



Faculdade de Pindamonhangaba



**Jeferson Souza de Oliveira**

**REDUÇÃO DE CONSUMO DE CAL EM ESCÓRIA DE FORNO  
ELÉTRICO A ARCO**

**Pindamonhangaba – SP  
2015**



Faculdade de Pindamonhangaba



**Jeferson Souza de Oliveira**

## **REDUÇÃO DE CONSUMO DE CAL EM ESCÓRIA DE FORNO ELÉTRICO A ARCO**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) para a obtenção do Diploma de Bacharel pelo Curso de Engenharia de Produção da Faculdade de Pindamonhangaba.

Coordenador: Prof. Dr. Claudio Augusto Kelly.

**Pindamonhangaba – SP  
2015**



Faculdade de Pindamonhangaba



**Jeferson Souza de Oliveira**

## **REDUÇÃO DE CONSUMO DE CAL EM ESCÓRIA DE FORNO ELÉTRICO A ARCO**

Monografia apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Diploma de Bacharel  
pelo Curso de Engenharia de Produção da  
Faculdade de Pindamonhangaba

**DATA:** \_\_\_\_\_

**RESULTADO:** \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof . \_\_\_\_\_ Faculdade de Pindamonhangaba

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof . \_\_\_\_\_ Faculdade de Pindamonhangaba

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof . \_\_\_\_\_ Faculdade de Pindamonhangaba

Assinatura \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho aos meus pais José Júlio (*in memoriam*)  
e Terezinha que contribuíram diretamente na formação de meu caráter  
e sempre torceram pra que tudo desse certo em minha vida,  
empenhando grande esforço para tal.

À minha esposa Sílvia  
e minhas filhas,  
Rúbia e Victória

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a DEUS por toda a força concedida para que eu pudesse levar esta etapa de minha vida com êxito até o final.

À minha esposa Sílvia Andréa por toda a paciência e cuidado com a família durante meus momentos de estudo.

A Thiago Augusto Ávila, grande colega de trabalho que forneceu subsídios técnicos para este trabalho.

Ao colega de trabalho Wellington Conceição pelas grandes orientações estatísticas em Seis Sigma.

Ao Prof. Dr. Claudio Augusto Kelly por toda orientação dada a este trabalho.

Aos Professores Dr. João Bosco Gonçalves e Me. Weliton Santos de Abreu que participaram da Coordenação do Curso da primeira turma da Engenharia de Produção da FUNVIC.

E também aos colegas de classe Adriano Ap. Baptista, Tiago Martins Damião e Nicollas Skupien os quais dividimos momentos de estudos importantes ao longo de todo o curso.

# SUMÁRIO

|     |                                        |    |
|-----|----------------------------------------|----|
| 1   | INTRODUÇÃO .....                       | 10 |
| 2   | REFERENCIAL TEÓRICO.....               | 13 |
| 2.1 | Forno Elétrico a Arco .....            | 14 |
| 2.2 | Escória em Forno Elétrico a Arco ..... | 16 |
| 2.3 | Ferramentas da Qualidade.....          | 17 |
| 3   | METODOLOGIA .....                      | 20 |
| 3.1 | Cronograma.....                        | 21 |
| 3.2 | Orçamento.....                         | 22 |
| 4   | DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....      | 22 |
| 4.1 | Análise de Fenômeno .....              | 22 |
| 5   | RESULTADOS.....                        | 38 |
| 5.1 | Priorização de Causas Potenciais ..... | 38 |
| 5.2 | Análise de Fatores Causais.....        | 41 |
| 5.3 | Definição do Plano de Ação.....        | 48 |
| 5.4 | Resultados obtidos.....                | 52 |
| 6   | CONCLUSÃO .....                        | 54 |
|     | REFERÊNCIAS .....                      | 55 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Produção de aço no mundo em 2012. ....                                      | 10 |
| Figura 2. Vazamento de aço líquido em panela de Aciaria.....                          | 12 |
| Figura 3. Esquema de um Forno Elétrico a Arco. ....                                   | 15 |
| Figura 4. Escória em Refino Secundário (Forno Panela). ....                           | 17 |
| Figura 5. Representação de um boxplot. ....                                           | 18 |
| Figura 6. Gráfico de Pareto.....                                                      | 18 |
| Figura 7. Cartas de Controle.....                                                     | 19 |
| Figura 8. Histograma e variabilidade. ....                                            | 20 |
| Figura 9. Consumo de Cal - Comparativo entre usinas em 2014.....                      | 23 |
| Figura 10. Consumo de cal histórico na Aciaria de 2012-2014.....                      | 23 |
| Figura 11. Consumo de cal histórico na Aciaria de 2012-2014 – FEA. ....               | 24 |
| Figura 12. Consumo de cal histórico na Aciaria de 2012-2014 - Forno Panela.....       | 24 |
| Figura 13. Percentuais de consumo entre FEA e FP 2014.....                            | 25 |
| Figura 14. Consumo mensal de cal entre FEA e FP – 2014 (kg).....                      | 26 |
| Figura 15. Consumo acumulado no ano por FEA - período base (maio/14-setembro/14)..... | 27 |
| Figura 16. Variabilidade de consumo de cal por corrida entre FEA1 e FEA2. ....        | 27 |
| Figura 17. Consumo total de cal por forneiro (kg). ....                               | 28 |
| Figura 18. Consumo médio por Forneiro (kg/t). ....                                    | 29 |
| Figura 19. Consumo total de cal por turno no período base (kg). ....                  | 30 |
| Figura 20. Consumo de cal médio por corrida, por turno (kg/corrida). ....             | 30 |
| Figura 21. Consumo de cal por família de P.....                                       | 32 |
| Figura 22. Consumo por família em função do volume total produzido.....               | 33 |
| Figura 23. Análise de Capacidade da Família P 025. ....                               | 34 |
| Figura 24. Análise de Estabilidade P 025. ....                                        | 35 |
| Figura 25. Análise de Capacidade da Família P 020. ....                               | 36 |
| Figura 26. Análise de Estabilidade P 020. ....                                        | 36 |
| Figura 27. Análise de Capacidade da Família P 030. ....                               | 37 |
| Figura 28. Análise de Estabilidade P 030. ....                                        | 37 |
| Figura 29. Ramificação do problema. ....                                              | 38 |
| Figura 30. Análise de sílica na escória – 1º semestre de 2015. ....                   | 42 |
| Figura 31. Histograma de consumo de cal para família de P 025. ....                   | 43 |
| Figura 32. Diferença entre etapas no resultado de P, família P025. ....               | 44 |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 33. Variação de P por etapa de processo, família P025.....          | 45 |
| Figura 34. Variação de P por etapa de processo, família P020.....          | 46 |
| Figura 35. Variação de P por etapa de processo, família P015.....          | 46 |
| Figura 36. Percentual de P2O5 na escória do FEA, 1º semestre de 2015. .... | 47 |
| Figura 37. Prolongamento de vigas entre pontes.....                        | 50 |
| Figura 38. À esquerda, mini bag e, à direita, bag normal.....              | 50 |
| Figura 39. Consumo de cal total da Aciaria em 2015.....                    | 52 |
| Figura 40. Consumo de cal no FEA em 2015.....                              | 53 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Cronograma de projeto de redução de consumo de cal em Aciaria Elétrica. .... | 21 |
| Tabela 2. Priorização de causas. Parte 1. ....                                         | 39 |
| Tabela 3. Priorização de causas. Parte 2. ....                                         | 40 |
| Tabela 4. Análise de Fatores Causais. ....                                             | 41 |
| Tabela 5. Tabela de adição de cal antes do projeto. ....                               | 49 |
| Tabela 6. Procedimento de adição de cal após projeto. ....                             | 49 |
| Tabela 7. Procedimento de gatilho de retrabalho de P antes do projeto.....             | 51 |
| Tabela 8. Procedimento de gatilho para retrabalho de P após projeto.....               | 51 |
| Tabela 9. Ganho projetado por desempenho na redução de consumo de cal.....             | 53 |



## **RESUMO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso trata sobre o problema de consumo acentuado de cal ocorrido no ano de 2014 numa indústria siderúrgica situada no Estado de São Paulo, Brasil e, como através da metodologia Seis Sigma foi estudado o problema para a melhoria de processo. Trata-se de uma condição real onde foram usadas ferramentas da Engenharia de Produção, visando ações para a redução de consumo específico deste constituinte da escória utilizada no aço líquido, no processo de fusão de uma Aciaria. O trabalho evidencia como é possível obter resultados significativos quando se une uma equipe conhecedora do assunto abordado ao trabalho estatístico ordenado pelas etapas de análise orientadas pela filosofia Seis Sigma.

**Palavras-chave:** Seis Sigma. Consumo de cal. Aciaria elétrica. Redução de custo.

## **ABSTRACT**

*This monography is about the problem of sharp lime consumption occurred in the year 2014 in a steel industry located in the State of São Paulo, Brazil and, as through the Six Sigma methodology was studied the problem for process improvement. It is a real condition where they were used in Production Engineering tools aimed at actions for the reduction of specific consumption of this constituent of slag used in liquid steel melting process of a Meltshop. The work shows how it is possible to obtain significant results when joins a team knowledgeable of the subject to work ordered by the statistical analysis steps guided by Six Sigma philosophy.*

**Keywords:** Six Sigma. Lime consumption. Meltshop. Cost reduction.

# 1 INTRODUÇÃO

A produção de aços faz parte de grande sustentação da economia industrial de um país, possuindo uma complexa rede interligada de processos desde a fusão do metal dentro de uma Aciaria, gerando matéria prima utilizada em toda cadeia que depende deste metal, até chegar ao produto final, desde o vergalhão até veículos automotores.

Nas indústrias destinadas à produção de aço, as siderúrgicas, a cada ano são criados desafios para a diminuição de seu custo produtivo para tentar aumentar a sua competitividade mediante à entrada em massa do aço de origem oriental nos mercados metalúrgicos de todo o mundo, com custo muito baixo, boa parte pela questão cambial. A China é o maior produtor de aços do mundo e seu grande potencial de produção impacta o funcionamento de todo o ramo, mundialmente falando. A Figura 1 a seguir demonstra, segundo FURTADO (2013) de forma proporcional o poder de produção da China perante os demais países do ranking mundial, superando os 10 seguintes concorrentes.

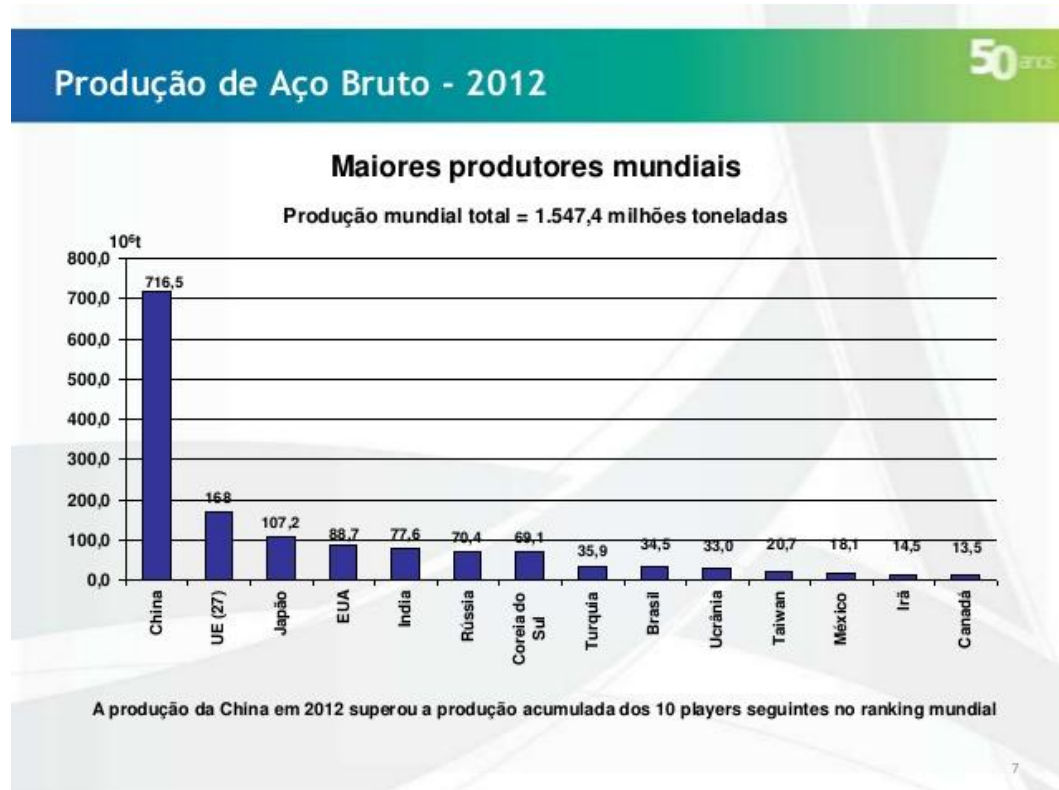


Figura 1. Produção de aço no mundo em 2012.

Fonte: <http://pt.slideshare.net/GalvaBrasil/gb-apresentao-murilo-furtado>

ÁVILA (2011) afirma que as aciarias elétricas, unidades produtoras de aço nas *mini-mills* (siderúrgicas elétricas), empregam demasiado esforço na melhoria da eficiência do forno elétrico a arco, cuja responsabilidade é a fusão e elaboração primária do aço. A formulação e o condicionamento da escória no forno elétrico permitem espumá-la, atingindo seu volume máximo sem aumentar a adição de fundentes, e conseqüentemente, reduzir as perdas térmicas, impurezas do aço, tempo de processo, consumo de energia e refratário. Otimizando os recursos na produção dentro de uma aciaria, onde estão os maiores custos de uma siderúrgica, seja em consumo de materiais e insumos, redução de tempos de processo e aumento de produtividade aumentam as chances de sobrevivência destas empresas perante as tendências competitivas de um mercado globalizado e diminui também impactos de eventuais descontinuidades.

Este trabalho esboçará como funciona a produção de aços numa Aciaria Elétrica, focando o processo de fusão primária, no forno elétrico a arco (FEA) e o consumo de cal utilizado no processo produtivo de uma aciaria de siderúrgica localizada no Estado de São Paulo, orientada para abastecimento de aço para o ramo automobilístico, aços especiais. No escopo, a cal utilizada na formação de escórias em forno elétrico desta aciaria será analisada em forma de projeto, buscando-se a diminuição de sua utilização no processo, com base em ferramentas estatísticas e de qualidade utilizadas na Engenharia de Produção, observando-se comportamentos específicos de outros estudos quanto às propriedades química e termodinâmica dentro do processo. Trata-se de um projeto prático, com metodologia, aplicado em campo.

Abaixo, a Figura 2 mostra um FEA realizando o vazamento de uma corrida de aço líquido dentro de uma panela suspensa por ponte rolante de capacidade de 180 t de carga, dentro da empresa em estudo.



Figura 2. Vazamento de aço líquido em panela de Aciaria.

Fonte: Autor.

Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento do consumo de cal dentro do segmento de produção de aços, em uma Aciaria Elétrica destinada à produção de aços especiais para construção mecânica. São aços para finalidades diversas, dentre elas, componentes mecânicos utilizados por empresas que fornecem autopeças para montadoras de veículos no Brasil.

O consumo de cal é um indicador estritamente importante dentro da produção de uma aciaria elétrica, sendo considerado um fundente dentro do processo, com várias funções, sendo a principal formadora de escória no processo de fusão a arco elétrico. ÁVILA (2011) afirma que seus aspectos interferem desde a proteção do aço líquido contra reoxidações durante o processo de fusão, passando por reações de desfosforação, dessulfuração, proteção contra perda térmica, proteção de eletrodos e carcaça do equipamento FEA. A sua composição química também afeta muito no comportamento da escória, tendo que ser observados em qualquer mudança no consumo ou alteração de material.

A empresa em estudo apresentou grande aumento no consumo de cal em kg/t (quilos de cal utilizada para cada tonelada de aço útil produzido na Aciaria), saindo de 58,23kg/t no ano de 2013 para 67,39kg/t acumulados em 2014, aumento de 15,8% de utilização deste insumo. Também se faz necessário analisar quais os fatores que interferiram na mudança negativa de patamar e se há necessidade de eventuais mudanças de material para a otimização e eficiência do processo de refino primário.

Serão estudados os comportamentos deste indicador, em função dos limites admissíveis de fósforo e suas respectivas exigências de consumo de cal para realizar a desfosforação, que é parte do processo de refino primário realizado na fusão de um forno elétrico a arco. E serão também avaliados fatores relacionados à eficiência operacional, como comportamento de consumo por turnos, por famílias de aços e influências de outros fatores de processo.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O trabalho publicado por ÁVILA (2011) referente a condicionamento e espumação de escórias tem material técnico para a análise de comportamento de escória no FEA, abrangendo aspectos importantes sobre a basicidade da mesma e sua respectiva correlação com a capacidade de espumação, dentre outros aspectos.

Dentro do trabalho de escória na fusão de uma corrida por meio de arco e eletrodo, se faz necessário conhecer as propriedades de escória visando à melhoria também na economia de energia elétrica, melhor aproveitamento térmico no banho líquido de aço e preservação de estruturas da carcaça do próprio forno elétrico, onde se atingem temperaturas de aproximadamente 1600°C. PRETORIUS (1998) também é referência importante no assunto, fornecendo material importante na formação dos principais diagramas ternários de análise de escória, com reconhecimento mundial.

## 2.1 Forno Elétrico a Arco

O Forno Elétrico a Arco é um equipamento utilizado na siderurgia para a fusão de cargas metálicas constituídas de ferro gusa, sucatas de geração industrial e por sucatas de obsolescência, dentre outros constituintes como carburantes e cales. Suas capacidades variam bastante conforme o tipo de produto final produzido por cada indústria e, a capacidade nominal de geração de metal líquido da empresa em estudo está por volta de 90 t.

Para a fusão da carga são utilizados três eletrodos de grafite gerando um arco voltaico por volta de 4 kA, com potência nominal de cerca de 56 MVA, com mais de 4000°C no núcleo do arco. São utilizados de dois a três cestos de carregamento de carga metálica, onde são gerados ciclos de fusão onde o metal é processado numa temperatura de cerca de 1600°C. No processo de fusão, ou derretimento da carga metálica, são utilizados também injetores de oxigênio puro (O<sub>2</sub>) que aumentam a temperatura por reação exotérmica.

Os eletrodos possuem movimento de elevação e descida regulados eletricamente pelo tamanho de arco, e são fixados numa espécie de tampa refrigerada a água chamada abóboda que gira lateralmente para promover o abastecimento das cargas a serem fundidas pela parte de cima do equipamento. No diâmetro superior do mesmo encontram-se estruturas chamadas painéis refrigerados que ajudam também na refrigeração da carcaça do forno, possuindo também circulação interna de água.

A parte inferior do FEA constitui-se de uma carcaça metálica envolvida por camadas de revestimento de massa e tijolos refratários para trabalho em temperaturas elevadas.

Todo o conjunto possui ainda dois grandes cilindros hidráulicos que promovem o movimento de basculamento do forno até o ângulo necessário para promover a inclinação utilizada para realizar o esgotamento do aço ou, vazamento para dentro de um recipiente chamado de panela, transportada por ponte rolante de capacidade de 180 t de carga. A Figura 3 representa um esquema de componentes de um FEA com vista frontal e lateral.

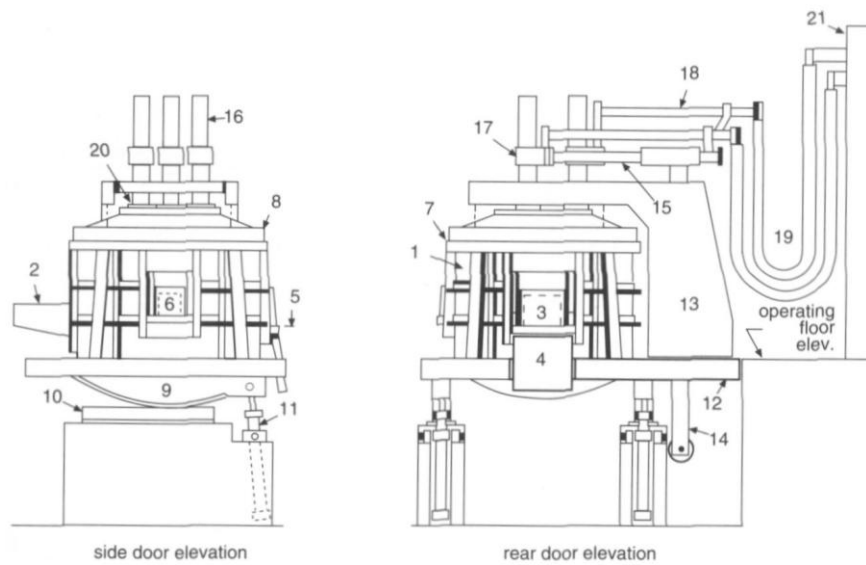


Figura 3. Esquema de um Forno Elétrico a Arco.

Fonte: SILVA (2006).

1. Estrutura (carcaça)
2. Bica para vazamento
3. Porta de escória
4. Proteção e interligação de estrutura
6. Porta lateral
7. Anel de apoio da abóboda
8. Anel da abóboda
9. Trilho de basculamento em raio
10. Trilho de basculamento em cremalheira
11. Pistão hidráulico para basculamento
12. Base estrutural
13. Braço da abóboda
14. Coluna de movimento do eletrodo
15. Braço do eletrodo
16. Eletrodo
17. Porta eletrodo (morça)
18. Barramento elétrico
19. Cabos elétricos refrigerados

## 2.2 Escória em Forno Elétrico a Arco

Na Figura 4 é mostrado um componente vital para que o processo de fusão do aço seja bem sucedido: a escória. Esta é constituída por elementos basicamente óxidos, dos quais os mais importantes são: CaO (cal), MgO (óxido de magnésio), SiO<sub>2</sub> (sílica), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (pentóxido de fósforo), sulfetos e outros componentes.

A cal é introduzida para compor a escória junto com as demais cargas metálicas e possui basicamente a função de promover a retirada de impurezas como o fósforo (P) durante o processo de refino primário, chamada de desfosforação. Em outra etapa do processo, no refino secundário, realizado no equipamento Forno Panela, a cal também realiza outro mecanismo químico de extração, a dessulfuração, onde remove em determinadas condições de temperatura o enxofre (S) do metal líquido.

Outro componente da escória é o MgO que pode ser introduzido na carga de duas formas: como MgO puro ou através de um tipo de cal chamada cal dolomítica, que contém teores de MgO na sua composição, além de CaO predominantemente. Este óxido promove a diminuição da corrosão da parede refratária do FEA, diminuindo a incidência de reparos na linha de escória (altura superior de trabalho do metal líquido).

A sílica (SiO<sub>2</sub>) está presente nas impurezas ou terras da própria sucata utilizada no carregamento do FEA, bem como também no ferro gusa. As impurezas também contém sulfetos e outros óxidos que acabam se aglomerando na escória por terem menor densidade enquanto a carga vai se tornando líquida ao contato com o arco voltaico, na fusão.

No processo, a escória se comporta como uma nata em cima do banho fundido e por suas características químicas e físicas, promove a proteção da carcaça do forno contra a radiação violenta de calor gerada pelas altíssimas temperaturas de fusão do aço. A presença de cal no FEA promove a desfosforação e diminuição das impurezas no produto sendo fundamental para a qualidade do aço. Injeções de grafite junto à escória associados com o FeO gerado no processo pela injeção também de O<sub>2</sub> promovem a insuflação da escória, formando a chamada escória espumante que auxilia também na proteção do arco voltaico, diminuindo as radiações de calor para a estrutura do forno, aumentando sua vida útil.





Figura 4. Escória em Refino Secundário (Forno Panela).

Fonte: Empresa.

## 2.3 Ferramentas da Qualidade

Dentre as ferramentas da qualidade utilizadas neste projeto, vale ressaltar algumas peculiaridades e características das mais importantes. Estas ferramentas estão inseridas dentro de um ciclo de metodologia chamado de PDCA que trata-se das seguintes etapas de abordagem: (*Plan*) planejar e analisar o problema, (*Do*) fazer as ações propostas, (*Check*) checar resultados e (*Action*) agir em cima dos resultados alcançados. Seguem alguns exemplos conforme WERKEMA (2005):

**Boxplot:** Gráfico que representa locação, dispersão, mediana, simetria ou assimetria de um conjunto de dados. O início da caixa representa o primeiro quartil de uma distribuição e o final da caixa, o terceiro quartil. Desenhado geralmente na vertical (Figura 5), são úteis para a comparação de dois ou mais conjuntos de dados. LAPPONI (2005) demonstra a possibilidade de elaboração desta ferramenta no software Excel, apesar do mesmo ser mais utilizado através do Minitab.

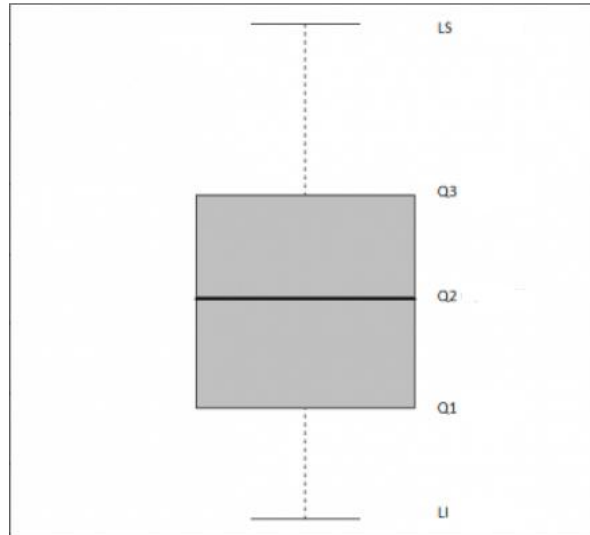


Figura 5. Representação de um boxplot.

Fonte: <http://www.portallaction.com.br/estatistica-basica/31-boxplot> (17-12-2015).

**Pareto:** Esta representação gráfica mostra de forma cumulativa quais são os grupos de dados com maior representatividade numa população, em ordem decrescente. Desta forma, é possível eleger quais são os problemas com maior incidência para melhor abordagem num projeto. Possui também, opcionalmente, uma linha com valores percentuais acumulador por item (Figura 6).

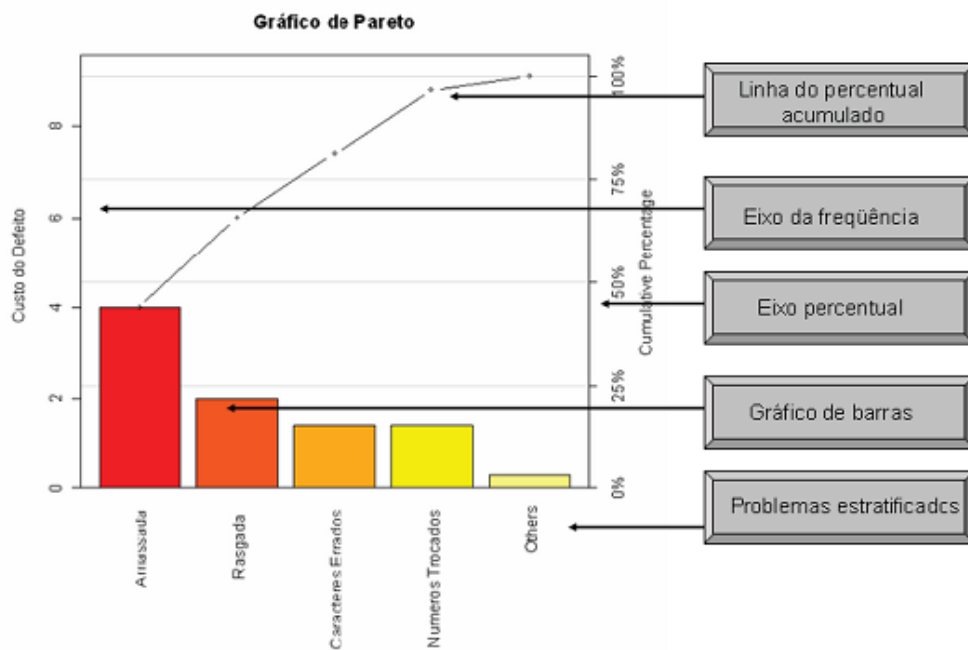


Figura 6. Gráfico de Pareto.

Fonte: <http://www.portallaction.com.br/estatistica-basica/15-diagrama-de-pareto> (17-12-2015).

**Gráfico sequencial:** É um diagrama de valores individuais dentro de um processo, ao longo do tempo. Mostra se há equilíbrio de variação, tendência ou mudança de patamares dentro deste processo. Pode indicar se há regularidade ou até causas especiais interferindo no comportamento. Se colocados limites inferiores e superiores, pode ser utilizado como carta de controle de processo, utilizando-se uma carta para valores absolutos e para a amplitude conforme a Figura 7.

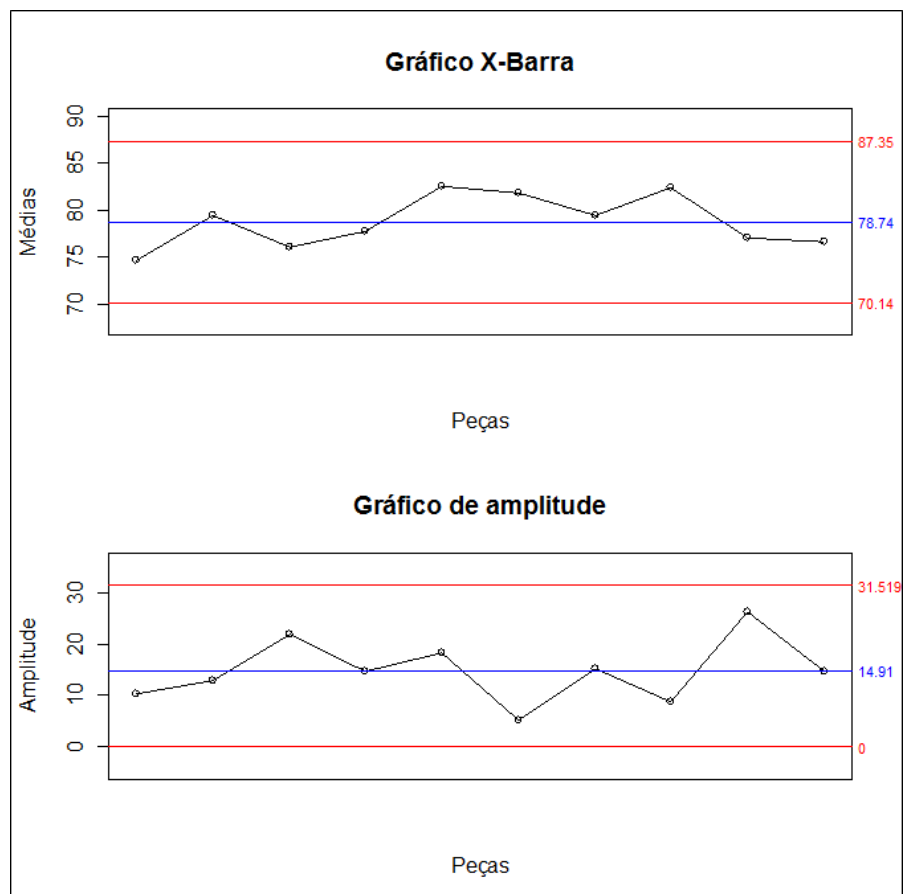


Figura 7. Cartas de Controle.

Fonte: <http://www.portaaction.com.br/analise-de-capacidade/81-o-metodo-do-grafico-de-controle-por-variaveis> (17-12-2015).

**Histograma:** Mostra graficamente a curva de distribuição de uma variável em análise. Podem ser feitos testes estatístico para a análise de normalidade de dados, para se checar qual é o tipo de distribuição em análise: normal ou não normal. Com a descrição de limites de controle, é possível a análise de capacidade de processo para se atingir determinado objetivo imposto.

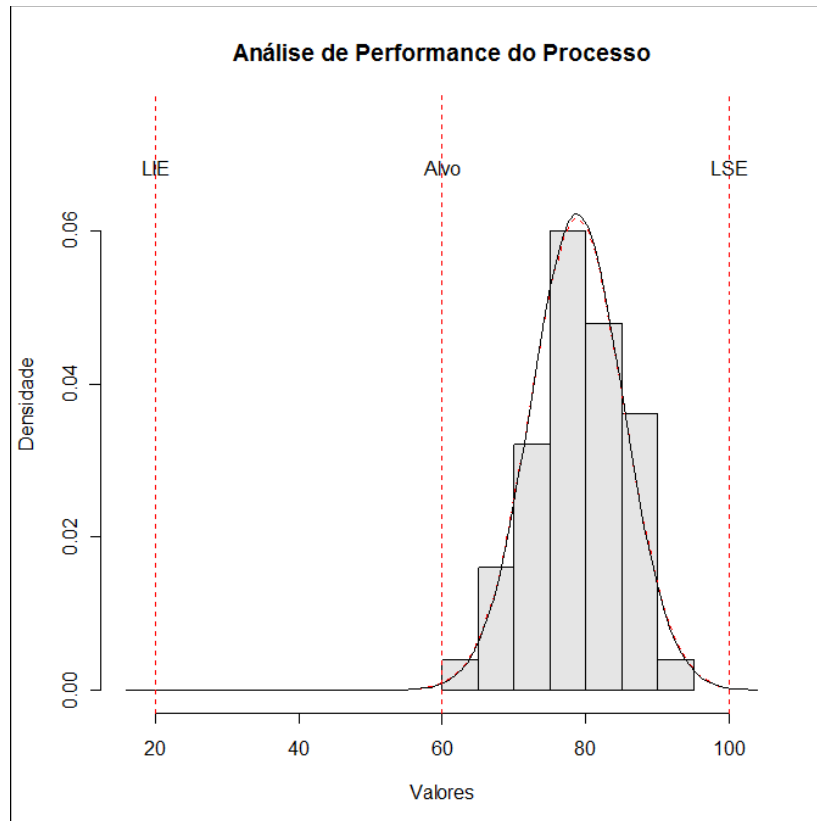


Figura 8. Histograma e variabilidade.

Fonte: <http://www.portaaction.com.br/analise-de-capacidade/81-o-metodo-do-grafico-de-controle-por-variaveis> (17-12-2015).

### 3 METODOLOGIA

Para os estudos e correlações propostas no objetivo deste trabalho, serão utilizadas ferramentas de análise através do software Minitab, destinado à análise estatística mais apurada, com complementos em ferramentas gráficas e tabelas do *software* Excel.

Este trabalho será tratado na ótica de projeto de melhoria e terá a utilização de algumas ferramentas de qualidade conhecidas da Engenharia de Produção, usadas nos métodos PDCA (*Plan, Do, Check, Action*) e 6 Sigma, e será subsidiado tecnicamente na parte termodinâmica, química e física por trabalhos publicados sobre escórias empregadas no processo de fusão de forno elétrico a arco.



### **3.2 Orçamento**

A empresa em estudo dispõe de cerca de R\$350.000,00 que foram orçados no ano de 2015, em seu planejamento, para melhorias destinadas ao acondicionamento e operação de movimentação de cal. No entanto, este projeto trabalhará predominantemente com os recursos existentes da empresa (operacionais e equipamentos instalados), sem aquisições complementares de custo, visando melhorias de processo e oportunidades fornecidas pelas análises das ferramentas da qualidade usuais do método Seis Sigma.

## **4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

### **4.1 Análise de Fenômeno**

Um dos primeiros pontos levantados com relação ao desempenho da usina de aço estudada foi o seu consumo de cal dentro do processo da aciaria comparado com outras usinas do mesmo grupo, com características similares de produção e tipos de aços de mesmo segmento. Conforme o gráfico da Figura 9 nota-se que a empresa, dada como B na comparação, realizou o pior desempenho dentre as três em análise, no que se diz respeito a consumo total mensal em kg/t de aço produzido, ou seja quilos de cal consumida para cada tonelada de aço útil realizado. Os dados de consumo são fornecidos pela própria empresa em software específico para custos.

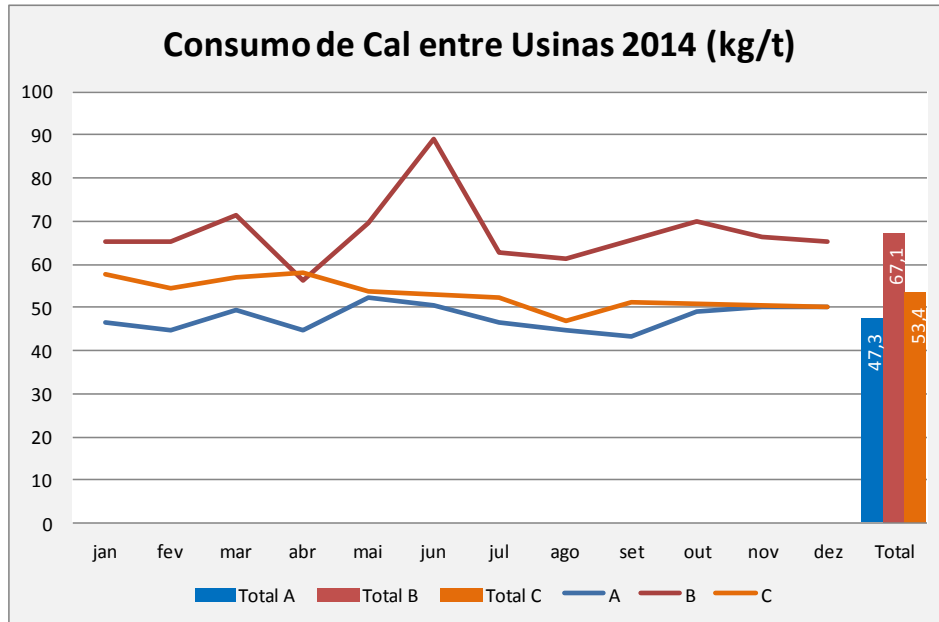


Figura 9. Consumo de Cal - Comparativo entre usinas em 2014.

Fonte: Empresa.

Outra análise realizada foi com relação ao comportamento de consumo de cal na empresa ao longo dos últimos três anos, para avaliar mudanças de desempenho nestes períodos. Como mostra a Figura 10, houve um aumento significativo no consumo de cal no ano de 2014 se comparado aos anos de 2012 e 2013, o que demonstra que possivelmente houve algum tipo de mudança na forma de operação e consumo dentro de seus processos.

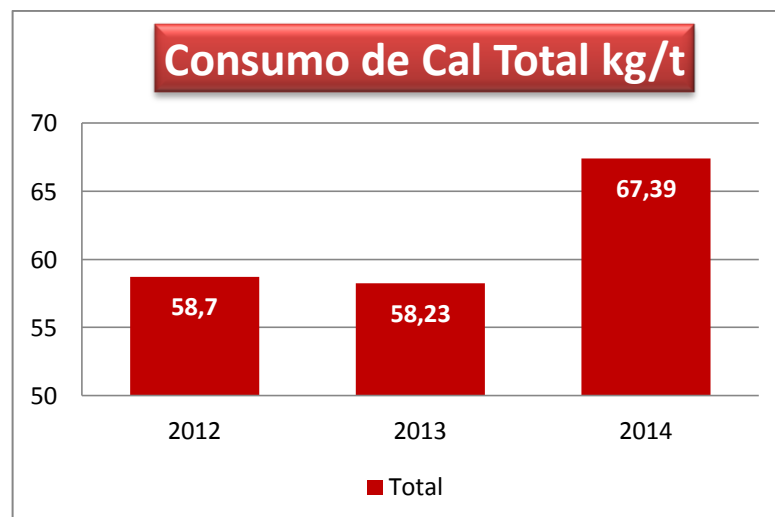


Figura 10. Consumo de cal histórico na Aciaria de 2012-2014.

Fonte: Empresa.

Houve aumento significativo de cerca de 9 kg/t em comparação aos anos anteriores, no resultado de 2014, e foi necessário saber qual das etapas do processo registrou tal aumento. Dentro de uma Aciaria elétrica há dois processos responsáveis pelo consumo de cal, sendo eles o de Fusão no FEA e o de Refino Secundário do aço, realizado no Forno Panela. Nas Figuras 11 e 12, nota-se no levantamento e dados separados de consumo por etapa de processo, que foi no FEA o aumento significativo de consumo de cal dentro da aciaria em estudo.

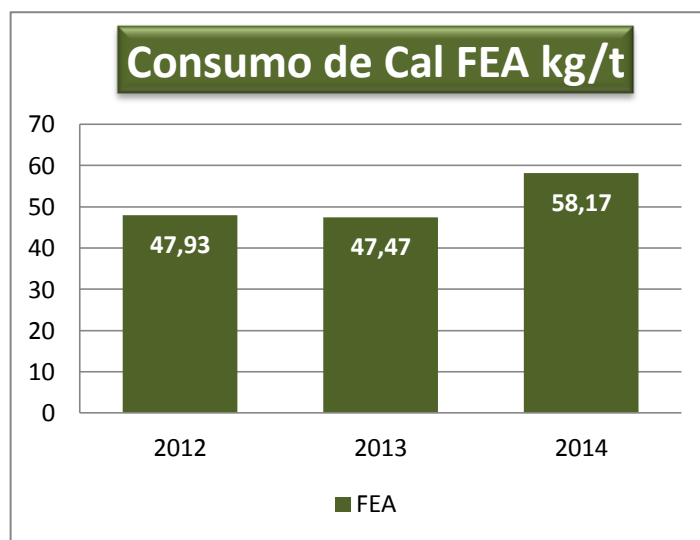


Figura 11. Consumo de cal histórico na Aciaria de 2012-2014 – FEA.

Fonte: Empresa.

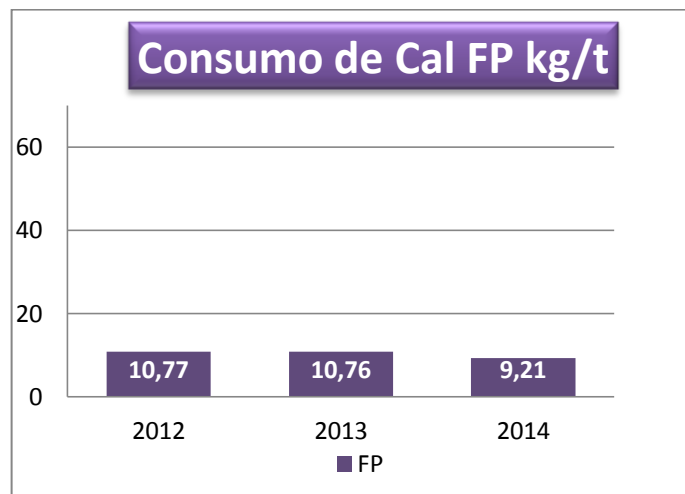


Figura 12. Consumo de cal histórico na Aciaria de 2012-2014 - Forno Panela.

Fonte: Empresa.



Com base nessas informações, foi decidido concentrar as análises e ações de projeto dentro do setor de fusão (FEA), onde houve a mudança de patamar de desempenho e por ser a maior fatia do consumo total do insumo, com 86,4% enquanto o forno panela representou 13,6% (Figura 13). Tendo este conhecimento, os esforços para ganho de desempenho se demonstraram mais promissores nesta etapa de processo. Os comparativos posteriores utilizados têm como período base os meses de maio a setembro de 2014.

A Figura 14 mostra também que há comportamento mensal mais variável no FEA, enquanto o FP se mostrou mais estável no ano de 2014.

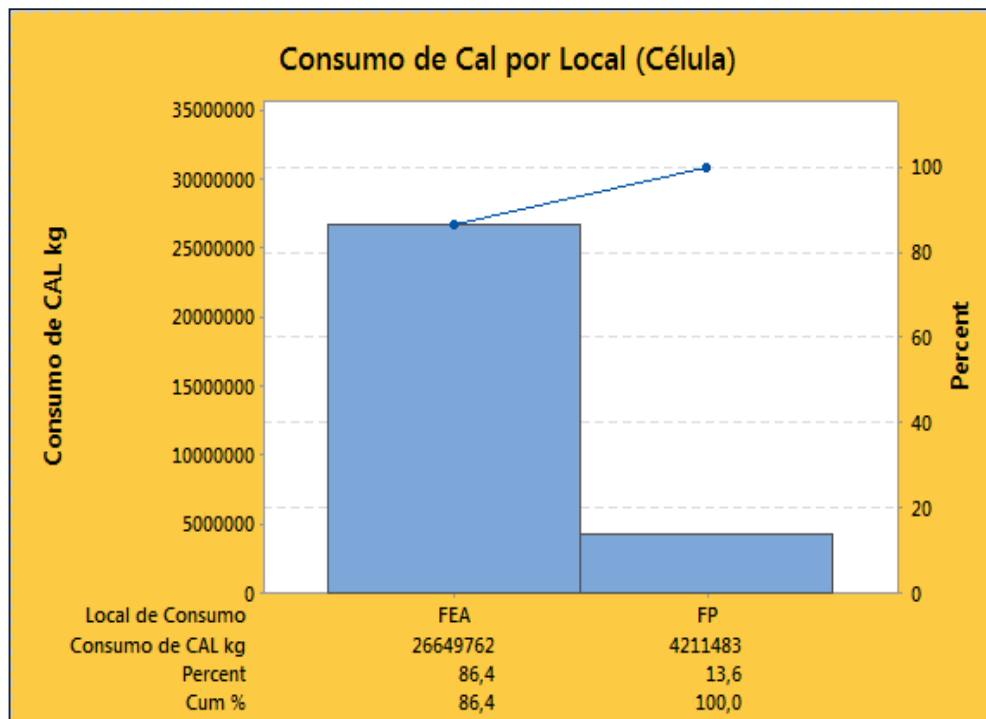


Figura 13. Percentuais de consumo entre FEA e FP 2014.

Fonte: Autor.

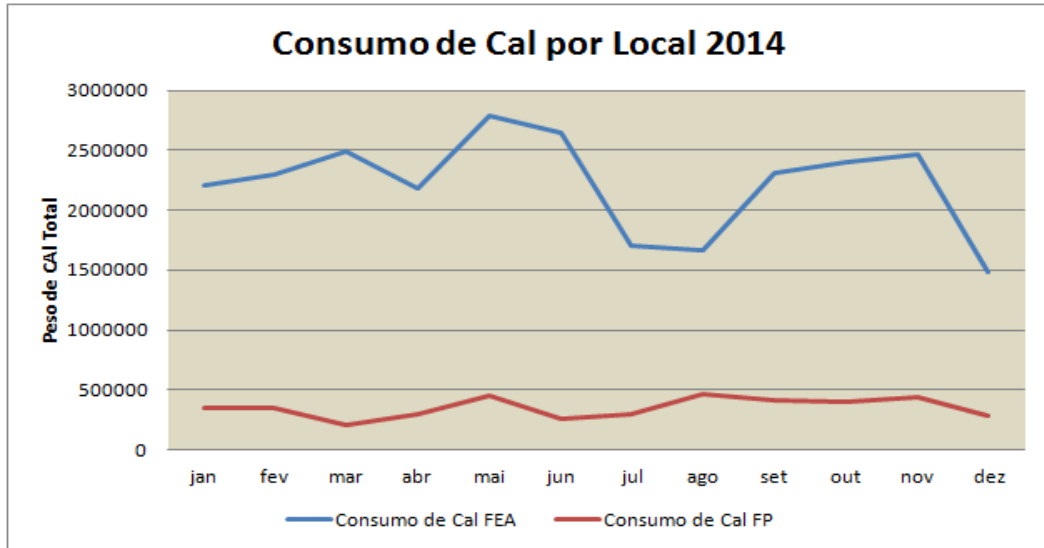


Figura 14. Consumo mensal de cal entre FEA e FP – 2014 (kg).

Fonte: Empresa.

Tomada então a decisão de concentrar os estudos no consumo do FEA, foram necessárias outras análises para poder se descobrir quais seriam as ações necessárias dentro do processo. Dentro do Seis Sigma, isto faz parte da etapa de desdobramento e análise do fenômeno de um problema.

A empresa em questão possui dois fornos elétricos para a etapa de fusão e, para este trabalho serão chamados respectivamente de FEA1 e FEA2. Foi feita então a análise de desempenho por FEA, no intuito de se identificar se tinham formas diferentes de desempenho no consumo.

Com relação à quantidade de consumo total de cal (Figura 15), o FEA1 apresentou maior consumo comparado ao FEA2, mas o gráfico *boxplot* (Figura 16), onde se observa a variabilidade entre os equipamentos de forma comparativa, mostra que o consumo específico dado em kg/corrida é muito semelhante entre ambos, com variabilidade também muito similar, de cerca de 4600 kg a cada corrida performada.

Concluindo-se, entre FEAs não foi encontrado desempenho desigual significante, mas apenas maior volume de produção realizado no FEA1, comprovado no consumo total de cal.

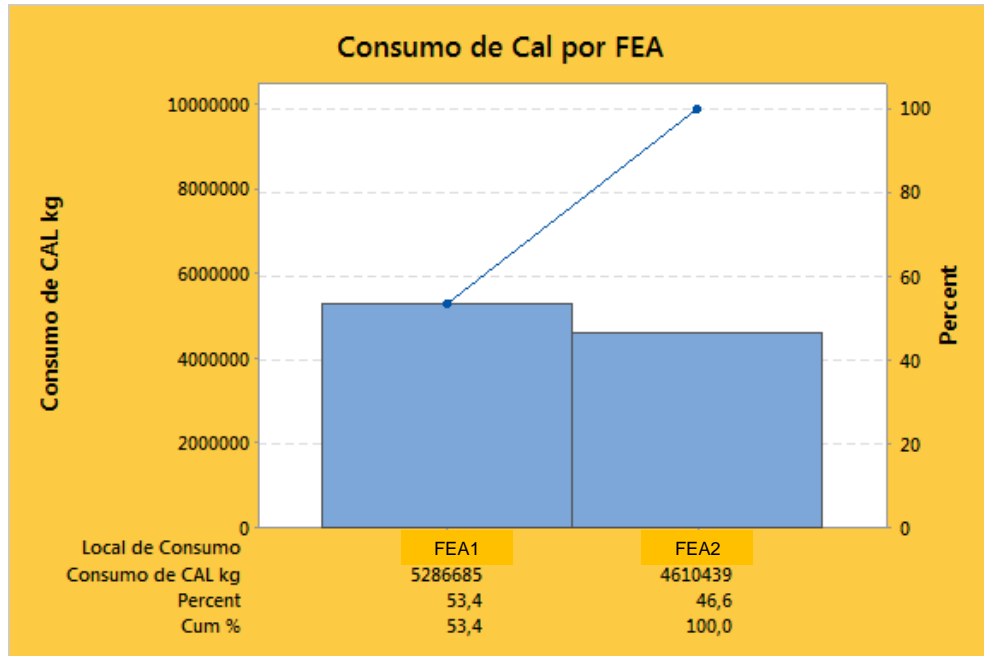


Figura 15. Consumo acumulado no ano por FEA - período base (maio/14-setembro/14).

Fonte: Autor.

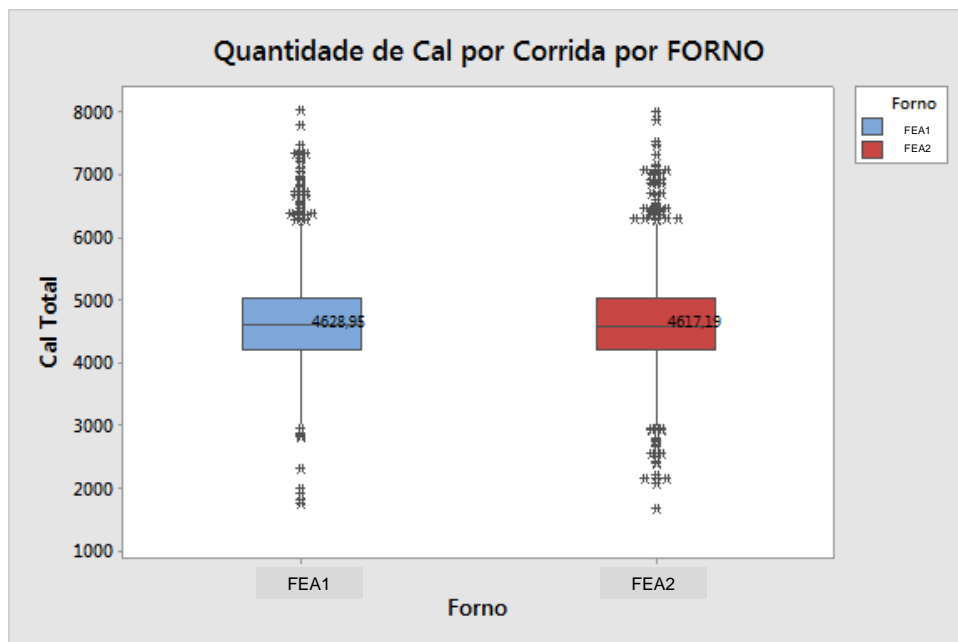


Figura 16. Variabilidade de consumo de cal por corrida entre FEA1 e FEA2.

Fonte: Autor.

Sabendo-se que não havia comportamento diferenciado com relação aos dois FEAs da usina, foram levantados outros comparativos dentro da análise. O próximo foi a análise de consumo

por forneiro, que se diz respeito ao operador do forno elétrico a arco. Para esta análise, foram adotados nomes fictícios de forneiros com base nos dados de forneiros existentes.

O gráfico de colunas abaixo (Figura 17) mostra que em termos de quantidade total consumida no período base, os forneiros João, José, Pedro, Manoel e Carlos são os que utilizaram mais cal para produzir suas corridas. No entanto, isto não mostra exatamente se consumiram mais que os demais por corrida e no caso, consumiram mais por terem produzido mais corridas.

Quando observado o gráfico das médias por corrida (Figura 18) nota-se que Carlos, João e Manoel estão com consumo abaixo da média e há outros forneiros que consomem maiores quantidades por corrida, sendo estes: Marcos, Daniel, Augusto e Joaquim. Portanto, há diferença de forma de trabalho entre forneiros que devem ser tratadas pela equipe de melhoria da empresa. Se estes últimos quatro forneiros citados fossem o padrão de operação da aciaria em estudo, haveria um acréscimo ainda maior no consumo do indicador.

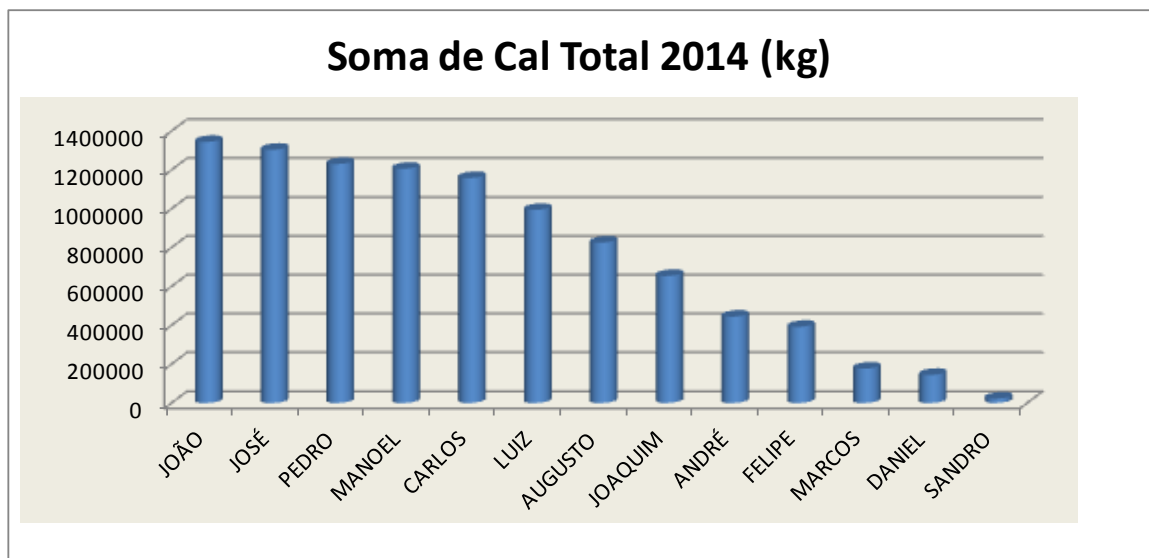


Figura 17. Consumo total de cal por forneiro (kg).

Fonte: Autor.

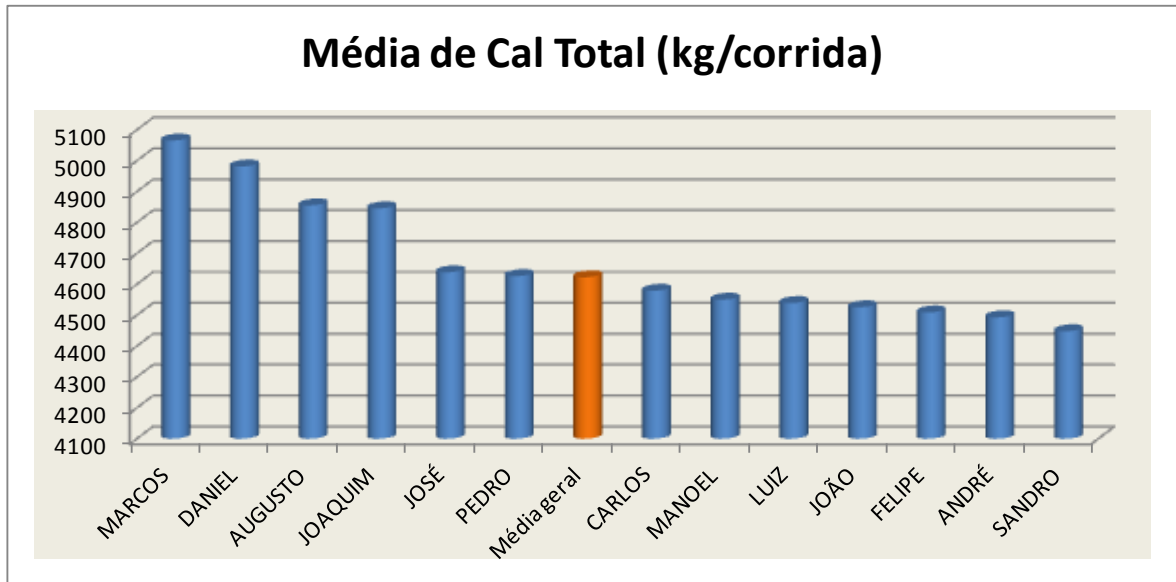


Figura 18. Consumo médio por Forno (kg/t).

Fonte: Autor.

Tendo o conhecimento da diferença de operação entre forneiros, foi feita também a análise de comportamento de consumo entre turnos. A empresa possui três turnos de operação, o turno da noite, o turno do dia e o turno da tarde, cada um tendo 8 horas de jornada. Serão chamados aqui de turnos A, B e C respectivamente.

A Figura 19 demonstra graficamente que as maiores quantidades de cal utilizadas em totais, são respectivamente dos turnos A e B, com 39,9% e 34,2%, seguindo pelo turno C, com 25,6%. Mas, quando se analisa a variabilidade por corrida (Figura 20), o turno C se mostra maior consumidor com uma média de 4864,6 kg/corrida enquanto os demais turnos (A e B) possuem desempenho similar com 4559,75kg/corrida e 4525,91kg/corrida, respectivamente. Em kg/t o turno C tem desempenho 3,8 kg/t a mais que os demais. Joaquim e Augusto, forneiros de consumo acima da média também fazem parte do turno C no levantamento de dados. É fato, portanto, que a prática operacional do turno C deve ser analisada e equalizada de forma similar aos demais turnos ao longo do projeto e deve constar no futuro Plano de Ação, uma das ferramentas a serem utilizadas.

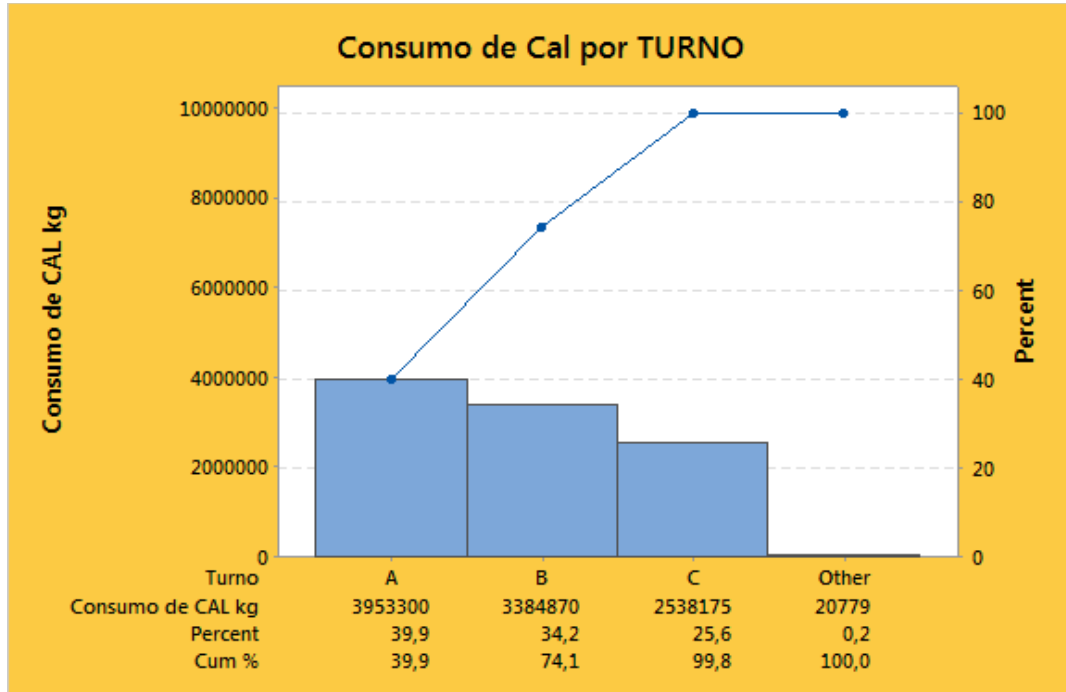


Figura 19. Consumo total de cal por turno no período base (kg).

Fonte: Autor.

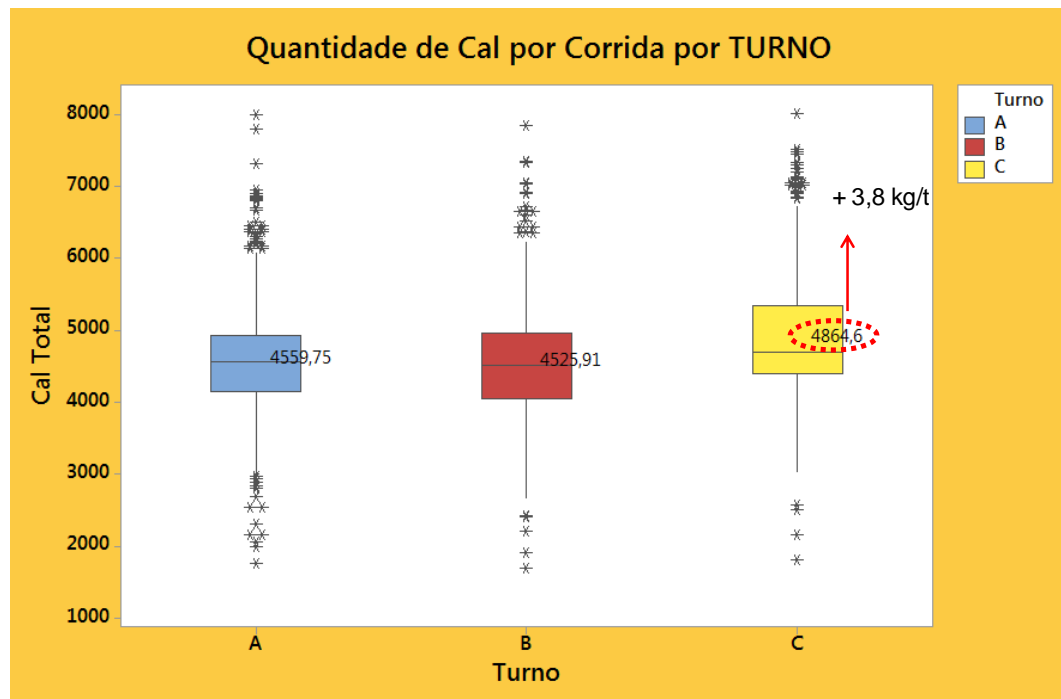


Figura 20. Consumo de cal médio por corrida, por turno (kg/corrida).

Fonte: Autor.

Para se entender a próxima análise em questão, sobre consumo de cal em função de família de P (fósforo) é importante lembrar que existem vários elementos químicos que compõem determinado tipo de aço.

A empresa em questão produz aços de baixa liga em sua maioria e os elementos químicos de sua composição possuem faixas distintas, com limites inferiores e superiores para se atender determinada propriedade mecânica, em função da aplicação a qual o aço será submetido, ou outras restrições relacionadas à qualidade do material.

Quanto menor o teor do P na faixa da composição química do tipo de aço, deverá ser adequado o consumo de cal para que ocorra a desfosforação na escória no processo de refino primário do aço, ou fusão. Em geral, quanto menor o teor de P, maior a quantidade de cal a ser utilizada.

Segundo Bolota (2011), a remoção do fósforo no aço líquido é realizada na interface entre o aço líquido e escória, sendo que um dos elementos da escória é CaO, ou seja, a cal em estudo.

Isto é válido para percentual de 35 a 40% de CaO para que ocorra a fixação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na escória do FEA. Desta forma, para que haja maior desfosforação e aprisionamento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que realiza a retirada de P do banho líquido, é necessária uma quantidade otimizada de cal e temperatura adequada para que a equação se mantenha para a direita, além de quantidade mínima de FeO obtida com oxidação no processo por injeção de O<sub>2</sub>.

Ávila (2009) também demonstra a partir da equação 1 que é necessário oxigênio livre injetado no banho líquido de aço, que, associa-se com o fósforo presente na composição do mesmo, junto com a presença de CaO na escória adicionada no FEA, formando o composto 3CaOP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, resultante da desfosforação. A maior quantidade de fósforo na escória está associada à quantidade de cal e de oxigênio presentes no sistema, formando pentóxido de fósforo. Na equação 2 está descrita a energia livre de Gibbs para a reação.



$$\Delta G = -499190 + 154,16T \text{ (cal/mol)} \quad (2)$$

Com base neste conhecimento, foi levantando o consumo de cal com relação à faixa limite superior de P, que serão chamadas aqui de famílias de P. Na Figura 21 foram levantados os maiores consumos do indicador em relação a estas famílias separadas da seguinte forma:

- P até 0,015% como família P 015;

- P de 0,016% até 0,020% como família P 020;
- P de 0,021% até 0,025% como família P025;
- P de 0,026% até 0,030% como família P 030;
- P de 0,031% até 0,035% como família P 035;
- P de 0,036% até 0,040% como família P 040;
- Famílias de limite superior acima de 0,040% como Outras.

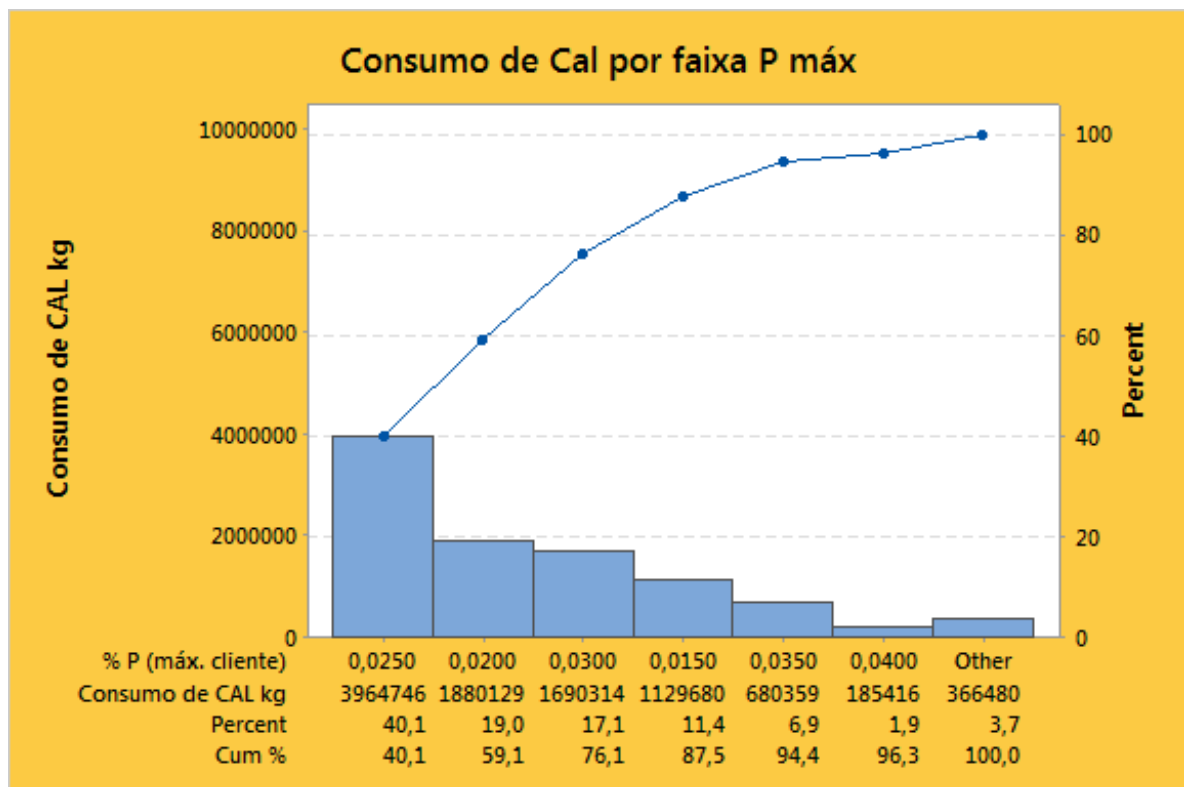


Figura 21. Consumo de cal por família de P.

Fonte: Autor.

Observa-se nos resultados que as três primeiras famílias em consumo no gráfico de Pareto (Figura 21) já formam a relação 80/20 para desdobramento e ataque de ações dentro de um projeto e foram escolhidas para melhores análises na sequência do estudo. A família de P 025, por exemplo, sozinha, já forma 40% da concentração de consumos e volumes de corrida processadas. Foram, portanto priorizadas as famílias de P 025, P 020 e P 030 para melhor análise do problema de consumo.



Conforme foi descrito na equação 2, as quantidades menores de composição química de P no aço, ou seja, as famílias que têm valores menores nos limites máximos têm maior necessidade de adição de cal na escória. Mas como no mix da empresa, os aços, por exemplo, até 0,015% de P formam apenas 11% da carteira de produção, foram escolhidas as famílias de maior volume e peso produtivo para se alcançar o resultado da meta estipulada no início deste projeto. Na Figura 22 estão as famílias com priorização em função de volume em comparação com o total consumido no período base da análise.

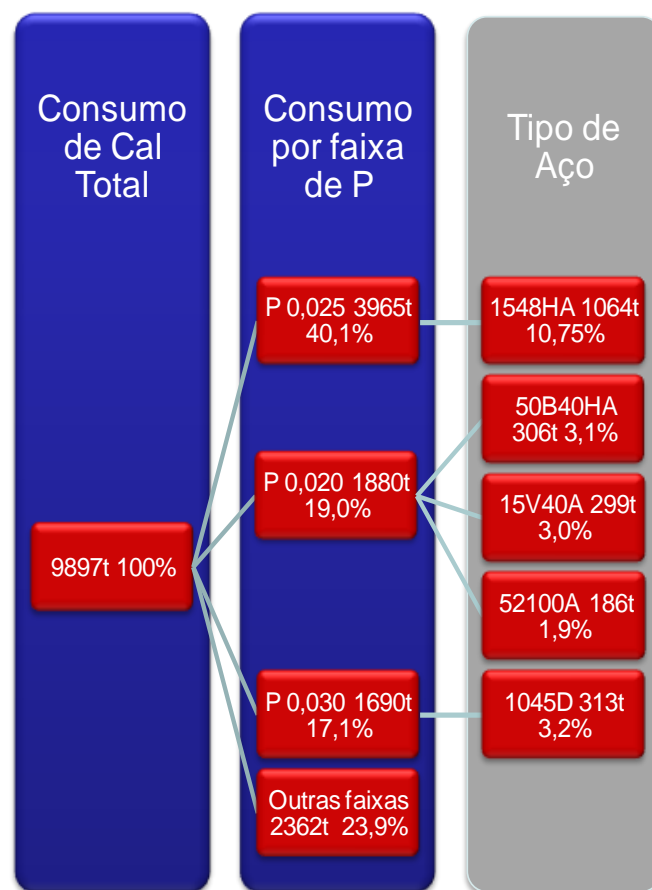


Figura 22. Consumo por família em função do volume total produzido.

Fonte: Autor.

Sendo definidas as famílias de P para aprofundamento de análise, foi então estudada a capacidade de processo para o atendimento ou não das faixas limites de composição química. Foi observada a quantidade de cal que estava em utilização no processo durante o período base de avaliação. Foram encontrados então, os resultados presentes nas Figuras 23, 25 e 27,

respectivamente às famílias de P 025, P 020 e P 030, com utilização do *software* estatístico Minitab, com gráficos em histogramas.

Para a família P 025, na amostra Final foi encontrada uma média de P obtido na amostra final de 0,0138% com desvio padrão de 0,0035% sem as causas especiais.

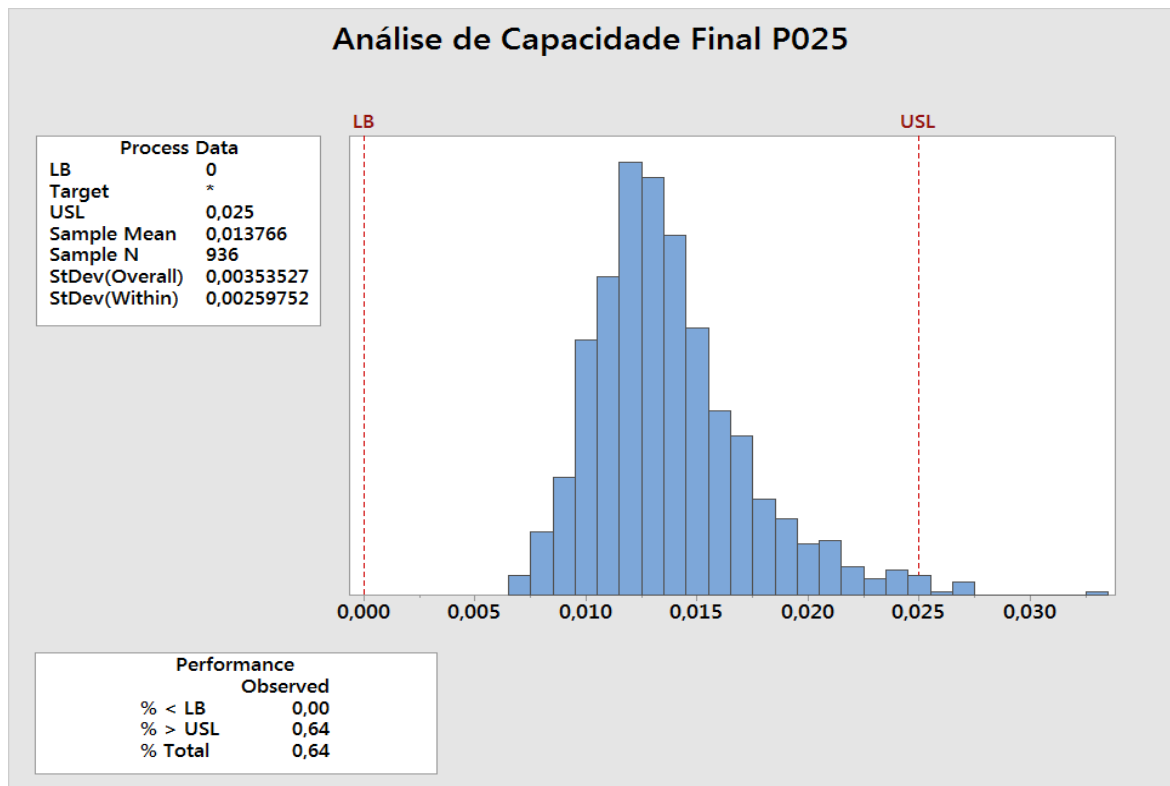


Figura 23. Análise de Capacidade da Família P 025.

Fonte: Autor.

A carta de controle a seguir (Figura 24) mostra que há pontos de causas especiais dentro do processo a serem tratados, referenciados pelos pontos vermelhos.

Observando-se os limites de controle, há margem para leve diminuição da variabilidade para se atender ao LSE (limite superior de especificação).

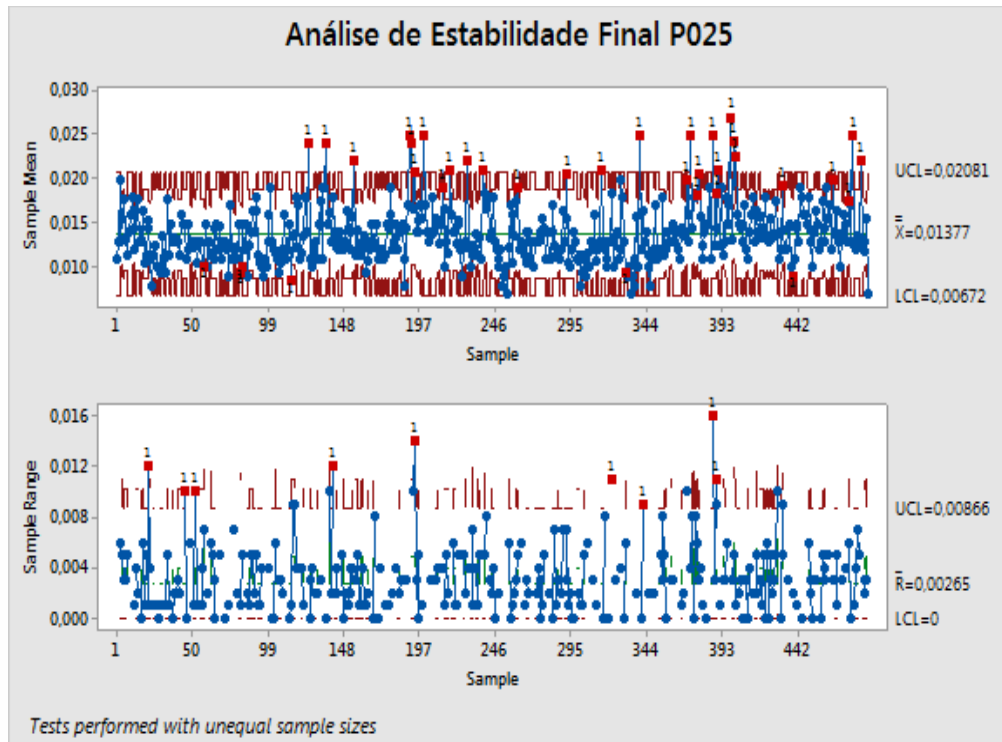


Figura 24. Análise de Estabilidade P 025.

Fonte: Autor.

Já na família P 020, também amostra final, foi encontrada uma média de P obtido na amostra final de 0,0128% com desvio padrão de 0,0033% sem as causas especiais.

Neste caso também há margem para se diminuir um pouco a variabilidade para atendimento do LSE.

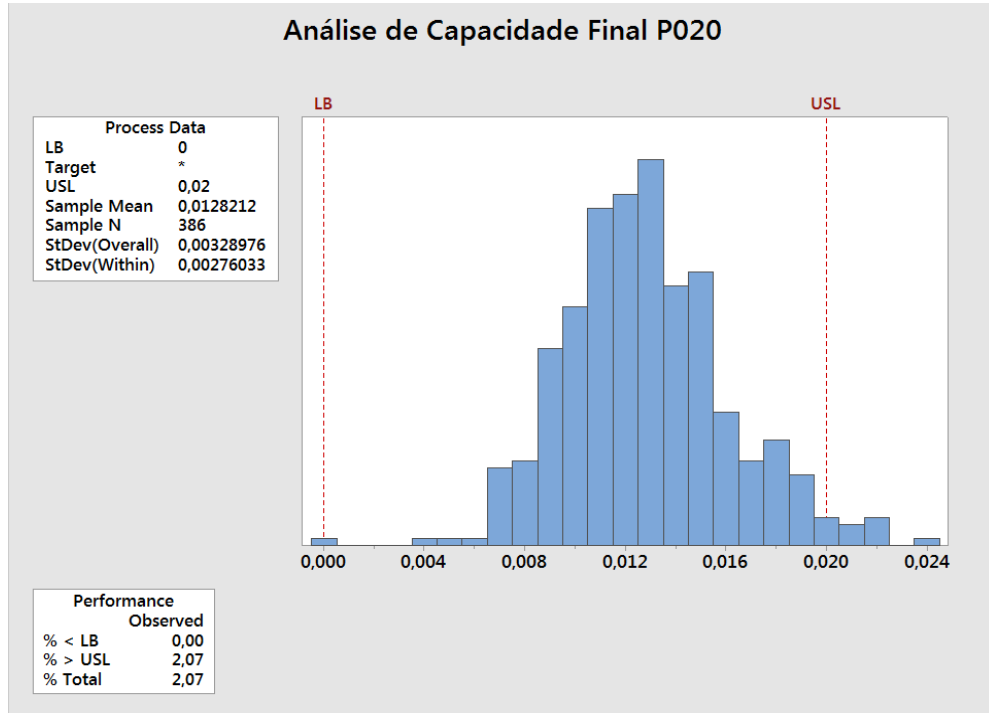


Figura 25. Análise de Capacidade da Família P 020.

Fonte: Autor.

Semelhante à carta de controle anterior, a Figura 26 mostra que também há causas especiais a serem tratadas na família de P 020.

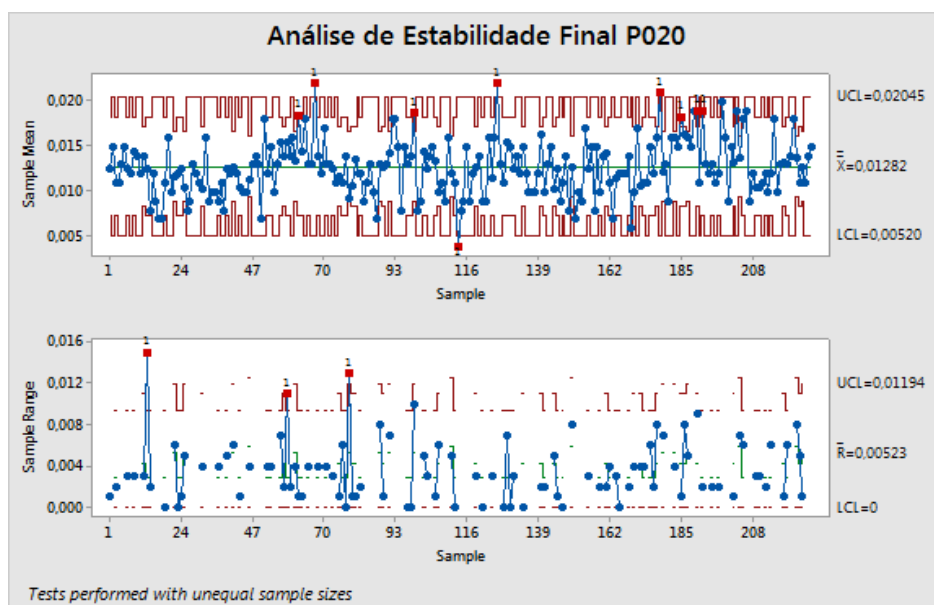


Figura 26. Análise de Estabilidade P 020.

Fonte: Autor.

Abaixo, na Figura 27 é dada a análise de capacidade encontrada para a família P 030.

Para a família P 030, no mesmo tipo de amostra, foi encontrada uma média de P obtido na amostra final de 0,01509% com desvio padrão de 0,00434% retiradas as causas especiais, com causas especiais evidenciadas na Figura 28, semelhante às outras famílias analisadas.

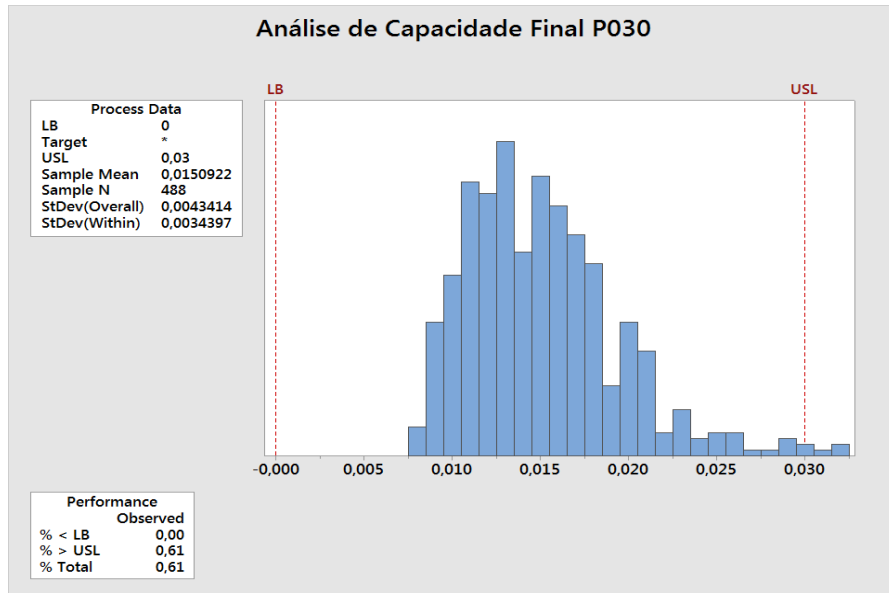


Figura 27. Análise de Capacidade da Família P 030.

Fonte: Autor.

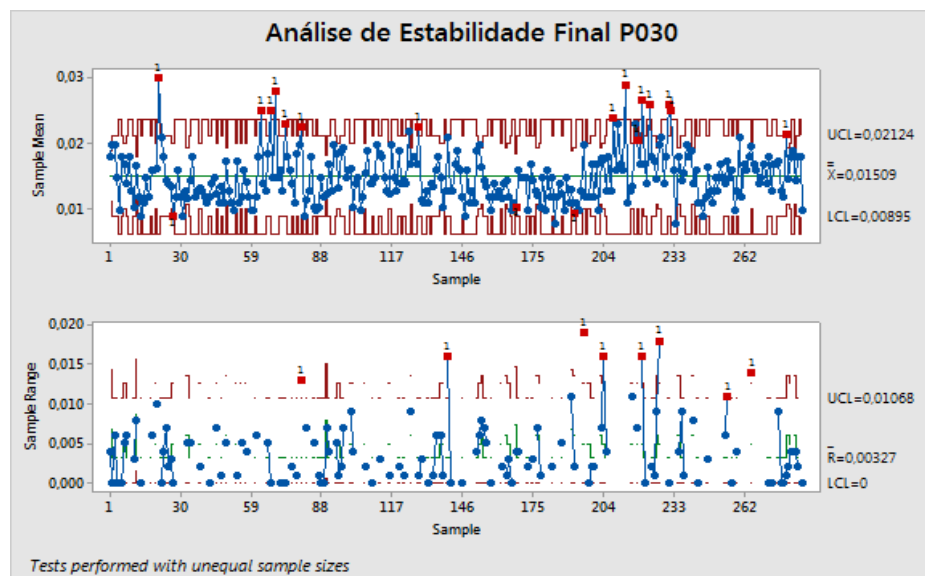


Figura 28. Análise de Estabilidade P 030.

Fonte: Autor.

Ou seja, retirando-se os casos de causas especiais ao processo, a média e desvio padrão encontrados permitem se deslocar a curva do histograma um pouco à direita, reduzindo-se o consumo de cal por família. Os gráficos citados mostram que para alguns casos, onde os resultados são obtidos à esquerda da curva dos histogramas, que se obteve desfosforação acima do que era necessário pelos limites de P para o aço, acarretando em maior consumo.

A diminuição da variabilidade das curvas aparenta ser possível com melhor controle de adição por família de P.

## 5 RESULTADOS

### 5.1. Priorização de Causas Potenciais

Com base nas análises de fenômenos realizadas, foi desenvolvida junto à equipe participante do projeto a priorização das causas potenciais para a determinação posterior de um Plano de ação efetivo para a solução dos problemas com relação ao consumo excessivo de cal. O problema foi ramificado em quatro frentes de ataque (Figura 29).



Figura 29. Ramificação do problema.

Fonte: Autor.

A partir desta ramificação, foi realizado mais um desdobramento de causas potenciais, onde, por meio de *brainstorming*. O objetivo disto é levantar as possibilidades a fim de se chegar às causas fundamentais de cada perna ramificada, utilizando-se o conceito de ‘cinco porquês’. Os cinco porquês tratam-se de perguntas realizadas sobre o motivo de existir determinado problema, conforme FALCONI (1992) e, as respostas que são obtidas a cada pergunta são submetidas a um novo questionamento, até se chegar às causas fundamentais iniciais pra a existência do mesmo.

Nas Tabelas 2 e 3, a seguir, estão descritas as causas levantadas por ramificação e na extremidade direita de cada causa, está descrita a causa raiz encontrada. Para cada causa raiz observada, foi imputada uma nota para a probabilidade de OCORRÊNCIA e GRAVIDADE. Com as notas obtidas por ocorrência e gravidade, foi então aplicado o produto entre elas para se determinar a nota de RISCO. Com as notas de risco determinadas, a equipe pode determinar quais são as causas potenciais do problema que serão testadas e terão itens no plano de ação do projeto.

Tabela 2. Priorização de causas. Parte 1.

Fonte: Autor.

| <i>Matriz de Priorização de Causas</i> |                                                 |                                                       |                                                                       |                                                               | Ocorrência                         | Gravidade | Risco |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------|-------|
| <b>Problema com Consumo de Cal</b>     | <b>Adição de Cal excessiva por família de P</b> | Padrão de adição por bag                              | Bags mau dimensionados                                                | Dimensionamento feito para otimização de frete morto          | 9                                  | 9         | 81    |
|                                        |                                                 |                                                       | Silo de Cal não disponível                                            |                                                               | 9                                  | 9         | 81    |
|                                        |                                                 | Suspeita de SiO <sub>2</sub> na carga                 | Falta de análise de escórias                                          | Operação sem cultura periódica de amostragem                  | 3                                  | 9         | 27    |
|                                        |                                                 |                                                       | Presença de terra nas sucatas                                         |                                                               | 9                                  | 9         | 81    |
|                                        |                                                 | Variabilidade na adição para mesmas famílias          | Desconhecimento operacional de escórias                               | Operação nova na tarefa, sem treinamento                      | 9                                  | 3         | 27    |
|                                        |                                                 |                                                       | Mudança de classe de Aços                                             | Estouro de elementos químicos                                 |                                    | 3         | 9     |
|                                        |                                                 | Indisponibilidade de rota de lingotamento             |                                                                       |                                                               | 3                                  | 3         | 9     |
|                                        | <b>Retrabalho de P no FEA</b>                   | Padrão de Retrabalho inadequado                       | Faixas de retrabalho não atualizadas com a variabilidade e capacidade |                                                               | 9                                  | 9         | 81    |
|                                        |                                                 |                                                       | Novos aços não inclusos na tabela                                     |                                                               | 3                                  | 9         | 27    |
|                                        |                                                 | Cal adicionada toda no 1.º cesto                      | Operação alterou forma de adição por praticidade em 2014              |                                                               | 9                                  | 5         | 45    |
|                                        |                                                 |                                                       | Diferentes formas de retrabalho entre operadores                      | Operadores sem conhecimento de escórias                       | Maioria da operação nova na tarefa | 9         | 9     |
|                                        |                                                 | Diferença de trabalho entre turnos                    |                                                                       | Falta de detalhamento da etapa de refino primário             | 9                                  | 5         | 45    |
|                                        |                                                 | Sucata com alto teor de impurezas                     | Falta de recheio e processamento                                      | Falta de disponibilidade de pontes do Pátio MP por manutenção | 9                                  | 9         | 81    |
|                                        |                                                 |                                                       | Falta de análise de SiO <sub>2</sub> para confirmação na escória      |                                                               | 9                                  | 5         | 45    |
|                                        |                                                 | Potencial de desfosforação da escória não aproveitado | Taxa de oxidação inadequada no FEA.                                   |                                                               | 9                                  | 9         | 81    |

Tabela 3. Priorização de causas. Parte 2.

Fonte: Autor.

| <i>Matriz de Priorização de Causas (continuação)</i> |                                         |                                                                   |                                                            | Ocorrência                                         | Gravidade                    | Risco |    |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|-------|----|
| <b>Problema com consumo de Cal</b>                   | <b>Problemas com reatividade da Cal</b> | Falta de FIFO                                                     | Descarregamento feito direto no mesanino para ganhar tempo | 5                                                  | 5                            | 25    |    |
|                                                      |                                         |                                                                   | Falta de identificação de lotes junto aos bags             | 3                                                  | 5                            | 15    |    |
|                                                      |                                         | Reatividade diferente entre bags de rafia e de PVC                | Bags de rafia mais expostos à umidade                      | Característica de maior permeabilidade do material | 5                            | 9     | 45 |
|                                                      |                                         |                                                                   | Acondicionamento inadequado dos bags                       | Colocados em exposição à chuva                     | Falta de local com cobertura | 9     | 9  |
|                                                      |                                         | Falta de cobertura com lona e sem uso de palete                   |                                                            |                                                    | 5                            | 9     | 45 |
|                                                      |                                         | Pouca amostragem de cal                                           | Descumprimento de % de amostragens                         | Dimensionamento do QL de Pátio                     | 3                            | 3     | 9  |
|                                                      | Padrão não exige amostragem adequada    |                                                                   | Falta de abordagem analítica                               | 3                                                  | 9                            | 27    |    |
|                                                      | <b>Não utilização de Silo de Cal</b>    | Falta de interligação entre pontes AC18 e AC19 para abastecimento | Falta de complemento de viga para AC19                     |                                                    | 9                            | 9     | 81 |
|                                                      |                                         |                                                                   | Limitação de QL no FEA                                     |                                                    | 3                            | 9     | 27 |
|                                                      |                                         | Proteção contra dispersão de particulado de cal danificada        | Falha Operacional CDM em movimento de balança              | Falta de bloqueio elétrico de movimentos           | 5                            | 9     | 45 |
|                                                      |                                         |                                                                   | Falta de borracha de vedação                               |                                                    | 5                            | 9     | 45 |
|                                                      |                                         | Falta de padrão com faixas de trabalho por peso e não por bag     | Operação em desenvolvimento                                |                                                    | 9                            | 9     | 81 |

Como descrito na matriz de priorização de causas, as causas dadas como as de maiores fatores de risco foram:

- Dimensionamento de bags de cal feitos para otimização de frete morto;
- Silo de cal não disponível;
- Presença de terra na sucata, matéria prima;
- Faixas de retrabalho de cal no FEA não atualizadas com variabilidade e capacidade de processo;
- Maioria da operação nova na realização de tarefa;
- Falta de disponibilidade de pontes no pátio de matéria prima para limpeza de terra na sucata;
- Taxa de oxidação inadequada no FEA;
- Falta de cobertura adequada para armazenamento de bags de cal;
- Falta de complemento de viga para interligação de pontes para utilização de silo de cal;
- Operação de abastecimento de silo de cal em desenvolvimento.



Conhecendo-se então quais são as causas potenciais principais do processo, o passo seguinte, descrito no próximo tópico deste projeto, foi a realização de testes para a análise da efetividade dos fatores levantados são ou não mesmo causais do problema: análise de fatores causais.

## 5.2. Análise de Fatores Causais

Nesta etapa do projeto Seis Sigma, são analisadas as causas levantadas e priorizadas para se descobrir se são mesmo efetivas para a existência do problema. O objetivo é o de não gerar ações para causas, sem antes comprovar se tem mesmo efeito, para não se gastar tempo e dinheiro em ações desnecessárias.

Para explicar a forma de análise que foi realizada, abaixo, na Tabela 4 estão descritas as quatro causas mais efetivas levantadas e como foi realizada a análise de fatores causais. Foram levantadas as condições atuais em relação com as especificações ideais para cada fator.

Tabela 4. Análise de Fatores Causais.

Fonte: Autor.

| Possível Causa                                                        | Especificação ou Condição ideal              | Valor ou condição Atual                                                                         | É provável fator causal ? | Teste aplicável?      | É fator causal ? | Ações ligadas |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|---------------|
| Presença de terra nas sucatas                                         | Média de 14% de SiO <sub>2</sub> na escória. | Feito levantamento de análises de escória de 2015 para avaliação de % de SiO <sub>2</sub> .     | Sim                       | Análises de Escória   | Não Atualmente   | 1             |
| Dimensionamento feito para otimização de frete morto                  | Variabilidade de 20% em relação ao padrão    | Alta variabilidade na família P025 para objetivado 4000kg enas demais famílias, semelhantemente | Sim                       | Histograma demonstrou | Sim              | 3             |
| Faixas de retrabalho não atualizadas com a variabilidade e capacidade | Máximo de 5% de Retrabalho                   | Retrabalhos realizados por faixas apertadas, desconsiderando taxas de reversão real             | Sim                       | Sim (Interval Plot)   | Sim              | 1             |
| Silo de Cal Não Disponível                                            | Variabilidade de 20% em relação ao padrão    | Ideal a utilização da Faixa mínima de peso na Adição                                            | Sim                       | Histograma demonstrou | Sim              | 3             |

Para a causa potencial ‘presença de terra nas sucatas’ foram levantadas as análises de escórias obtidas no forno elétrico nas amostras antes de vazamento das corridas, ou seja, no final de processo de fusão. O teor de  $\text{SiO}_2$ , ou seja, sílica, na escória evidencia a presença ou não de quantidades excessivas de terra na sucata, matéria prima para a produção de aço no FEA.

Apesar dos teores um pouco mais elevados nos meses de março e abril de 2015, a qualidade da sucata utilizada no processo mostrou-se mais limpa do que se supunha no início da análise de causas, Figura 30. Foi constatado que o processo mecânico de separação e limpeza de terra no pátio de matéria prima da empresa estava adequado à necessidade de processo visto que foram obtidos valores médios abaixo de 14% na grande maioria das escórias submetidas à análise. Portanto, este fator não se mostrou efetivo no problema e não foi priorizado para Plano de ação.

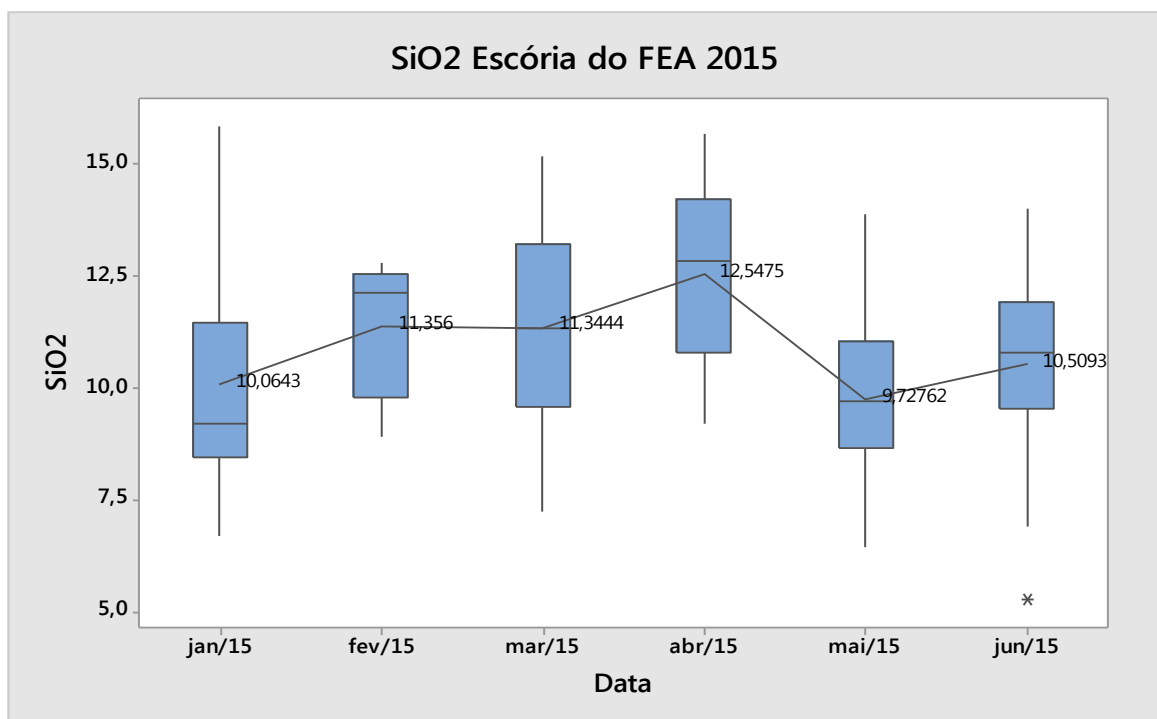


Figura 30. Análise de sílica na escória – 1º semestre de 2015.

Fonte: Autor.

Com relação ao problema do ‘dimensionamento feito para a otimização de frete morto’ foi levantado que o departamento de suprimentos da empresa realizou no ano de 2014 um redimensionamento dos bags de cal de aproximadamente 1000 kg para 1200 kg a fim de se otimizar o carregamento de cada caminhão em relação ao peso utilizado por volume útil de

carga. Como as tabelas de adição de cal determinavam a quantidade de adição à carga por quantidade de bags na época, o consumo de cal aumentou respectivamente em cerca de 200 kg por *bag*, o que é demonstrado pelo histograma da Figura 31.

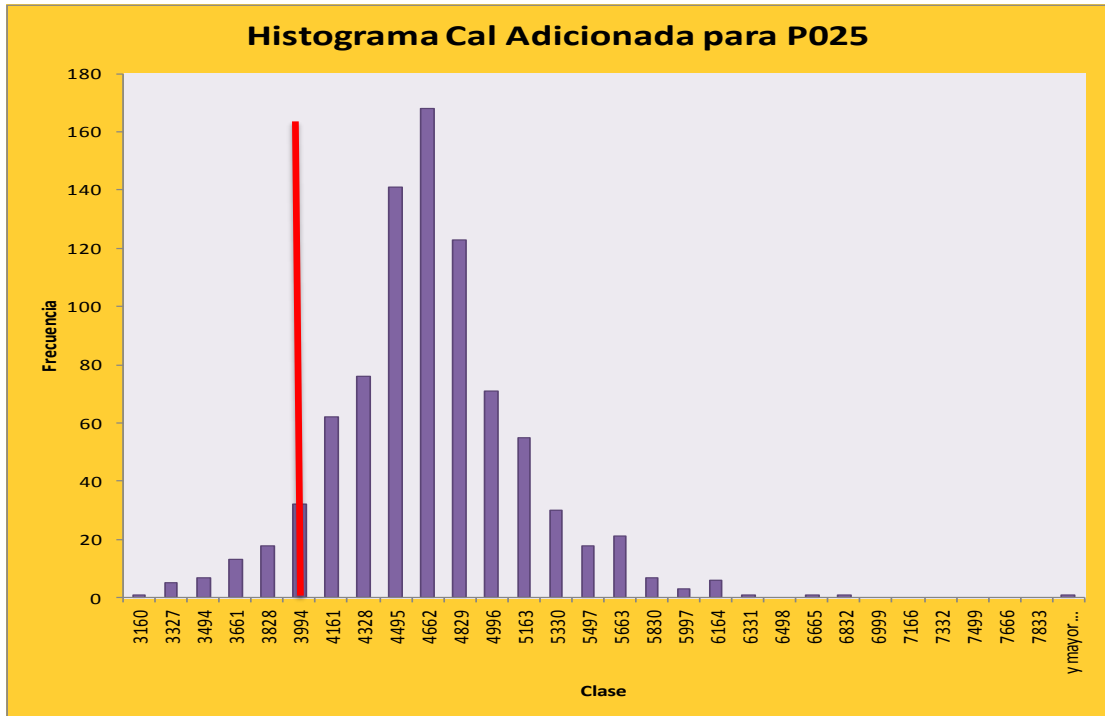


Figura 31. Histograma de consumo de cal para família de P 025.

Fonte: Autor.

A linha vermelha do gráfico demonstra aproximadamente qual seria a faixa de peso de cal para a família de P 0,025%, por volta de 4 t. Com o ajuste de peso de *bag* para 1200 kg, a carga para este tipo de aço passou então a compor cerca de 4800 kg como demonstra a curva de consumo real dada pelo histograma. Ou seja, este problema, com a análise mostrada foi dado como efetivo e sujeito a ações de correção. Também se observa que a alteração realizada pelo departamento de suprimentos precisava de maior análise de impactos no consumo.

Para o problema de ‘faixas de retrabalho não atualizadas com variabilidade e capacidade’ foram feitas análises de escória para estudar comportamento dos percentuais de P entre as etapas de pré-vazamento, aço vazado na panela e resultado de análise final, a fim de se observar o grau de reversão de P entre elas. Como visto no início deste trabalho, a desfosforação, ou seja, a retirada de P do banho líquido do aço depende da quantidade de cal presente na escória e da quantidade de O<sub>2</sub> presente no sistema, ou seja, de oxidação.

Ambientes menos oxidantes, tendendo a redutores causam a reincorporação de P da escória para o banho líquido de aço, o que é dado como reversão de P.

Nas análises realizadas, a amostra pré-vazamento foi chamada de P FEA, a amostra de aço vazado na panela foi chamada de P Refino e a amostra final de toda cadeia de processo foi denominada Final.

O gráfico de intervalos da Figura 32 mostra variação de reversão de P entre as etapas avaliadas nas análises de escória e mostra que em média a variação de P entre etapas de vazamento e final ficou em cerca de 0,0083%, com variabilidade menor que 0,001% em 95% da população analisada.

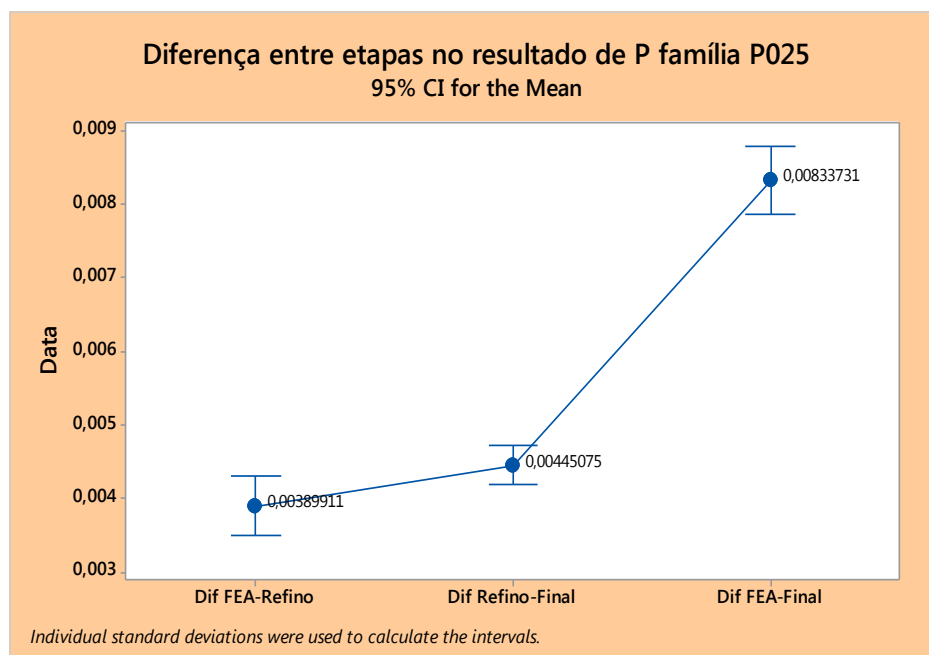


Figura 32. Diferença entre etapas no resultado de P, família P025.

Fonte: Autor.

Já o gráfico da Figura 33 mostra o valor absoluto obtido de P e sua variabilidade em cada etapa de processo analisada. O resultado mostra que para 95% da população da família P 025, o valor médio de entrega de percentual de P é de cerca de 0,0179% com variabilidade menor que 0,001% de P. Para um limite máximo de 0,025% de P, conclui-se que o processo está superdimensionado com relação à quantidade de cal utilizada, podendo ser otimizada para menos, deslocando-se a média para a direita graficamente.

Outro problema no processo é a questão do gatilho para retrabalho de P utilizado no processo do FEA. Se a amostra de P no FEA não atingir um valor mínimo antes do vazamento, o operador adiciona cal extra no final do processo e realiza o que é chamado de retrabalho de P, ligando o forno novamente e formando nova escória com a nova cal adicionada, a fim de se extrair mais P do metal líquido. Os resultados obtidos mostram que estes gatilhos para retrabalho devem ser revistos pelo grau de reversão que ocorre entre etapa de amostra no FEA e amostra no Refino, na panela de aço, no vazamento.

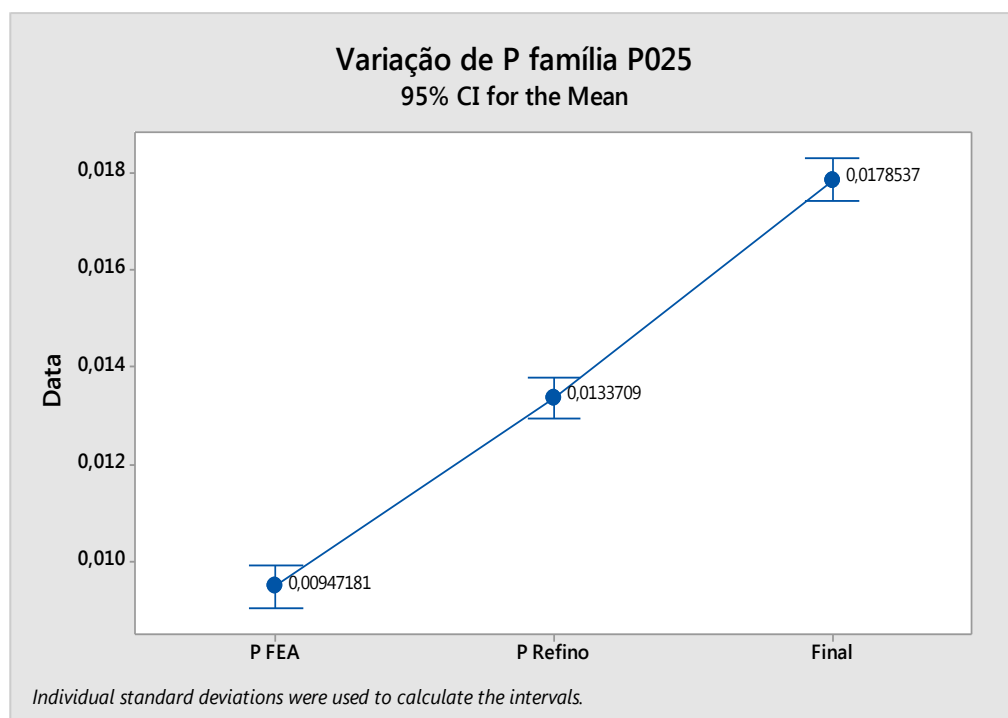


Figura 33. Variação de P por etapa de processo, família P025.

Fonte: Autor.

A mesma análise foi realizada com as famílias de P020 e P015 (Figuras 34 e 35) e foram obtidos valores de média final respectivos de 0,0146% de P e 0,0109% de P com variabilidade similar para 95% da população. Os resultados obtidos validam a possibilidade de redução da adição de cal por tipo de família, dando a esta causa potencial a viabilidade de inserção de ações de modificação de receita de adição de cal por família no projeto.

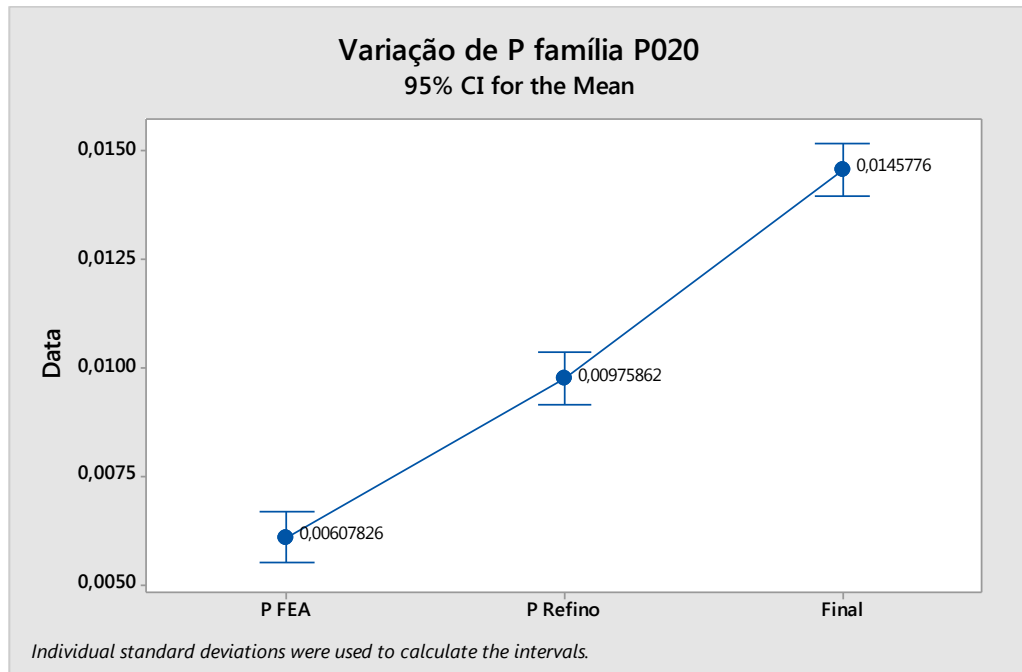


Figura 34. Variação de P por etapa de processo, família P020.

Fonte: Autor.

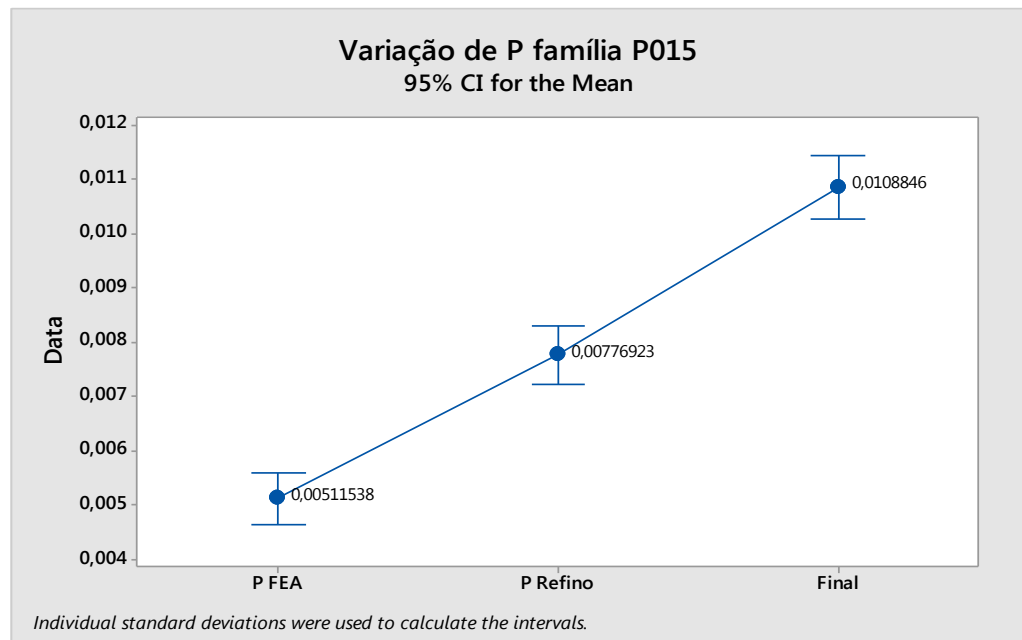


Figura 35. Variação de P por etapa de processo, família P015.

Fonte: Autor.

Com relação ao problema levantado ‘silo de cal não disponível’, foi observado que este equipamento destinado à adição fracionada de cal à carga, estava parado por questão de algumas limitações de manutenção e falta de adaptações entre pontes rolantes de abastecimento. Duas pontes utilizadas para o manuseio precisavam de uma interligação entre

vigas para poder permitir o correto manuseio de bags de cal para realização do carregamento e abastecimento do silo. Com capacidade de cerca de 80 t de cal, cada, sendo dois silos previamente instalados para uso do forno elétrico a arco. A utilização de silo de cal permite o fracionamento adequado e mais preciso do peso de material a ser inserido na carga, sendo assim, é fator importante para a redução do consumo e assertividade.

Outro ponto testado foi com relação ao potencial de desfosforação da escória utilizada no período, formando o composto  $P_2O_5$ . BOCK (2008) afirma e evidencia nos resultados que obteve em seu experimento com desfosforação, em vários aços observados que, para se obter P baixo na composição química do aço, a escória deve conter % de  $P_2O_5$  abaixo de 1,2%, caso o contrário, o potencial de desfosforação será prejudicado pelo grau de saturação deste composto na mesma.

Na análise de escórias realizadas neste trabalho foram obtidos resultados com relação ao percentual de  $P_2O_5$  da Figura 36. Na grande maioria das corridas do primeiro semestre de 2015, os valores de  $P_2O_5$  se mostraram inferiores a 1,2%, o que demonstra não estar saturada a escória deste composto, havendo capacidade de desfosforação não aproveitada. Isto evidencia cal excessiva na escória, sem aproveitamento adequado na desfosforação. Por esta análise, é viável o ajuste da oxidação adequada no processo e é possível a redução da cal utilizada na receita.

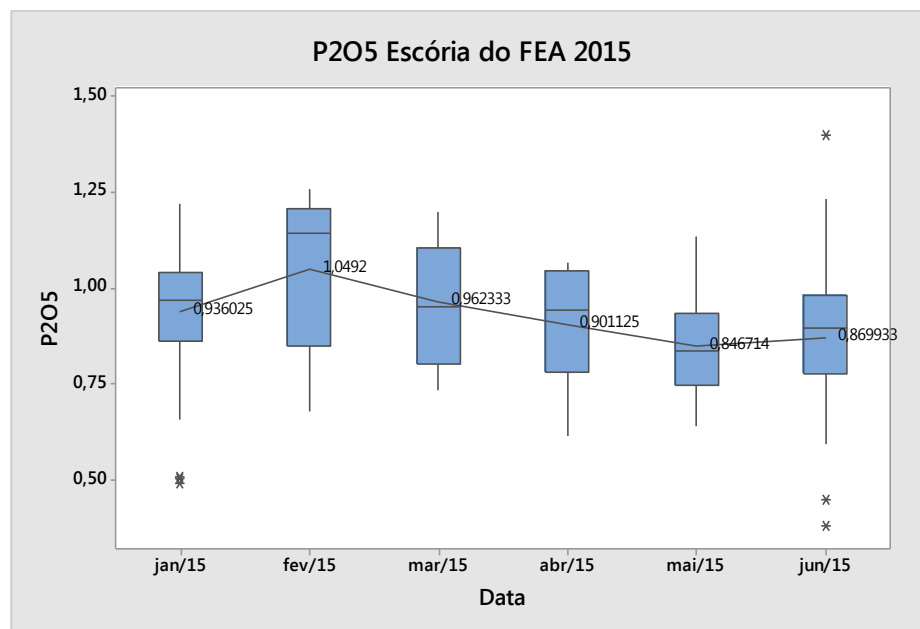


Figura 36. Percentual de  $P_2O_5$  na escória do FEA, 1º semestre de 2015.

Fonte: Autor.

### 5.3. Definição do Plano de Ação

Concluída a análise da influência dos principais fatores causais para a ocorrência do consumo elevado de cal, foi definido e traçado o plano de ação para a tentativa de diminuição de consumo de cal no processo de fusão primária da Aciaria em estudo.

As ações desenvolvidas foram:

- Reduzir a quantidade de cal adicionada por família de P com base nos dados de capacidade observados;
- Realizar prolongamento entre vigas de pontes rolantes para viabilizar carregamento de silo de cal;
- Utilização de mini bags de 500-700 kg de cal para promover facilidade de fracionamento de cal quando impossibilitado o uso do silo de cal e sem perder ganhos com trabalho realizado por suprimentos com relação ao frete morto;
- Realizar treinamento sobre escórias com equipe operacional dos FEAs, em especial para turnos A e C;
- Criação de procedimento contemplando faixas de peso mínimo e máximo de cal por tipo de família de P, não descrevendo adição apenas em bags;
- Adequação de faixas de retrabalho de P no FEA, com aumento do valor de gatilho de % de P para necessidade de realização desta operação.

A Tabela 5 mostra o procedimento utilizado antes do projeto para carga de cal no FEA, impactando o resultado, como citado anteriormente, pela alteração no padrão de tamanho de bags de cal de 1000 kg para 1200 kg por Suprimentos. Foi substituído pelo procedimento da Tabela 6 após análise deste projeto, que contempla também a possibilidade do uso de *bags* de 1200 kg no seu ajuste de faixas de peso por família, caso seja necessário, por indisponibilidade do silo de cal.

Mas, o mais importante, foi realizada a diminuição das faixas de peso de cal com base no estudo de capacidade de processo por família de P.



Tabela 5. Tabela de adição de cal antes do projeto.

Fonte: Empresa.

| Padrão de Adição de Cal à Carga do FEA (obsoleto) |       |                |                    |
|---------------------------------------------------|-------|----------------|--------------------|
| P máx.                                            |       | Peso de Cal kg | Quantidade de bags |
| DE                                                | ATÉ   | mín.           |                    |
| 0,000                                             | 0,012 | 6000           | 6                  |
| 0,013                                             | 0,015 | 6000           | 6                  |
| 0,016                                             | 0,020 | 5000           | 5                  |
| 0,021                                             | 0,025 | 4000           | 4                  |
| 0,026                                             | 0,030 | 3000           | 3                  |
| 0,031                                             | 0,035 | 3000           | 3                  |
| 0,036                                             | >     | 2000           | 2                  |

Tabela 6. Procedimento de adição de cal após projeto.

Fonte: Autor.

| Padrão de Adição de Cal à Carga do FEA |       |                |      |                                                               |              |              |  |
|----------------------------------------|-------|----------------|------|---------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--|
| P máx.                                 |       | Peso de Cal kg |      | Quantidade de bags de 900 a 1200 kg ou mini bag (500 a 600kg) |              |              |  |
| DE                                     | ATÉ   | mín.           | máx. | 1º Cesto                                                      |              | 2º Cesto     |  |
| 0,000                                  | 0,012 | 5000           | 6000 | 2 Calcíticas                                                  | 1 Dolomítica | 2 Calcíticas |  |
| 0,013                                  | 0,015 | 4000           | 4800 | 2 Calcíticas                                                  |              | 2 Calcíticas |  |
| 0,016                                  | 0,020 | 3800           | 4500 | 2 Calcíticas                                                  |              | 2 Calcíticas |  |
| 0,021                                  | 0,025 | 2800           | 3600 | 1 Dolomítica                                                  | 1 Calcítica  | 1 Calcítica  |  |
| 0,026                                  | 0,030 | 2500           | 3200 | 1 Dolomítica                                                  | 1 Calcítica  | 1 Calcítica  |  |
| 0,031                                  | 0,035 | 2200           | 2600 | 1 Dolomítica                                                  | 1 Calcítica  |              |  |
| 0,036                                  | >     | 2000           | 2400 | 1 Dolomítica                                                  | 1 Calcítica  |              |  |

A Figura 37 mostra a interligação realizada entre as duas pontes rolantes que são responsáveis pelo abastecimento do silo, o que favoreceu o manuseio dos bags entre elas para o abastecimento do mesmo. Com o silo de cal, o fracionamento das quantidades é permitido, não dependendo mais o carregamento do tamanho dos bags que são fornecidos à empresa.



Figura 37. Prolongamento de vigas entre pontes.

Fonte: Autor.

A utilização de mini bags favoreceu também o fracionamento da carga em momentos de indisponibilidade do uso do silo por questões operacionais ou de manutenção (Figura 38), de modo a se cumprir o novo procedimento adotado para faixas de adição por família de P.



Figura 38. À esquerda, mini bag e, à direita, bag normal.

Fonte: Autor.

As Tabelas 7 e 8 são respectivamente as utilizadas nos procedimentos de gatilho para realização de retrabalhos com adição extra de cal, antes e depois do projeto.

A nova Tabela (8) permite uma maior tolerância para a tomada de decisão para se adicionar cal extra, em função dos testes realizados terem mostrado que as taxas de reversão são capazes para isto.

Tabela 7. Procedimento de gatilho de retrabalho de P antes do projeto.

Fonte: Empresa.

ANTES DO PROJETO

**Controle de retrabalho de P no FEA**

| Ação em função da Amostra de P no FEA                                                                                                                                |                  | Limite de P (Pmáx) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P máx do aço                                                                                                                                                         | Limite           | Acima de 0,060     | 0,060 | 0,050 | 0,045 | 0,040 | 0,035 | 0,030 | 0,028 | 0,025 | 0,020 | 0,018 | 0,015 | 0,012 |
| P Objetivado na amostra do FEA - VAZAR.                                                                                                                              | Menor ou igual a | Livre              | 0,032 | 0,025 | 0,021 | 0,019 | 0,014 | 0,013 | 0,014 | 0,012 | 0,008 | 0,006 | 0,005 | 0,004 |
| P na amostra do FEA - Forçar retirada de escória pela porta, Esperar 3 min antes de vaziar e inibir passagem de escória no vazamento. Vaziar NO LIMITE MÁXIMO DE O2. | Entre            | Livre              | 0,033 | 0,026 | 0,022 | 0,020 | 0,015 | 0,014 | 0,015 | 0,013 | 0,009 | 0,007 | 0,006 | 0,005 |
|                                                                                                                                                                      |                  | Livre              | 0,038 | 0,029 | 0,026 | 0,023 | 0,019 | 0,017 | 0,017 | 0,015 | 0,011 | 0,009 | 0,007 | 0,006 |
| P na amostra do FEA - Retrabalhar P adicionando 1 bag de Cal. Vaziar no LIMITE MÁXIMO DE O2.                                                                         | Maior ou igual   | Livre              | 0,039 | 0,030 | 0,027 | 0,024 | 0,020 | 0,018 | 0,018 | 0,016 | 0,012 | 0,010 | 0,008 | 0,007 |

Tabela 8. Procedimento de gatilho para retrabalho de P após projeto.

Fonte: Autor.

DEPOIS DO PROJETO

**Controle de retrabalho de P no FEA**

| Ação em função da Amostra de P no FEA                                                                                                                                |                  | Limite de P (Pmáx) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P máx do aço                                                                                                                                                         | Limite           | Acima de 0,060     | 0,060 | 0,050 | 0,045 | 0,040 | 0,035 | 0,030 | 0,028 | 0,025 | 0,020 | 0,018 | 0,015 | 0,012 |
| P Objetivado na amostra do FEA - VAZAR.                                                                                                                              | Menor ou igual a | Livre              | 0,035 | 0,028 | 0,024 | 0,022 | 0,017 | 0,016 | 0,016 | 0,014 | 0,010 | 0,008 | 0,006 | 0,005 |
| P na amostra do FEA - Forçar retirada de escória pela porta, Esperar 3 min antes de vaziar e inibir passagem de escória no vazamento. Vaziar NO LIMITE MÁXIMO DE O2. | Entre            | Livre              | 0,036 | 0,029 | 0,025 | 0,023 | 0,018 | 0,017 | 0,017 | 0,015 | 0,011 | 0,009 | 0,007 | 0,006 |
|                                                                                                                                                                      |                  | Livre              | 0,041 | 0,032 | 0,029 | 0,026 | 0,022 | 0,020 | 0,019 | 0,017 | 0,013 | 0,011 | 0,008 | 0,007 |
| P na amostra do FEA - Retrabalhar P adicionando 1 bag de Cal. Vaziar no LIMITE MÁXIMO DE O2.                                                                         | Maior ou igual   | Livre              | 0,042 | 0,033 | 0,030 | 0,027 | 0,023 | 0,021 | 0,020 | 0,018 | 0,014 | 0,012 | 0,009 | 0,008 |

## 5.4. Resultados obtidos

Com as ações implantadas e desenvolvidas ao longo do projeto o indicador de consumo de cal teve evoluções na diminuição do consumo de forma bem representativa. Houve grande mudança também na forma de se entender o problema por toda a equipe técnica da empresa, bem como a equipe operacional, que desenvolveu um melhor entendimento dos mecanismos de desfosforação do aço no processo de fusão.

O gráfico do consumo total de cal da aciaria, Figura 39, mostra a evolução e o comportamento do indicador, sendo que o gráfico da Figura 40 evidencia que os ganhos foram substanciais na área do FEA, onde foi focado este trabalho.

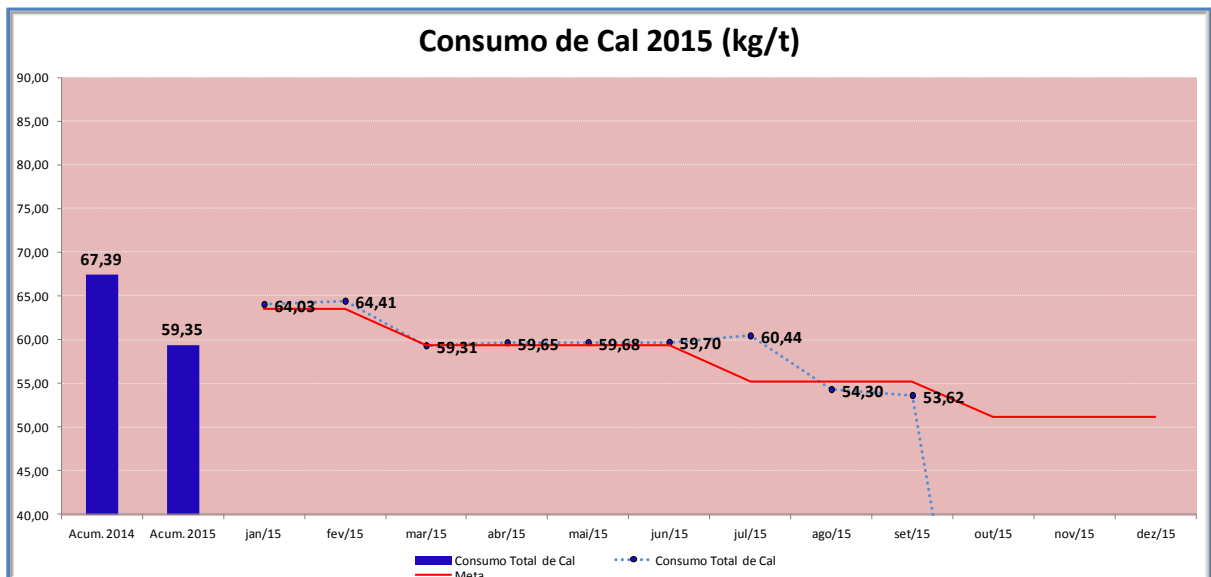


Figura 39. Consumo de cal total da Aciaria em 2015.

Fonte: Empresa.

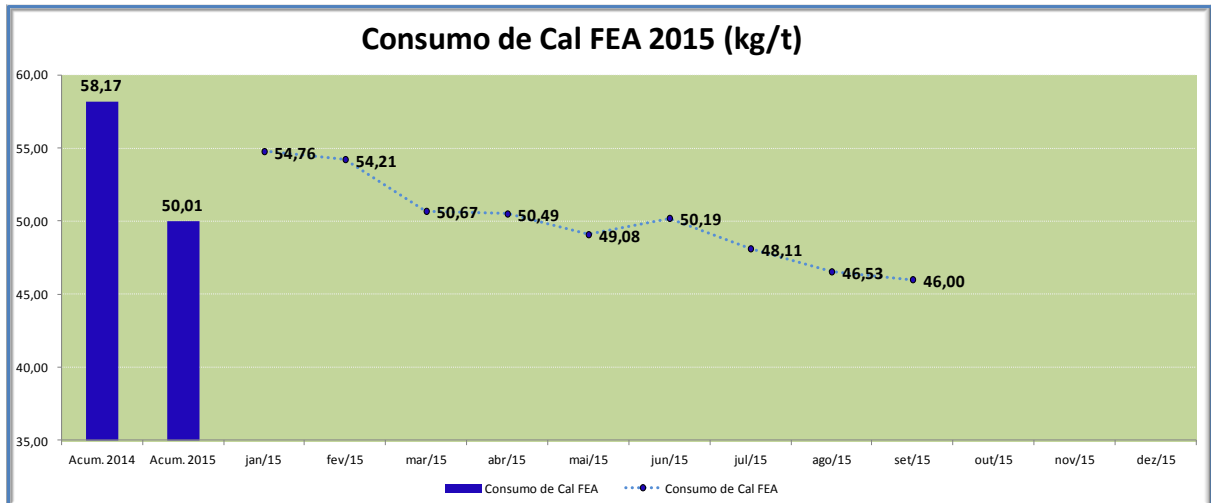


Figura 40. Consumo de cal no FEA em 2015.

Fonte: Empresa.

No consumo acumulado de 59,35 kg/t houve uma queda de cerca de 8 kg/t no consumo total de cal frente aos 67,39 kg/t de 2014, cerca de 11,9% a menos que o histórico do ano anterior. Observando-se os meses de agosto e setembro, onde o indicador apresenta novo patamar de desempenho, a média obtida é de 53,96 kg/t, cerca de 19,9% de redução no consumo, praticamente 20% de ganho.

Isto projeta um ganho anual de cerca de R\$ 1.579.368,00, considerando-se uma produção mensal de 35.000 t com o preço da cal projetado para 2016 em 0,28 R\$/kg. A Tabela 9 evidencia o cálculo deste ganho projetado.

Tabela 9. Ganho projetado por desempenho na redução de consumo de cal.

Fonte: Autor.

|                         | Produção Mensal (t) | Preço da cal (R\$/kg) | Consumo (kg/t) | Meses | Valor                   |
|-------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|-------|-------------------------|
| Desempenho anterior     | 35000               | R\$ 0,28              | 67,39          | 12    | R\$ 7.925.064,00        |
| Desempenho atual        | 35000               | R\$ 0,28              | 53,96          | 12    | R\$ 6.345.696,00        |
| <b>Ganho do Projeto</b> |                     |                       |                |       | <b>R\$ 1.579.368,00</b> |

## 6 CONCLUSÃO

A utilização de ferramentas de análise corretas para a compreensão de um determinado problema dentro da indústria é fato crucial para que haja a quebra e o rompimento de conceitos errôneos criados ao longo do tempo. Isto faz muita diferença e impacta diretamente na forma como se é conduzido determinado processo, podendo surgir equívocos que afetam diretamente no desempenho.

A tomada de decisão deve conter análises estatísticas adequadas e feitas por quem conhece os fenômenos de determinado processo, a fim de se alcançar assertividade na elaboração de um *brainstorming* e análise de causas potenciais de um problema.

É importante lembrar que foram decisivas para o sucesso e resultados alcançados neste trabalho, as comprovações de fenômenos nas análises de fatores causais para a definição de um plano de ação assertivo, sem grandes retrabalhos.

Faz-se necessário para projetos futuros um maior aprofundamento nas receitas químicas utilizadas no FEA para aumentar os ganhos, com redução maior ainda no consumo de cal. Para isto, se faz necessário maior tempo de análise termodinâmica e cinética de componentes da escória, o que não foi viável neste projeto por questões exatamente de tempo limite.

## REFERÊNCIAS

- PRETORIUS, E. B. **Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking**. Electric Furnace Conference Proceedings, EUA, p. 275-272, 1998.
- ÁVILA, T. A. **Condicionamento de escórias em forno elétrico a arco para otimização das condições de espumação da escória e refino do aço**. Tese de mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2011.
- LUZ, A. P.;ÁVILA, T. A.;BONADIA, P.; PANDOLFELLI, V. C. **Slag foaming: fundamentals, experimental evaluation and application in the steelmaking industry**. Refractories World Forum, EUA, p. 91-98, 2011.
- BOLOTA, J. R.; MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.;LEANDRO, C. A. da S.; TAKANO, C.; QUITES, E. E. C.;GENTILE, E. F.; SILVA, G. F. B. L.; GONÇALVES, M.; FACO, R. J. **Introdução à siderurgia**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, Brasil, p. 189-214, 2011.
- BOCK, M.; LOUIS, A. K.; MÜLLER, R.; OEHLER, C. **Computer supported calculation and evaluation of BOF slag composition**. Revista Millennium Steel, p. 55-59, 2008.
- SILVA, A. L. V. C. **Elaboração do aço em forno elétrico a arco**. Trabalho de Pós Graduação, ABM-FEI, São Paulo, Brasil, 2006.
- CAMPOS, V. F. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia**. Bloch Editores S.A. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, p.77-83, 1992.
- FURTUDO, M. **Cenário Mundial do Aço**. Relatório Galva Brasil, São Paulo, 2013.
- WERKEMA, M. C. C. **Treinamento Seis Sigma - Green Belt - Sessão1**. Werkema Consultores LTDA, Minas Gerais, Brasil, p. 29-170, 2005.
- LAPPONI, J. C. **Estatística usando o Excel**. Editora Campus, Rio de Janeiro, Brasil, p.125-133, 2005.
- CARVALHO, F. B. **Redução do teor de fósforo dos aços em convertedores LD através de adição de briquete**. Tese de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2012.