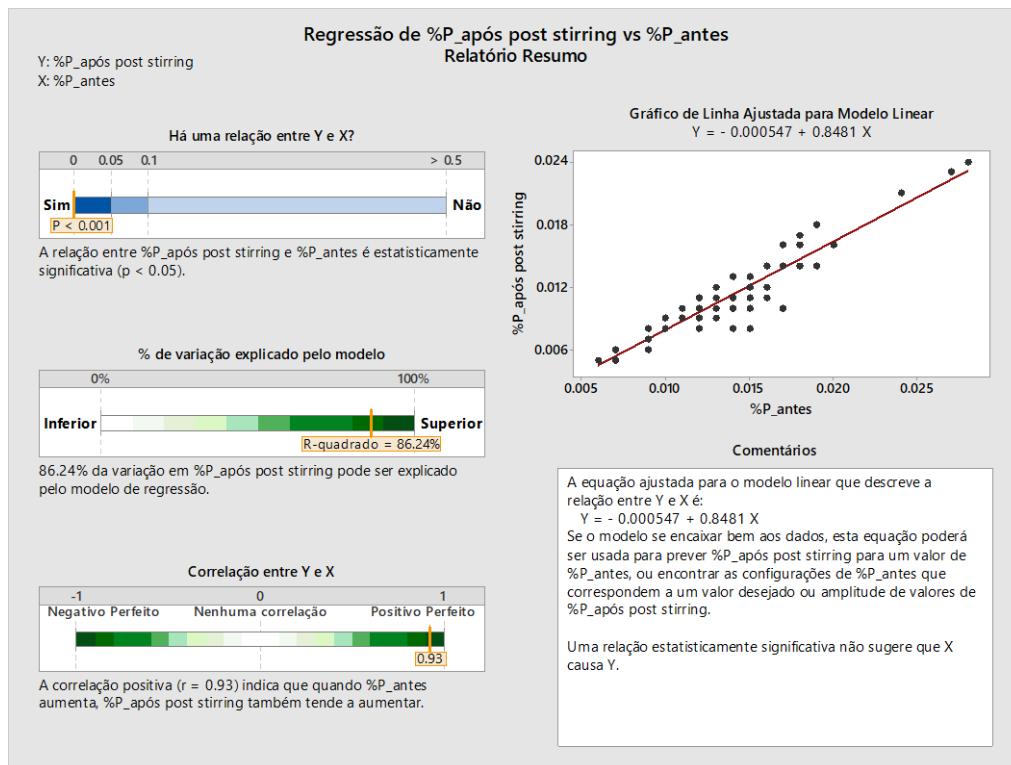
Na Figura 8, são encontrados os resultados da regressão de linear entre os teores de fósforo antes e após o teste de *Post Stirring*.

O coeficiente de determinação (R-quadrado) da equação 1 é de 86.2%, indicando que a linha de regressão se ajusta bem aos dados. O P value (valor da probabilidade) é menor que 0.001, indicando que existe uma correlação forte entre as variáveis X (teor de fósforo antes do teste) e Y (teor de fósforo após teste).

Sendo assim, o modelo linear obtido se adequa bem aos dados e fornece uma variável de predição confiável. Por meio da equação 1, pode ser decidido se existe a necessidade de ressoprar a corrida por fósforo, ou se somente com o *Post Stirring* o teor de fósforo alcança o resultado desejado para vazamento da corrida.

$$\%P_{\text{após } Post\ Stirring} = 0.8481 \%P_{\text{antes } Post\ Stirring} - 0.000547 \text{ (Eq 1)}$$

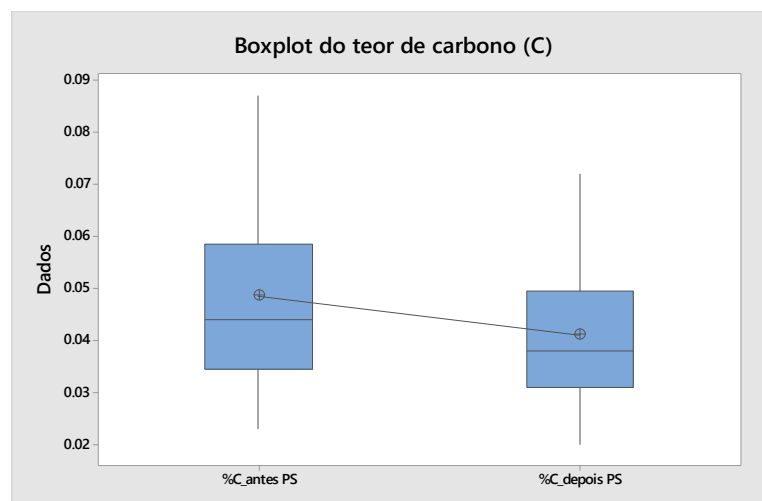
Figura 8 – Resultados da regressão linear para o teor de fósforo.



Fonte: Autores.

Os teores de carbono no aço antes e depois do *Post Stirring* são mostrados no *boxplot* abaixo (Figura 9). É possível observar que também houve uma redução no teor de carbono após o teste.

Figura 9 – Boxplot do teor de carbono antes e depois dos testes de *Post Stirring*.

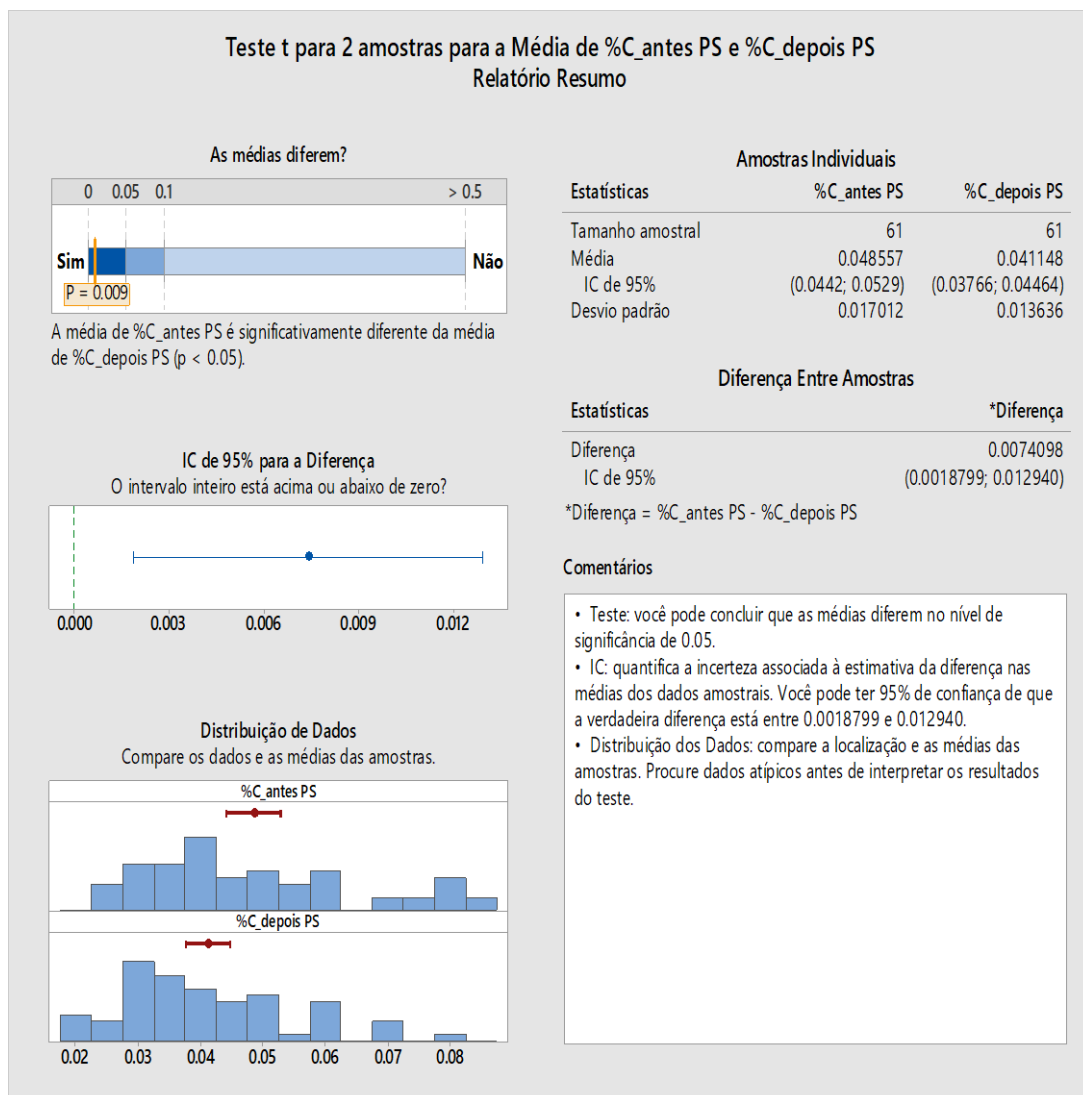


Fonte: Autores.

Foi realizado um teste de hipóteses para o teor de carbono (Figura 10) e a análise mostrou que existe uma diferença estatística do carbono no aço antes e depois do teste de *Post Stirring*, com um nível de significância de 95%.

Para as amostras de carbono antes do *Post Stirring* (fim de sopra), o teor de carbono médio foi de 0,049% com um desvio padrão de $\pm 0,017\%$. Já para as amostras de carbono após o *Post Stirring*, os teores foram 0,041% e $\pm 0,014\%$.

Figura 10 - Teste de hipótese para o teor de carbono no aço.



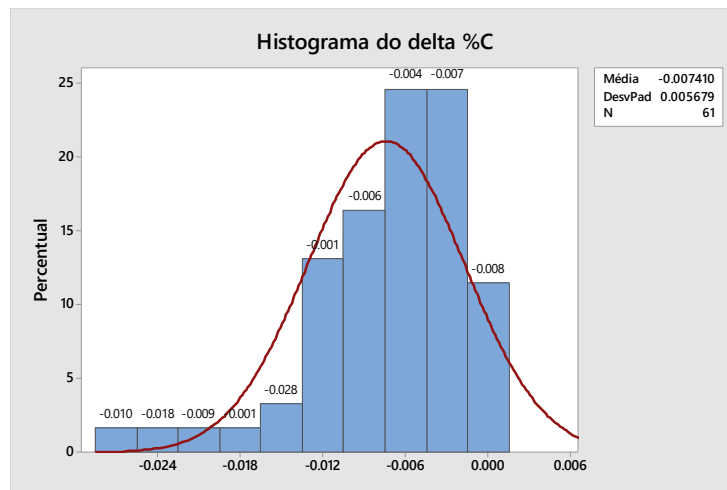
Comentários

- Teste: você pode concluir que as médias diferem no nível de significância de 0.05.
- IC: quantifica a incerteza associada à estimativa da diferença nas médias dos dados amostrais. Você pode ter 95% de confiança de que a verdadeira diferença está entre 0.0018799 e 0.012940.
- Distribuição dos Dados: compare a localização e as médias das amostras. Procure dados atípicos antes de interpretar os resultados do teste.

Fonte: Autores.

Na Figura 11, é mostrado o histograma da variação do teor de carbono (delta). O delta de carbono é calculado pela diferença do teor de carbono antes e após o *Post Stirring*. A redução do teor de carbono apresentou média e desvio padrão de 0,007 e $\pm 0,006\%$.

Figura 11 – Histograma da variação do teor carbono no aço.



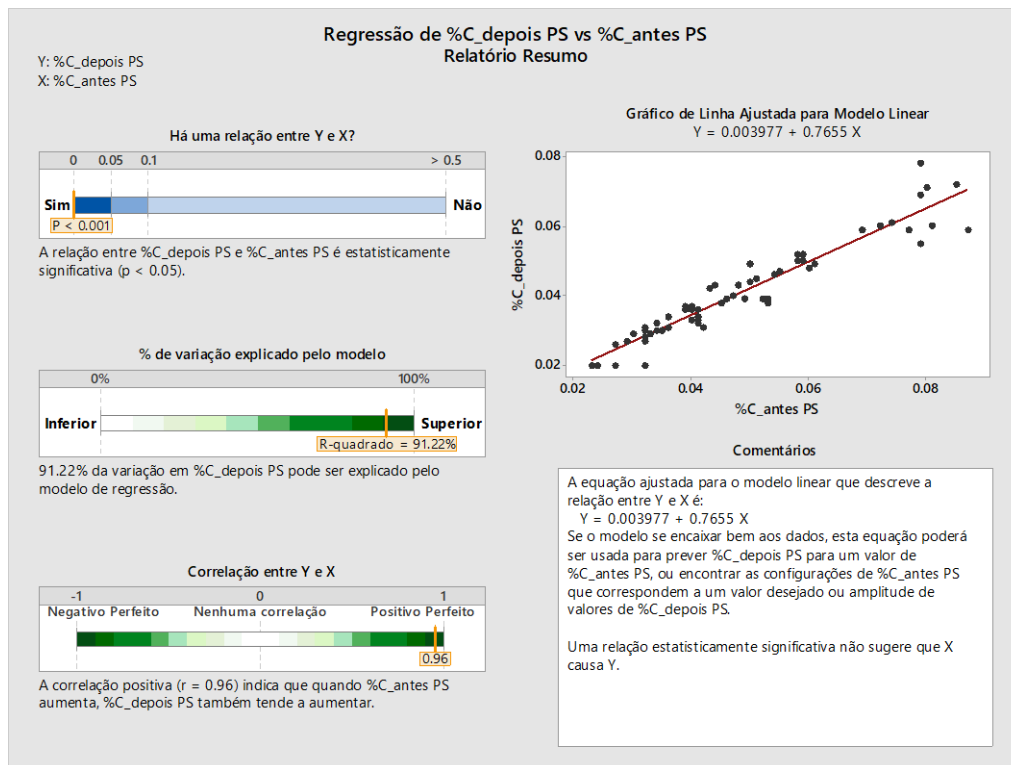
Fonte: Autores.

A Figura 12 mostra os resultados da regressão de linear entre os teores de carbono antes e após o teste de *Post Stirring*.

O coeficiente de determinação (R-quadrado) da equação 2 é de 91,2%, indicando que a linha de regressão se ajusta bem aos dados. O P value é menor que 0,001, indicando que existe uma correlação forte entre as variáveis X (teor de carbono antes do teste) e Y (teor de carbono após teste). Sendo assim, o modelo linear (equação 2) obtido se adequa bem aos dados e fornece uma variável de predição confiável.

$$\%C_{\text{após } Post\ Stirring} = 0.7655 * \%C_{\text{antes } Post\ Stirring} + 0.003977 \text{ (Eq 2)}$$

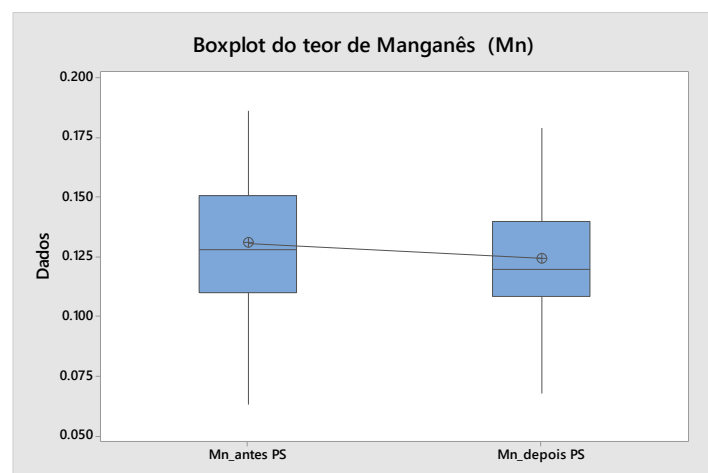
Figura 12 - Resultados da regressão linear para o teor de carbono.



Fonte: Autores.

Os teores de Mn no aço antes e depois do *Post Stirring* são mostradas no boxplot na Figura 13. O teor de Mn antes do *Post Stirring* varia de 0,06 a 0,26%, já os testes feitos após o *Post Stirring* os valores variam de 0,07 a 0,24%.

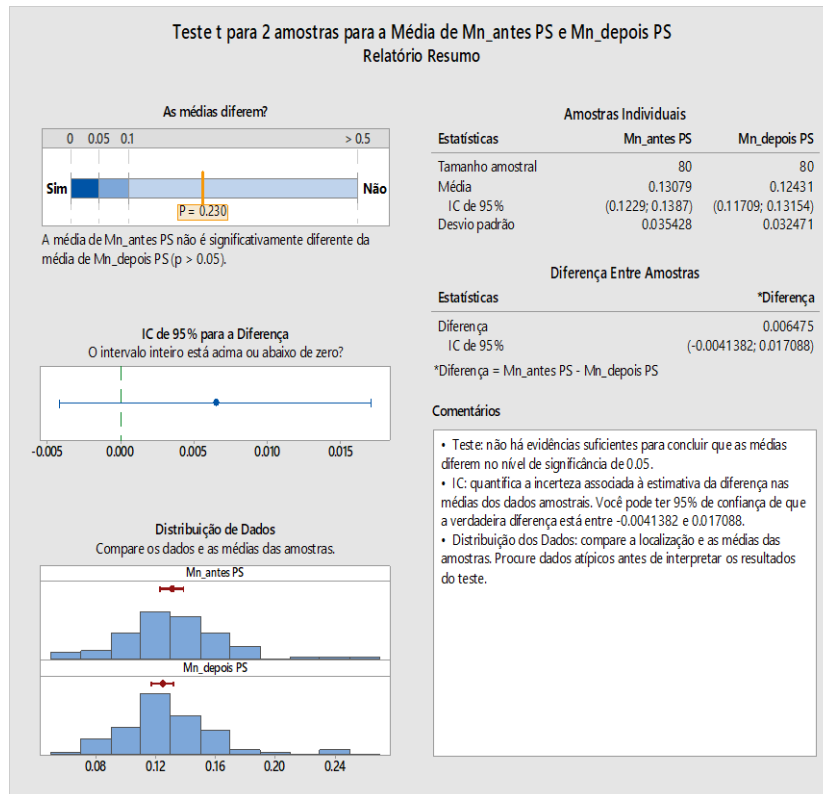
Figura 13 – Boxplot do teor de Mn antes e depois dos testes de *Post Stirring*.



Fonte: Autores.

A análise de hipóteses da Figura 14 mostrou que não existe uma diferença estatística do Mn no aço antes e depois do teste de *Post Stirring*, com um nível de significância de 95%. Para as amostras de Mn antes do *Post Stirring* (fim de sopra), o teor de Mn médio foi de 0,13% com um desvio padrão de $\pm 0,03\%$. Já para as amostras de Mn após o *Post Stirring*, os teores foram 0,12% e $\pm 0,03\%$.

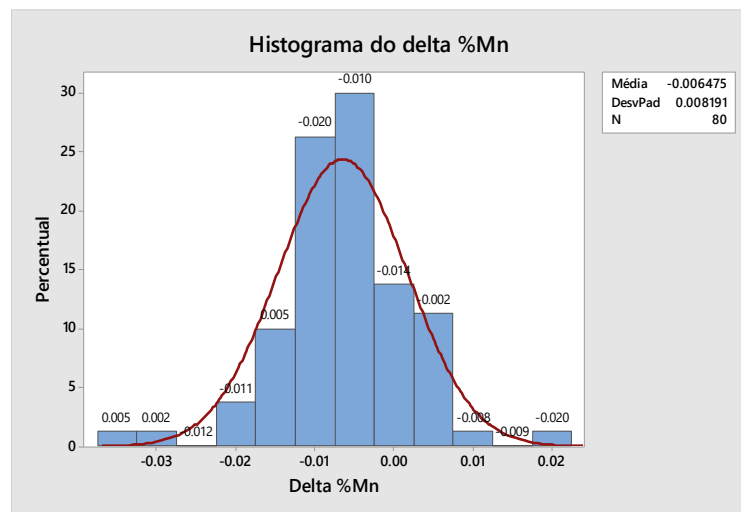
Figura 14 - Teste de hipótese para o teor de Mn no aço.



Fonte: Autores.

Na Figura 15, é mostrado o histograma da variação do teor de Mn no aço (delta). O delta de Mn é calculado pela diferença do teor de Mn antes e após o *Post Stirring*. Houve uma diminuição do teor de Mn no aço, apresentou média e desvio padrão de 0,006 e 0,008%.

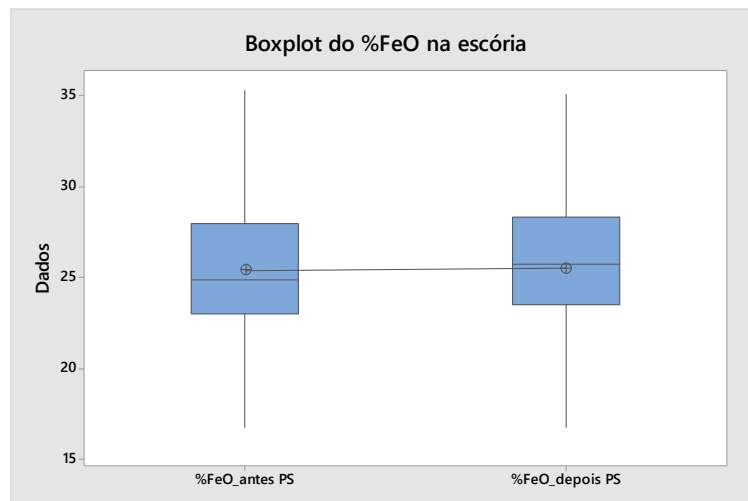
Figura 15 – Histograma da variação do teor de Mn no aço.



Fonte: Autores.

Nas amostras de escória, foi analisado o teor de ferro na forma de FeO. Os teores de FeO na escória antes e depois do *Post Stiring* são mostrados no boxplot abaixo (Figura 16). O teor de FeO antes do *Post Stiring* varia de 17 a 35%, já nos testes feitos após o *Post Stiring*, os valores variam de 15 a 37%.

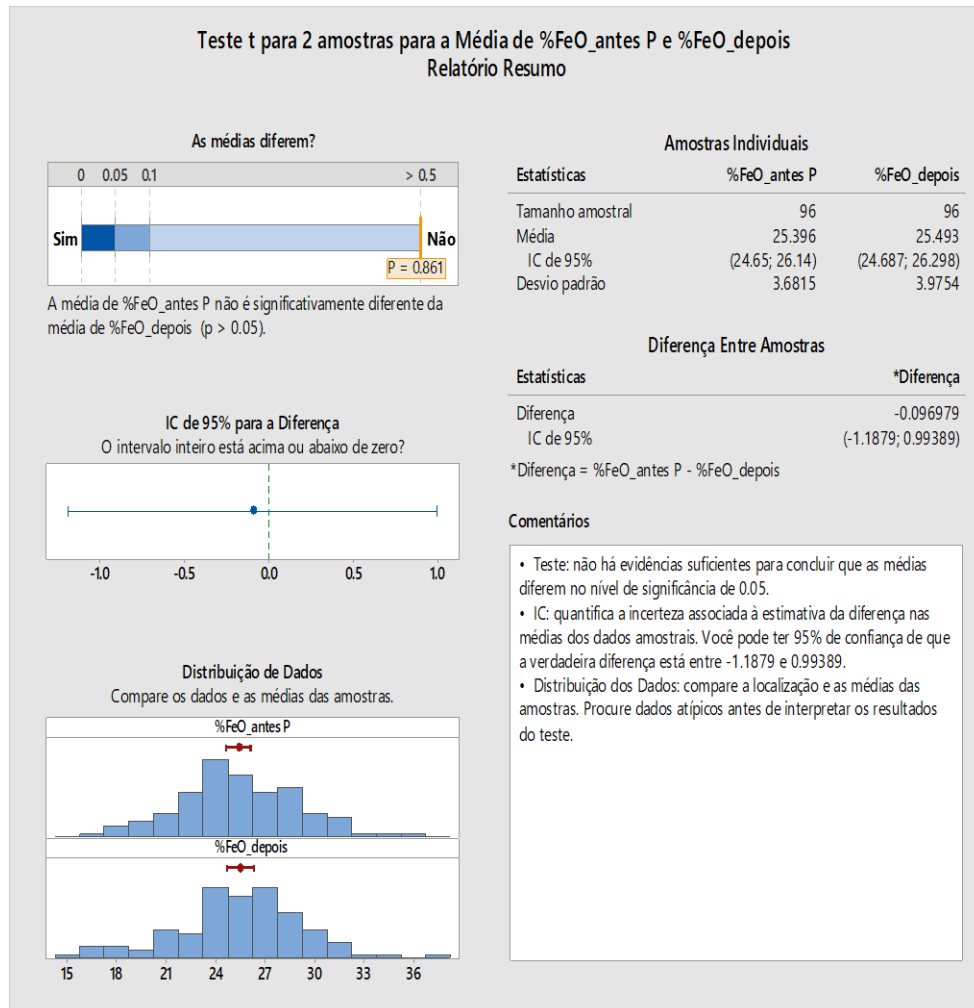
Figura 16 – Boxplot do teor de FeO antes e depois dos testes de *Post Stiring*.



Fonte: Autores.

A análise de hipóteses na Figura 17 mostrou que não há evidências suficientes para concluir que as médias do %FeO da escória antes e depois do teste de *Post Stirring* diferem no nível de significância de 0,05. Para as amostras de FeO antes do *Post Stirring* (fim de sopro), o teor de FeO na escória médio foi de 25,4% com um desvio padrão de 3,7%. Já para as amostras de FeO após o *Post Stirring*, os teores foram 25,5% e 4,0%.

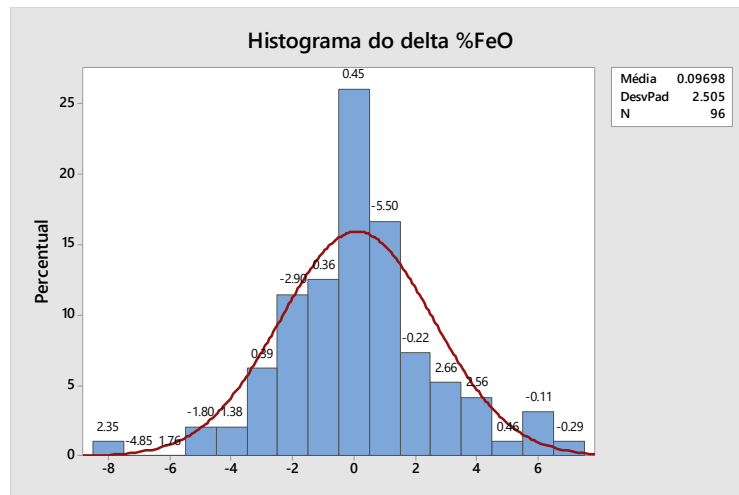
Figura 17 – Teor de FeO antes e depois dos testes de Post Stirring.



Fonte: Autores.

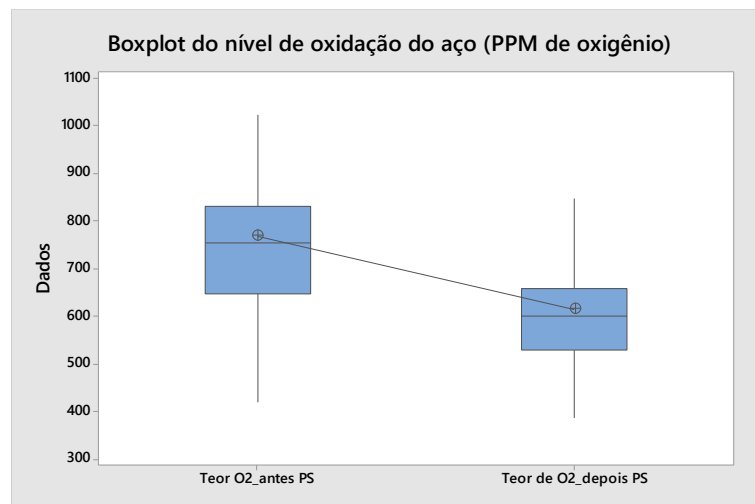
Na Figura 18, é mostrado o histograma da variação do teor de FeO na escória (delta). O delta de FeO é calculado pela diferença do teor de FeO antes e após o *Post Stirring*. É possível observar que há um aumento médio de 0,1% com desvio padrão de 2,5% respectivamente. Porém, estatisticamente, não se pode afirmar que as amostras são diferentes.

Figura 18 – Histograma da variação do teor de FeO na escória.



Através de um sensor, foram medidos temperatura e nível de oxidação do aço. Em relação a oxidação do aço, dado pelo nível de oxigênio dissolvido, houve uma redução após o teste de *Post Stirring* (Figura 19).

Figura 19 – Boxplot do teor de oxigênio dissolvido no aço antes e depois dos testes de *Post Stirring*.

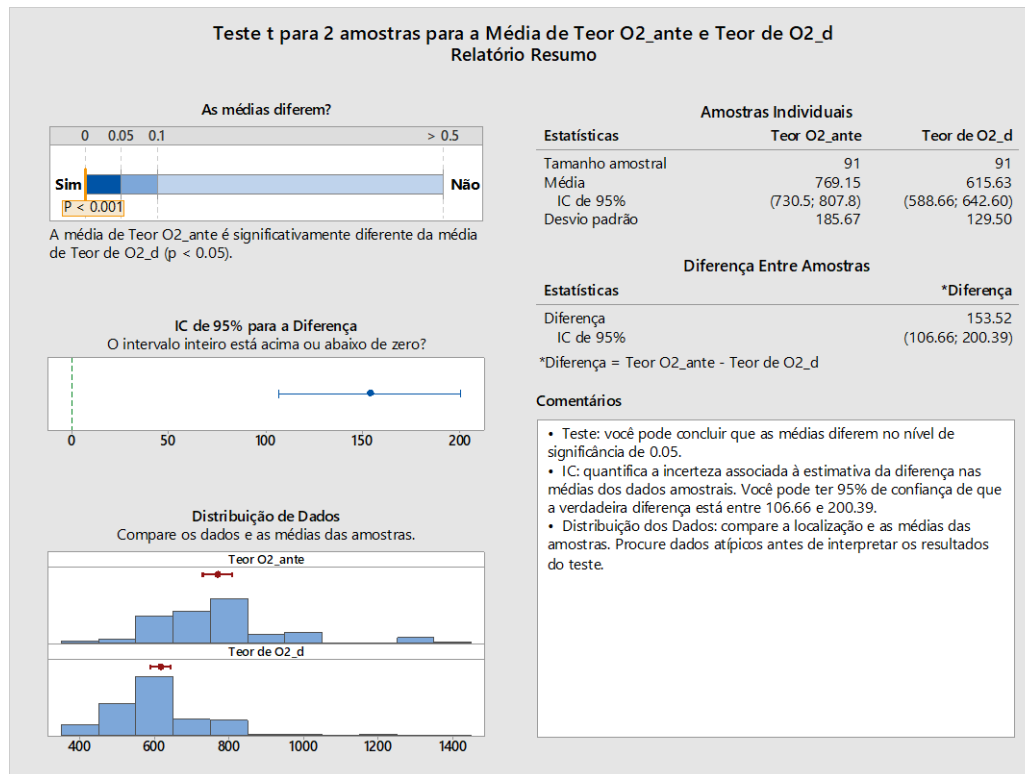


Fonte: Autores.

Foi realizado um teste de hipóteses para o teor de oxigênio (Figura 20) e a análise mostrou que existe uma diferença estatística do oxigênio no aço antes e depois do teste de *Post Stirring*, com um nível de significância de 95%. Para as medições de ppm de oxigênio

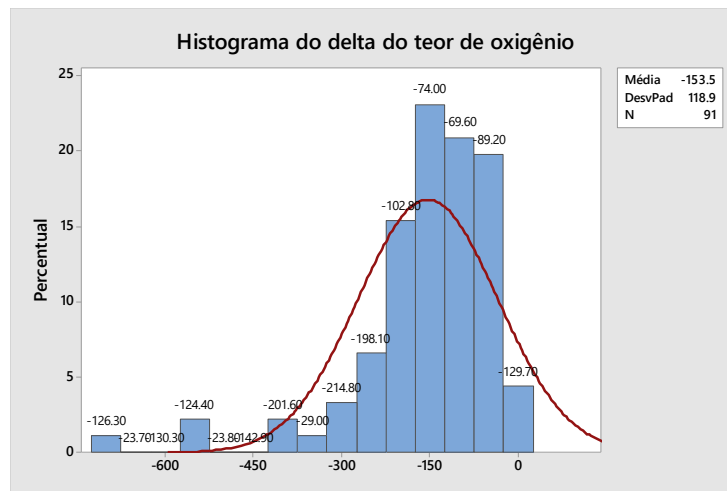
antes do *Post Stirring* (fim de sopro), o teor de oxigênio médio foi de 769 ppm com um desvio padrão de 186 ppm. Já para as medições de oxigênio após o *Post Stirring*, os teores foram 616 ppm e 130 ppm.

Figura 20 - Teste de hipótese para o nível de oxidação do aço (ppm de oxigênio).



Na Figura 21, é mostrado o histograma da variação do teor de oxigênio (delta). O delta de ppm de oxigênio é calculado pela diferença do teor de oxigênio antes e após o *Post Stirring*. Pode ser visualizado que os valores são negativos, ou seja, houve uma redução do teor de oxigênio durante o *Post Stirring*. Apresentou média e desvio padrão de 153 ppm e 119 ppm. Através dos resultados, com o teste de *Post Stirring* por 1 minuto, tem-se uma redução média de 22% do teor de oxigênio no aço.

Figura 21 – Histograma da variação do teor de ppm de oxigênio no aço.



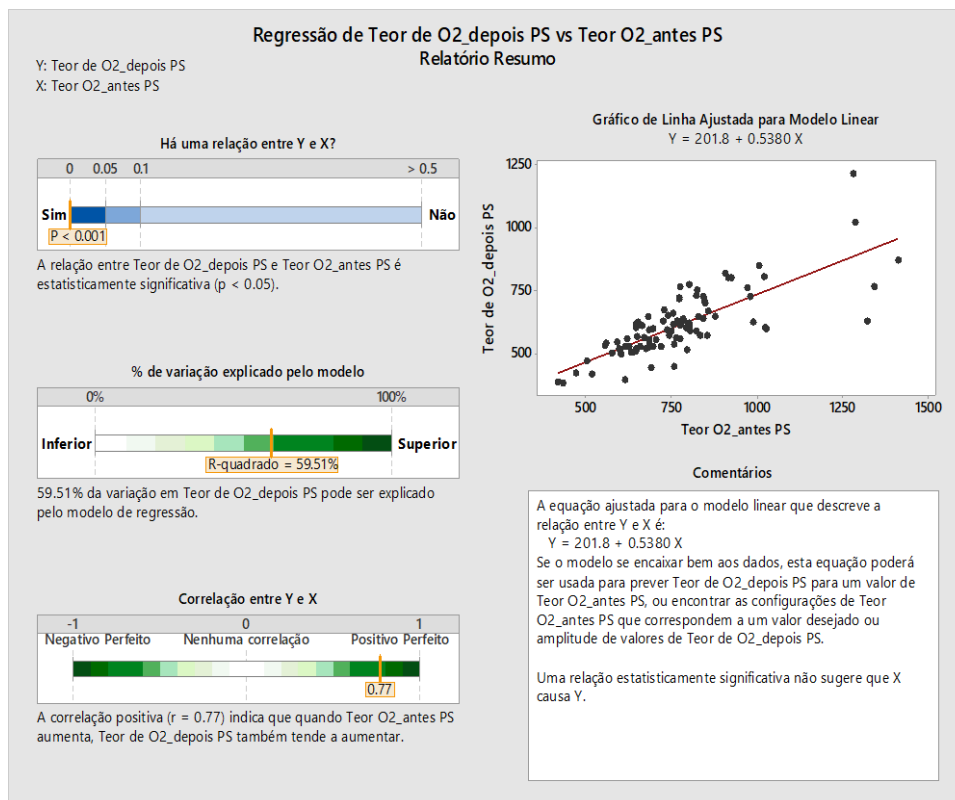
Fonte: Autores.

A Figura 22 mostra os resultados da regressão de linear entre os teores de oxigênio antes e após o teste de *Post Stirring*.

O coeficiente de determinação (R-quadrado) da equação 3 é de 59,5%, indicando que a linha de regressão tem correlação positiva média com os dados, apesar do P value ser menor que 0,001. Sendo assim, o modelo linear (equação 3) obtido se adequa aos dados e fornece uma variável de predição confiável.

$$\%O_2_{\text{após } Post\ Stirring} = 0.5380 * \%O_2_{\text{antes } Post\ Stirring} + 201.8 \text{ (Eq 3)}$$

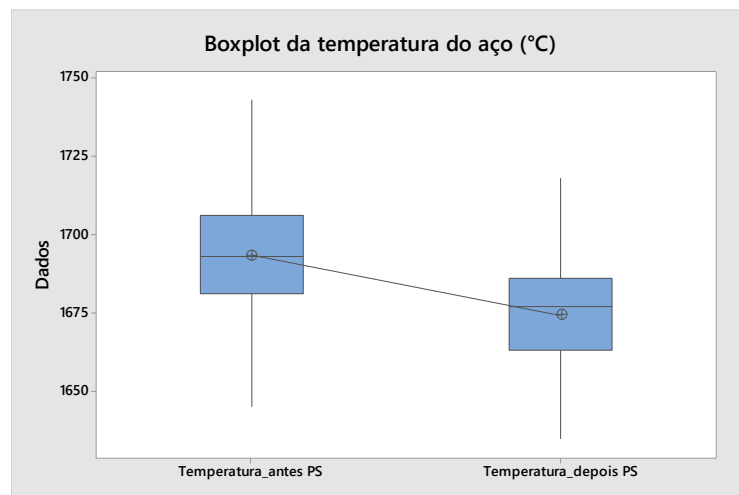
Figura 22 - Resultados da regressão linear para o teor de carbono.



Fonte: Autores.

Outra variável importante analisada foi a temperatura do aço (Filho et al. 2012). Na Figura 23, pode ser visto que após o teste de *Post Stirring* houve um decréscimo de temperatura. Para corridas antes do teste de *Post Stirring*, a faixa de temperatura foi de 1630 a 1770°C. Já para aquelas após o *Post Stirring*, a faixa foi de 1610 a 1750°C.

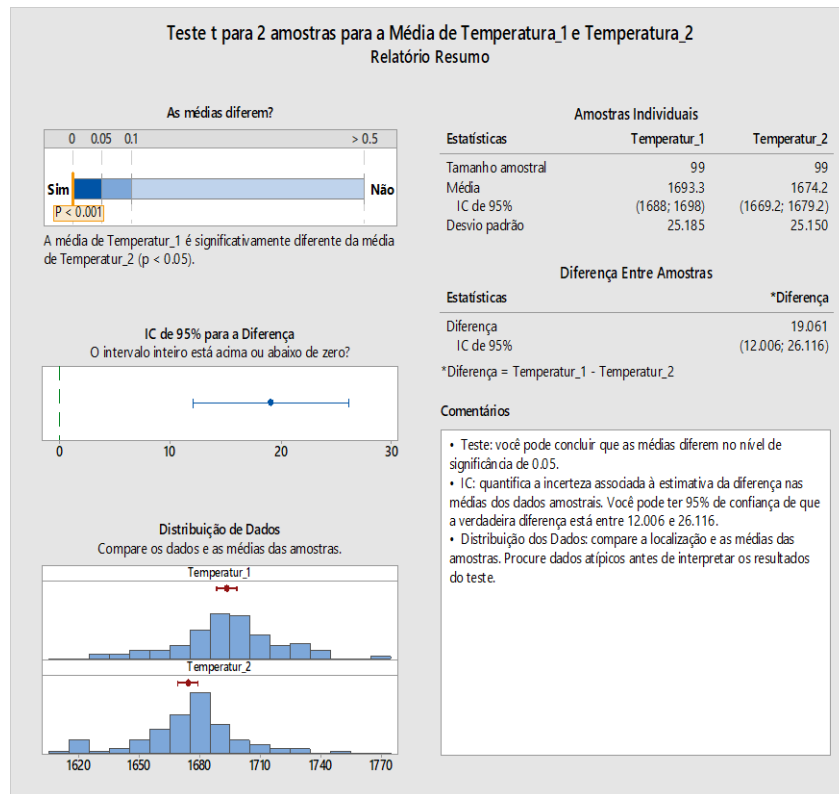
Figura 23 – Boxplot da temperatura do aço antes e depois dos testes de Post Stiring.



Fonte: Autores.

Foi realizado um teste de hipóteses para o nível térmico do aço (Figura 24) e a análise mostrou que existe uma diferença estatística nas medições de temperatura antes e depois do teste de *Post Stiring*, com um nível de significância de 95%. Para as medições antes do *Post Stiring* (fim de sopro), a temperatura média foi de 1693°C com desvio padrão de 25°C. Já para as medições de temperatura após o *Post Stiring*, os valores foram 1674°C e 25°C.

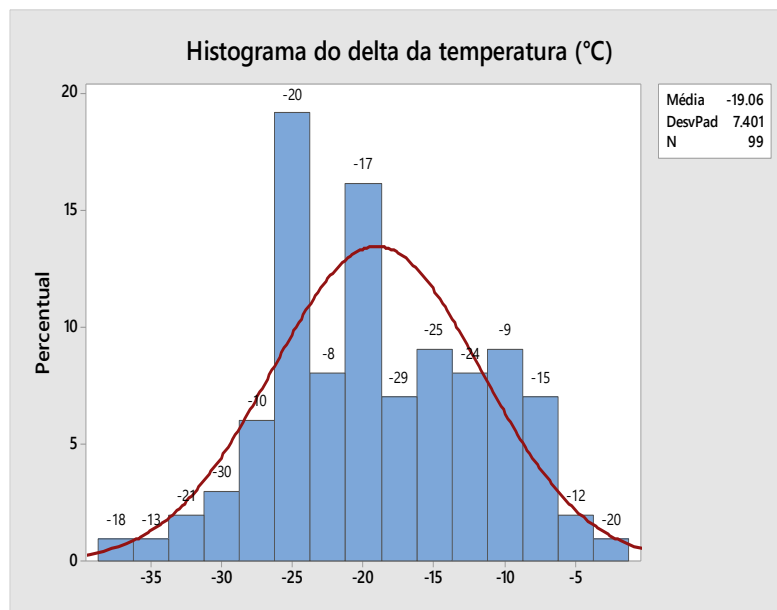
Figura 24 - Teste de hipóteses para a temperatura do aço.



Fonte: Autores.

Na Figura 25, é mostrado o histograma da variação da temperatura (delta). O delta de temperatura é calculado pela diferença da temperatura antes e após o *Post Stirring*. A redução da temperatura apresentou média e desvio padrão de 19°C e 7°C.

Figura 25 – Histograma da variação da temperatura no aço.



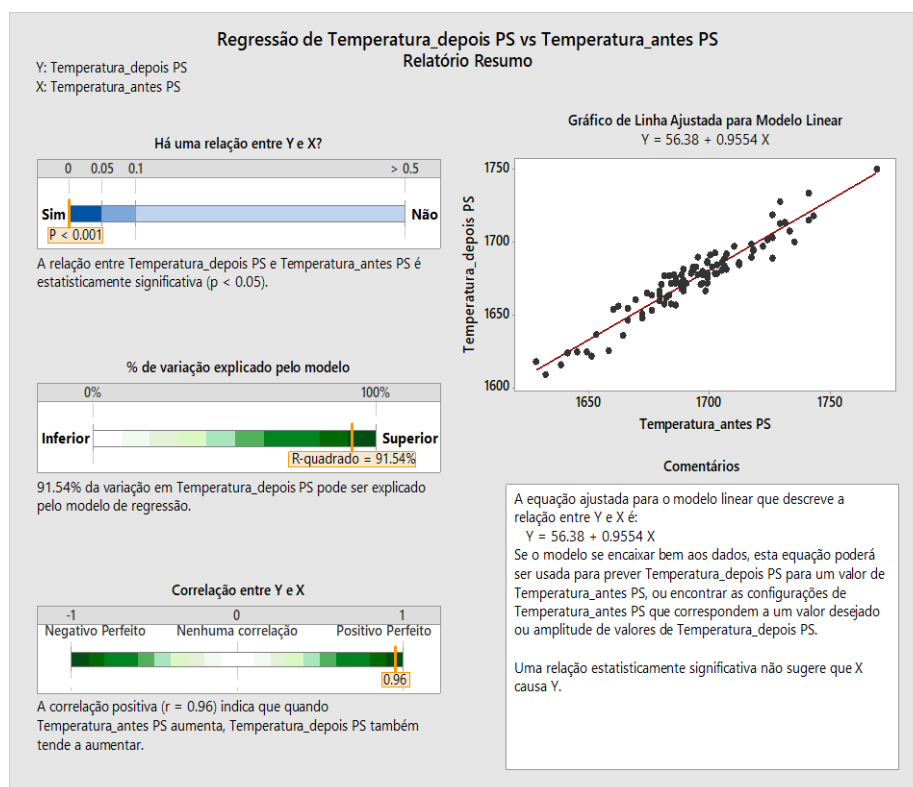
Fonte: Autores.

A Figura 26 mostra os resultados da regressão linear entre as temperaturas antes e após o teste de *Post Stiring*.

O coeficiente de determinação (R-quadrado) da equação 4 é de 91,5%, indicando que a linha de regressão se ajusta bem aos dados. O P value é menor que 0,001, indicando que existe uma correlação forte entre as variáveis X (temperatura antes do teste) e Y (temperatura após teste). Sendo assim, o modelo linear (equação 4) obtido se adequa bem aos dados e fornece uma variável de predição confiável.

$$\text{Temperatura_após } \textit{Post Stiring} = 0.9554 * \text{temperatura_antes } \textit{Post Stiring} + 56.38 \text{ (Eq 4)}$$

Figura 26 - Resultados da regressão linear para temperatura do aço.



Fonte: Autores.

5. Considerações Finais

A Tabela 1 resume os resultados obtidos após os testes do *post stirring*.

Tabela 1 – Sumarização dos dados coletados com o teste de *Post Stirring*.

Variável analisada	Antes do teste de <i>Post Stirring</i>	Após o teste de <i>Post Stirring</i>	Diferença da variação das amostras	Nível de significância a 95%
Teor de fósforo (%)	0,0136	0,0109	-0,0027	Significante
Teor de carbono (%)	0,049	0,041	-0,008	Significante
Temperatura (°C)	1693	1674	-19	Significante
Oxigênio dissolvido (ppm)	769	616	-153	Significante
Manganês (%)	0,130	0,124	-0,006	Não é significativa
Teor FeO escória (%)	25,4	25,5	+0,1	Não é significativa

Fonte: Autores.

Verificou-se uma redução do fósforo, carbono, temperatura e oxigênio dissolvido de final de sopro, conforme já era esperado pela literatura. Houve um aumento do ferro na escória (%FeO) e uma redução no teor de manganês de fim de sopro, porém, estatisticamente, foi comprovado pelo teste de hipóteses que as médias das amostras não são significantes.

Os testes de hipótese foram decisivos para avaliar quais variações observadas, efetivamente são relevantes no processo de *Post Stirring*. Somente com a redução do teor de oxigênio dissolvido no aço, trará uma diminuição de custo com o uso de materiais desoxidantes como alumínio e silício e outras ferro ligas para incorporação no aço.

Por meio da regressão linear, foram desenvolvidas quatro equações de predição para os teores de fósforo, carbono, temperatura e oxigênio dissolvido. Sendo assim, se for adotado industrialmente o *Post Stirring*, não haverá necessidade de aguardar uma nova amostra para verificar estes teores no aço. O vazamento da corrida de aço pode ser realizado sem uma segunda amostra.

Por fim, com o conjunto da ferramenta estatística de análise gráfica, teste de hipótese e equações de predição, o estudo foi validado e chegou-se à conclusão que o processo de fabricação do aço pode ser alterado com ganhos operacionais e aumento da eficiência dos parâmetros analisados. Sendo assim, há uma melhoria na qualidade do processo e consequentemente no produto final no cliente.

Referências

Alves, C. C. (2003), “Gráficos de Controle CUSUM: um enfoque dinâmico para a análise estatística de processos”, Florianópolis. Dissertação de mestrado do Centro Tecnológico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.

Bruckhaus, R., Lachmund, H. (2007), “Stirring strategies to meet the highest metallurgical requirements in the BOF process”, In: AISTech. The Iron & Steel Technology, Indianapolis, Ind, p. 44-50.

Campos, V. F. (2004), “Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia-a-Dia”, 8ª edição. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviço Ltda.

Corrêa, C. A, Corrêa, H. (2006), “Administração de Produção e Operações: Manufatura e Serviços – Uma abordagem estratégica”, 2ª edição. São Paulo: Atlas.

Dias, F., A., D. (2016), “As 7 ferramentas da qualidade. Betaeq”, (UNIFACS). Disponível em: <<https://betaeq.com.br/index.php/2016/04/11/7-ferramentas-da-qualidade/>>. Acesso em: 18 Fev. 2020.

Filho, A., Gonçalves, H., Carneiro, C., Araújo, T. (2012), “Estudo da técnica Post Stirring e mecanismos envolvidos”, *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 16-21.

Marshall Junior, I., Cierco, A. A., Rocha, A. V., Mota, E. B., Leusin, S. (2006), “Gestão da Qualidade”, 8ª edição. Rio de Janeiro: FGV.

Ricci, M., Waterfall, S., Sun, S. (2008), “Optimization of Botton Sitirring in the 165 tonne Electric Arc Furnace at Arcelor Mittal Dofasco”, Austria: RHI Bulletin.

Rose, L., Becker, W., “Bottom stirring in the converter using the MTBI process”, *Steel Times International: Oxygen Steelmaking*. July, 1994. p. 18-21.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Rafaela Pacheco Malvão dos Santos – 70,0%

Paulo Rogerio Camargo – 6,0%

Antonio Henriques de Araujo Junior – 6,0%

José Glênio Medeiros de Barros – 6,0%

Nilo Antonio Souza Sampaio – 6,0%

José Wilson de Jesus Silva – 6,0%