

AUMENTO DA PRECISÃO DOS RESULTADOS CSR PARA COQUE DA ARCELORMITTAL TUBARÃO*

Leonardo Barbosa de Oliveira Mello¹
Odilon José da Silva²
Alexandre Santos Tardin³
Marcelo Tardin Alves⁴
Filipe Sathler⁵
João José dos Santos Carvalho⁶
Leonardo Passos Perdigão⁷
Daniel Paulo Santos⁸

Resumo

A estabilidade operacional do alto-forno depende da qualidade de suas matérias-primas, sendo a resistência mecânica do coque após a reação – Coke Strength after Reaction (CSR) um dos principais parâmetros de controle da qualidade do coque para verificar a degradação granulométrica do coque após sua reação com CO₂. O desafio das empresas siderúrgicas está em produzir um coque de baixo custo e elevada qualidade com resultados precisos e consistentes para atendimento às especificações requeridas pelo alto-forno. Neste trabalho em particular, utilizando a metodologia Seis Sigma, foi desenvolvido e validado uma equação matemática (modelo de regressão linear múltipla) para previsão do CSR produzido pela coqueria da ArcelorMittal Tubarão, a partir de dados estatísticos correlacionados à parâmetros da mistura de carvão (teor de cinzas totais, enxofre médio e a composição química das cinzas expresso pelo índice de basicidade).

Palavras-chave: Carvão; Coque; CSR; Seis Sigma

INCREASE IN THE ACCURACY OF COKE CSR RESULTS FOR ARCELORMITTAL TUBARÃO

Abstract

The operational stability of the blast furnace depends on the quality of its raw materials, and the Coke Strength after Reaction (CSR) is one of the main coke quality control parameters to verify the grain size degradation of the coke after its reaction with CO₂. The challenge for steel companies is to produce low-cost, high-quality coke with accurate and consistent results to meet the specifications required by the blast furnace. In this work, using a Six Sigma methodology, a mathematical equation (multi variable linear regression model) was developed and validated to predict the CSR produced by the ArcelorMittal Tubarão coke plant, based on statistical data correlated to the parameters of the coal blend (ash and sulfur contents and ash chemistry expressed by the basicity index).

Keywords: Coal; Coke; CSR; Six Sigma

¹ Engenharia Química, Executivo de Abastecimento de Combustível Sólido, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.

² Engenharia Metalúrgica, MSc, Especialista de Coqueria, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil

³ Engenharia Civil, Executivo de Abastecimento de Combustível Sólido, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.

⁴ Engenharia Metalúrgica, Administração de Empresas e Direito, ArcelorMittal Brasil, Serra, ES, Brasil.

⁵ Engenharia Metalúrgica, Especialista de Alto-Forno, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.

⁶ Engenharia Metalúrgica, MSc, Especialista de Alto-Forno, Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.

⁷ Engenharia Metalúrgica, Gerente da Unidade Técnica da Área de Redução, ArcelorMittal Tubarão, Serra, Espírito Santo, Brasil.

⁸ Eng. de Produção e Admin. de Empresas, Pós-Graduado e Bacharel, Especialista Sênior em Melhoria Contínua, Gerência de Transformação e Melhoria Contínua, ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil

1 INTRODUÇÃO

O coque cumpre quatro funções básicas no alto-forno, sendo elas: Primeiro como combustível provendo calor para as reações químicas endotérmicas mantendo gusa e escória líquidos, segundo como agente químico redutor provendo gases para redução do óxido de ferro, terceiro como suporte permeável da carga metálica permitindo a passagem de gusa e escória para o cadinho do alto-forno e fluxo ascendente de gases em contra-corrente e a quarta função do coque como agente químico fornecendo carbono ao ferro líquido que é a carburação do gusa.

A resistência mecânica do coque (resistência ao impacto e abrasão e a resistência após reação com CO₂) exigida para suportar fisicamente a carga metálica tem maior importância com aumento de capacidade dos altos-fornos (tamanho e produtividade) e redução do consumo de coque com substituição parcial do carbono pelas altas taxas de injeção de carvão pulverizado pelas ventaneiras (PCI). Nestas condições se eleva o tempo de residência do coque no interior do alto-forno sendo submetido o coque por mais tempo a um ambiente de severas condições de trocas térmicas e reações químicas contribuindo para maior degradação do material.

O CSR do coque é importante para prevenção de desgaste do cadinho do alto-forno, melhorar a permeabilidade à passagem de líquidos e gases, elevar a produtividade e reduzir o consumo de coque (Grosspietsch et al., 2000).

Atualmente o teste de reatividade desenvolvido pela Nippon Steel Corporation (NSC), denominado Coke Reactivity Index (CRI), é o mais empregado em ambientes industriais para avaliar a reatividade do coque. Com o objetivo de verificar a degradação granulométrica do coque após sua reação com CO₂, realiza-se o teste denominado Coke Strength after Reaction (CSR). Existe alta correlação entre a reatividade do coque e a resistência mecânica do coque após a reação, como indicado pela Figura 1 (Menéndez et al., 1999).

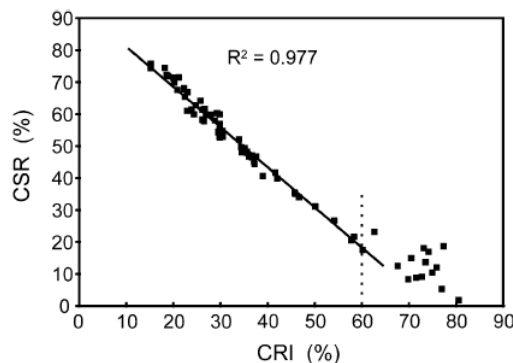


Figura 1 - Correlação entre CRI e CSR (Menéndez et al., 1999).

A redução do CSR (aumento CRI) reduz a temperatura de início de gaseificação do coque, ocasionando o início da gaseificação em regiões superiores do alto-forno de modo que o coque chegue ao cadinho com menor tamanho, ou seja, com maior percentual de finos e, portanto impactando na permeabilidade do leito (Sunahara et al., 2011).

Correlações industriais desenvolvidas pela ArcelorMittal Tubarão demonstram de forma conservadora que o aumento de 1% CSR promove um aumento de 2% na produtividade e redução de pelo menos cerca de 2 kg/ton de gusa no Coke Rate (Relatório interno, 2017). Coke Rate (CR) por definição é a quantidade de coque requerida para produzir 1 tonelada de gusa.

1.1 PRIMEIRA GERAÇÃO - MODELOS (RESISTÊNCIA MECÂNICA À FRIO)

Resultados operacionais realizados pela NSC na década de 1970 sugerem que o CSR depende cerca de 70% da qualidade do carvão ou mistura de carvões e apenas cerca de 30% das condições relacionadas ao processo de coqueificação (Nakamura et al., 1977).

Os constituintes do carvão estão distribuídos em dois tipos de matéria: a orgânica, que pode ser subdividida em macerais (vitrinita, exinita e inertinita) reconhecido em microscópio óptico e a inorgânica que pode ser reconhecida e quantificada também ao microscópio sob a forma de diferentes tipos de matéria mineral. A vitrinita é o maceral preponderante na maioria dos carvões e a sua refletância aumenta progressivamente com o aumento do rank (estágio específico que um determinado carvão atingiu ao longo do processo de sua formação). A evolução do rank envolve a perda progressiva de voláteis e aumento da concentração de carbono (carbonificação). A refletância do maceral vitrinita em microscópio sob luz polarizada aumenta progressivamente com o aumento do rank do carvão.

Existe uma relação entre o CSR e a refletância da vitrinita do carvão, demonstrado pela Figura 2, onde observamos que, em geral o CSR possui máximo valor na região dos carvões metalúrgicos de alta qualidade (premium coking coals) com refletância média entre 1.2% a 1.3% e queda no CSR para carvões de baixo e alto rank (Nakamura et al., 1977).

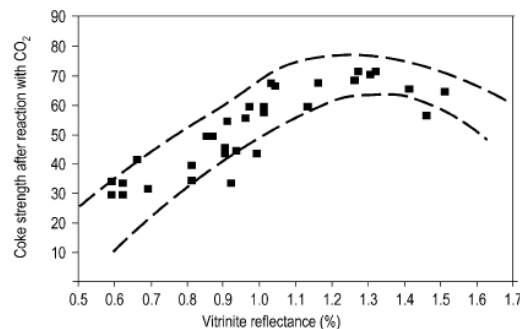


Figura 2 - Relação entre CSR e refletância da vitrinita (Nakamura et al., 1977).

Macerais de carvão betuminoso (utilizados na produção de coque) sofrem fusão seguida de solidificação, comportando-se como ligantes e são classificados como reativos, enquanto outros macerais permanecem praticamente inalterados e são classificados como inertes (Ammosov et al., 1957; Schapiro and Gray, 1960). O russo Ammosov foi precursor no uso de dados petrográficos para a previsão de resistência do coque, e posteriormente os americanos Schapiro e Gray aprofundaram estes estudos propondo um método de previsão de qualidade baseado na relação entre macerais ativos e inertes para carvões americanos.

Outro importante desenvolvimento foi baseado em dados petrográficos (Rank do carvão medido pela refletância da vitrinita) e propriedades reológicas do carvão (Fluidez máxima de Gieseler). Este método conhecido como diagrama MOF foi desenvolvido pelos japoneses Miyazu, Okuyama e Fukuyama, pesquisadores da Nippon Kokan (NKK) utilizando blends de carvões de diversas origens, como EUA, Austrália, Canadá e Japão (impulsionados pela maior oferta de carvões globais).

O diagrama MOF identifica os intervalos de plasticidade (Fluidez máxima entre 200 e 1000 ddpm) e Refletância (1.2 a 1.3%) como sendo uma janela de qualidade para o blend de carvão considerado ideal para a produção de coque (Miyazu et al., 1974).

O modelo de previsão utilizado pela ArcelorMittal Tubarão para resistência mecânica (DI 150/15) também utiliza parâmetros de rank (Refletância) e propriedades reológicas (Fluidez), além de considerar também o teor de vitrinitas, cinzas e o índice de operação previsto para as baterias de coque. Os resultados obtidos são bastante estáveis, não sendo o foco deste trabalho.

1.2 SEGUNDA GERAÇÃO - MODELOS (RESISTÊNCIA MECÂNICA À QUENTE)

Nesta fase de desenvolvimento, diversos estudos revelaram que carvões tendo excelentes propriedades reológicas (habilidade aglutinante) não oferecem uma composição mineral adequada. Desta forma, a partir de então, diversos autores consideram também importante o conhecimento da composição química das cinzas do carvão que está relacionada a efeitos catalisadores da reação de gaseificação do coque (inibindo ou acelerando a reatividade do coque - CRI).

O primeiro estudo de previsão de CSR a partir de características dos carvões utilizou a refletância da vitrinita e o percentual de macerais inertes (Miura, 1978). Posteriormente, diversos modelos de previsão de CSR a partir de propriedades dos carvões foram publicados por vários autores.

O modelo de previsão para CSR adotado pela ArcelorMittal Tubarão utiliza como referência o estudo publicado pela Inland Steel (Valia, 1989) no qual foi introduzindo o intervalo de plasticidade (faixa de temperaturas da zona plástica) como um parâmetro refletindo o rank e as propriedades reológicas do carvão. Outro termo introduzido na equação desenvolvida por Valia é o índice catalítico (CI), que combina os efeitos da composição química das cinzas (expresso pelo índice de basicidade) e o teor de cinzas totais e teor de enxofre. O índice de basicidade (BI) é definido pelo quociente entre os óxidos básicos ($Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O$) e os óxidos ácidos ($SiO_2 + Al_2O_3$) contidos nas cinzas do carvão ou mistura.

1.3 TERCEIRA GERAÇÃO DE MODELOS

A análise de dados estatísticos correlacionados a parâmetros da mistura de carvão e coque produzidos com a utilização de ferramentas computacionais vem se constituindo na terceira geração de modelos de previsão de qualidade com muitos avanços obtidos por meio de sistemas de otimização de processos, conforme demonstrado por Silva (2008) em seu estudo para desenvolvimento de modelos de previsão da qualidade do coque baseado na caracterização tecnológica dos carvões de diferentes origens e rank e misturas complexas de carvões.

Neste trabalho em particular, foi desenvolvido e validado uma equação matemática (modelo de regressão linear múltipla) para previsão do CSR produzido na coqueria convencional da ArcelorMittal Tubarão.

2 DESENVOLVIMENTO

Este trabalho foi dividido em quatro etapas utilizando a metodologia Seis Sigma e visa desenvolver ajustes no processo de preparação de misturas de carvões e produção de coque que possam impactar diretamente na qualidade do coque para aumentar a precisão do CSR. A Figura 3 mostra o histórico de resultados CSR do

coque produzido pela ArcelorMittal Tubarão. Foram selecionados 80 resultados diários coletados no período de referência atual para avaliação inicial do projeto.

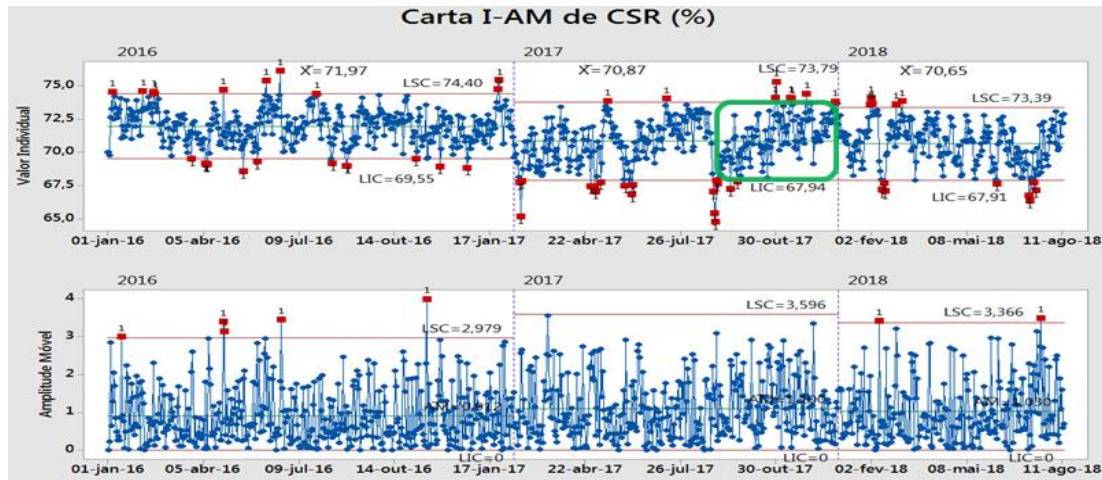


Figura 3 – Histórico do CSR produzido pela ArcelorMittal Tubarão

Para a definição da meta do projeto foram avaliados os resultados amostrados de Setembro a Novembro de 2017, representando o período atual indicado na Figura 3. Considerando uma distribuição Normal de dados para os resultados CSR, conforme indicado pela Figura 4, realizou-se o estudo de Quartis para o período selecionado.

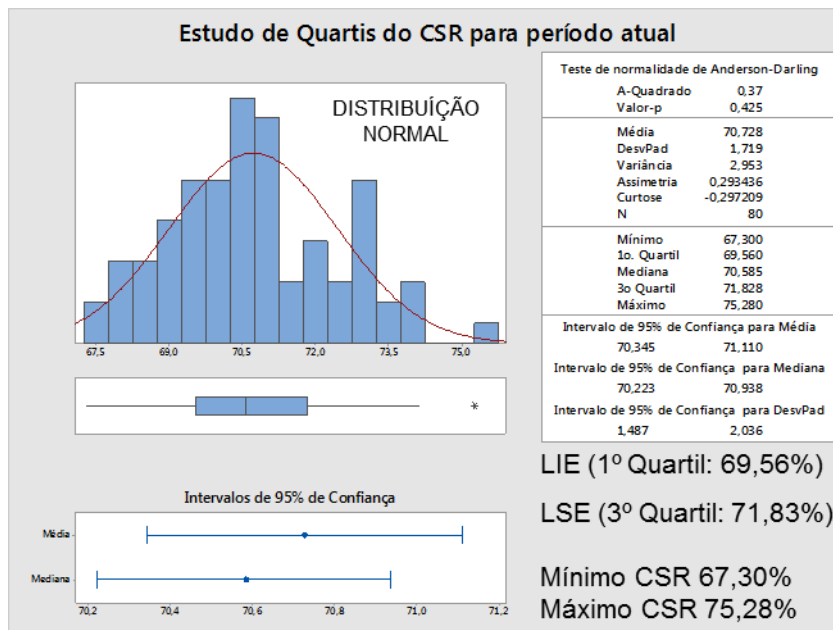


Figura 4 – Estudo de Quartis para resultados CSR da ArcelorMittal Tubarão

2.1 – ETAPA DE DEFINIÇÃO

De acordo com a análise de Capabilidade do processo (medida da probabilidade de gerar defeitos) para o período atual, foram considerados resultados defeituosos os valores abaixo do Limite Inferior de Especificação (LIE) ou acima do Limite Superior de Especificação (LSE) adotado pelo estudo de Quartis para o CSR sendo respectivamente os valores do 1º. Quartil (LIE: 69,56%) e 3º. Quartil (LSE: 71,83%) na amostra de dados estudada, conforme indicado na Figura 5.

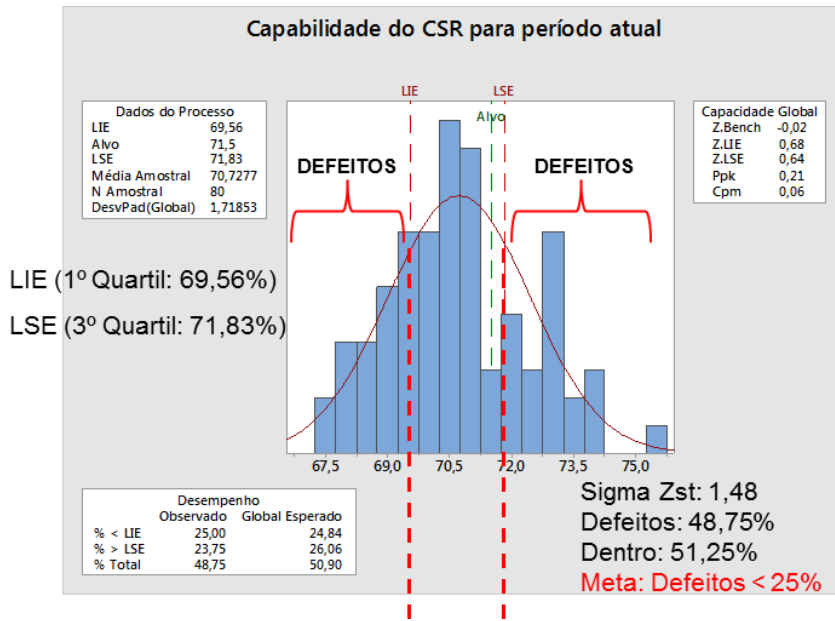


Figura 5 – Estudo de Capabilidade para resultados CSR da ArcelorMittal Tubarão

O desempenho atual deste indicador (CSR) tem média 70,73% e desvio padrão 1,72% com Nível Sigma de 1,48. Para este nível de Sigma, a metodologia utilizada propõe como meta uma redução de 50% dos defeitos no processo.

Desta forma, para garantir um valor mínimo de CSR 68% a meta alvo proposta foi de CSR 71,50% +/- 3,5% (admitindo 3,5% como possível variação analítica) reduzindo o percentual de defeitos 48,75% para 25% a partir de dezembro de 2018.

2.2 ETAPA DE MEDIÇÃO

Para o estudo das causas, foi utilizado como referência o diagrama de causa e efeito para fatores relativos à operação das baterias de fornos de coque e fatores relativos aos carvões individuais e mistura visando identificar as potenciais causas raízes relacionadas à variação do CSR conforme indicado pela Figura 6.

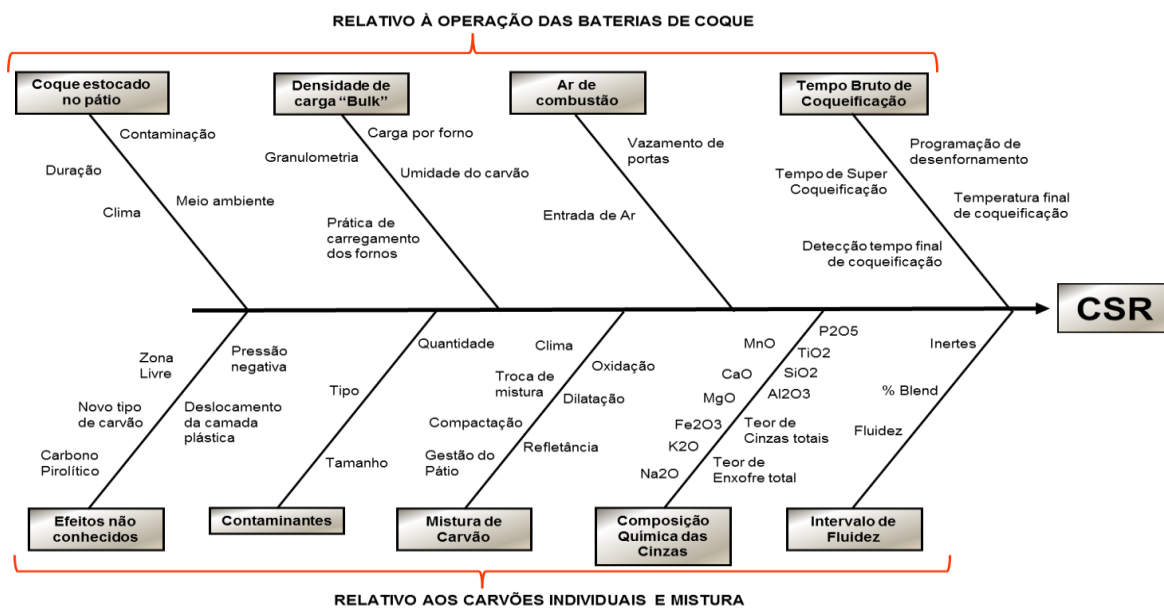


Figura 6 – Diagrama de causa e efeito relacionado à variação do CSR (Valia, 2006).

A Figura 7 apresenta o mapa de processo do projeto identificando a sequência de eventos relacionados à preparação de mistura de carvão e à produção do coque.



Figura 7 – Mapa de processo produção de coque na AMT

Com auxílio do diagrama de causa e efeito e o estudo do mapa de processo para produção do coque, foram selecionados 16 principais fatores ou variáveis do processo (X's potenciais) que impactam no controle do CSR identificado como função resposta (Y1). São estes os seguintes fatores: Índice de Basicidade (X1), Teor de Cinzas totais (X2), Refletância Média (X3), Teor de Enxofre (X4), Fluidez Máxima (X5), Teor de Vitrinitas (X6), Matéria Volátil (X7), Carbono Fixo (X8), Granulometria da Mistura % < 3,36 mm (X9), Granulometria da Mistura % < 0,50 mm (X10), Umidade da Mistura (X11), Carga por Forno (X12), Temperatura da Câmara de Combustão 16 - Região central da coqueria (X13), Tempo Líquido de Coqueificação (X14), Tempo Bruto de Coqueificação (X15), Tempo de Super Coqueificação (X16).

A Figura 8 apresenta um resumo gráfico contendo os 16 fatores ou variáveis do processo (X's potenciais) de maior influência para a função resposta CSR (Y1). As 16 variáveis identificadas são derivadas de etapas consideradas críticas como entradas para o processo de produção de coque (inputs): Natureza do Carvão, Misturamento, Granulometria, Umidade, Carga por Forno, Temperatura dos Fornos (Câmaras de Combustão) e Tempos Líquido e de Super Coqueificação.

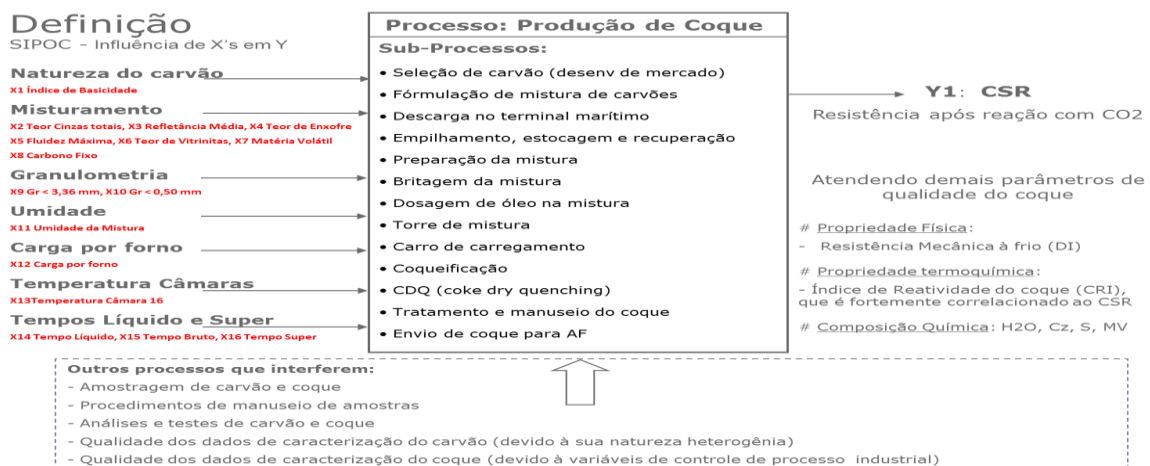


Figura 8 – Diagrama SIPOC do projeto aumento da precisão dos resultados CSR

2.3 ETAPA DE ANÁLISE

Nesta etapa foram identificadas as variáveis vitais do processo (Figura 9), sendo utilizado o seguinte critério para escolha destas variáveis: Os itens selecionados possuem maior correlação com CSR ou existe correlação com CSR, indicado pela correlação de Pearson (P-Value < 0,05), sendo eles: Índice de Basicidade (X1) e Teor de Cinzas totais da mistura (X2). Além do critério definido para escolha das variáveis pela correlação estatística, decidiu-se também pela seleção da variável Enxofre Médio da Mistura (X4), devido à significância desta variável de acordo com teoria existente. Desta forma, foram propostos para equação as mesmas variáveis aplicadas atualmente ao modelo de referência utilizado pela ArcelorMittal Tubarão, desenvolvido e publicado pela Inland Steel (Valia, 1989).

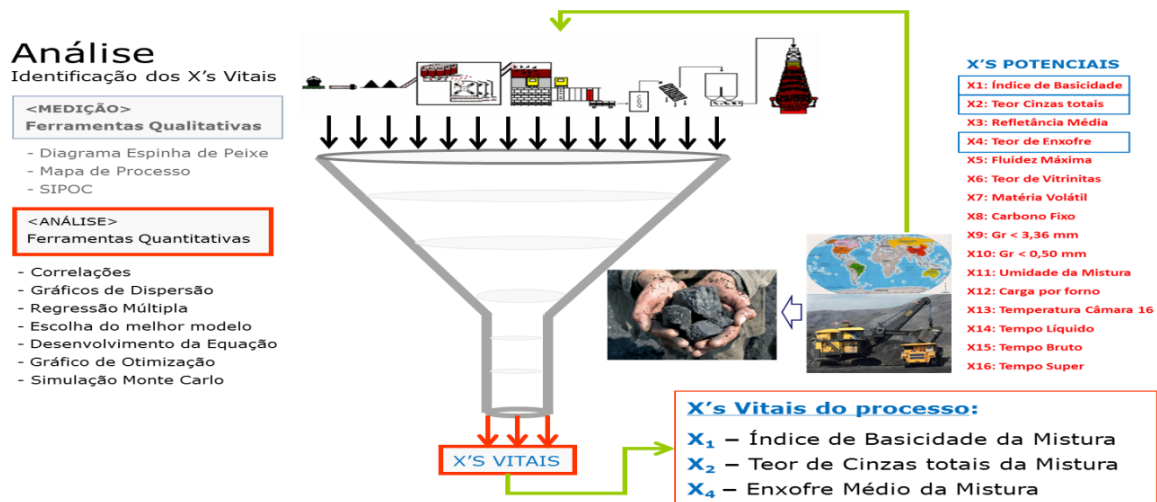


Figura 9 – Etapa de análise do projeto aumento da precisão dos resultados CSR

A escolha do melhor modelo e a determinação da equação de regressão multivariável (Best Subset) foi desenvolvida com auxílio do programa estatístico MINITAB utilizando as variáveis vitais selecionadas pela análise do processo (Equação 1): $CSR = 98,11 - 38,51 * X_1 - 3,06 * X_2 + 9,68 * X_4$ (1)

A Figura 10 apresenta a análise de regressão com o sumário do modelo indicando um coeficiente de determinação de 84,15% (R²) com desvio padrão 0,52 (S).

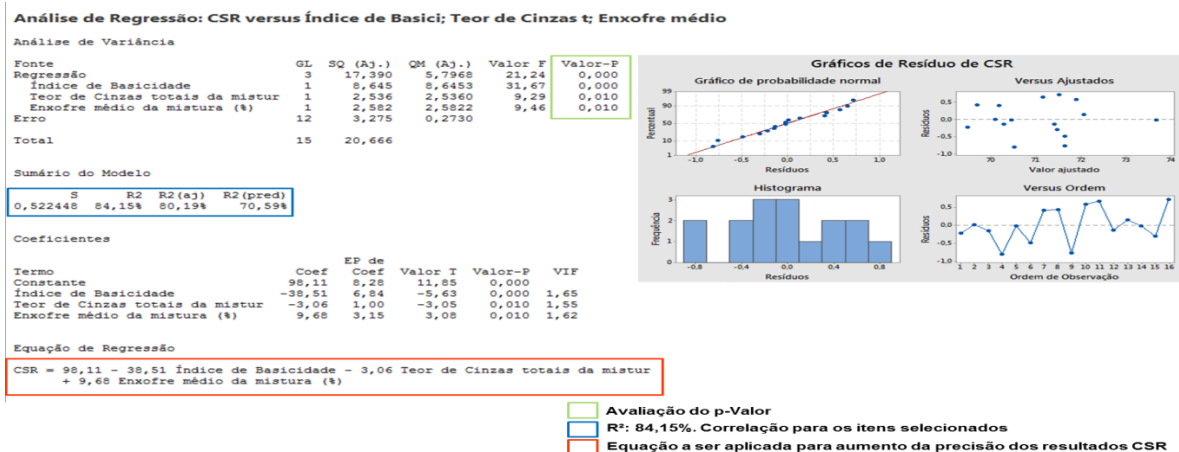


Figura 10 – Análise de Regressão

Variáveis de controle da planta (processo de coqueificação) não foram consideradas significativas nesta modelagem com base nos dados estatísticos utilizados. Para o modelo proposto somente foram considerados parâmetros relativos à qualidade da mistura de carvão (matéria-prima). Alterações na composição da mistura de carvão planejada (novos “set ups” da planta) foram tratadas com bastante cautela, sob o risco de haver um desequilíbrio no consumo dos estoques por tipo de carvão necessitando de uma avaliação da estratégia de compra futura devido a compromissos comerciais já firmados pela área de abastecimento. Por esta razão, optou-se por realizar inicialmente uma simulação para conhecermos as respostas do índice CSR de acordo com a nova equação desenvolvida. A Simulação de Monte Carlo usa uma amostragem aleatória repetida para simular dados de um modelo matemático para avaliar os resultados. Este método só deve ser empregado caso as variáveis em estudo sigam uma distribuição normal de dados.

O relatório de desempenho indicado pela Figura 11 compara a capacidade do processo Antes (base line) e Depois com dados gerados pela simulação utilizando o modelo desenvolvido (equação proposta). Pela simulação, há indicativo de melhoria do processo pela redução do percentual de defeitos em 29%, considerando o valor referência inicial 48,75% (Antes) e o valor gerado pela simulação 34,67% (Depois).

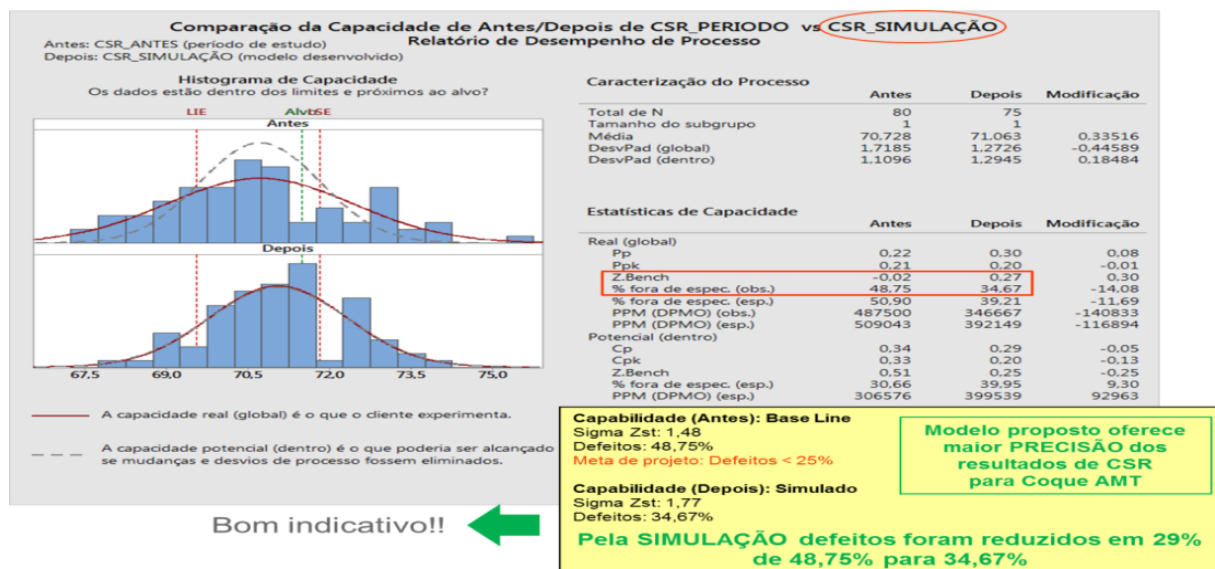


Figura 11 – Relatório de Desempenho do Processo pela simulação de dados

De acordo com o gráfico de otimização ajustado pelos resultados simulados, é possível obtermos a melhor condição possível. A resposta encontrada pelo MINITAB corresponde a melhor condição possível para os fatores (X's vitais) e níveis de controle utilizando.

O modelo elaborado indicou os seguintes níveis de desempenho para as variáveis (X's vitais) propostas pela equação do CSR visando alcançar a meta alvo definida no projeto (CSR 71,50%) conforme indicado mostra a Figura 12.

- X1 - Índice de Basicidade da Mistura (BI): 0,15
- X2 - Teor de Cinzas totais da Mistura (Cz): 8,68 %
- X4 - Enxofre Médio da Mistura (S): 0,59 %.

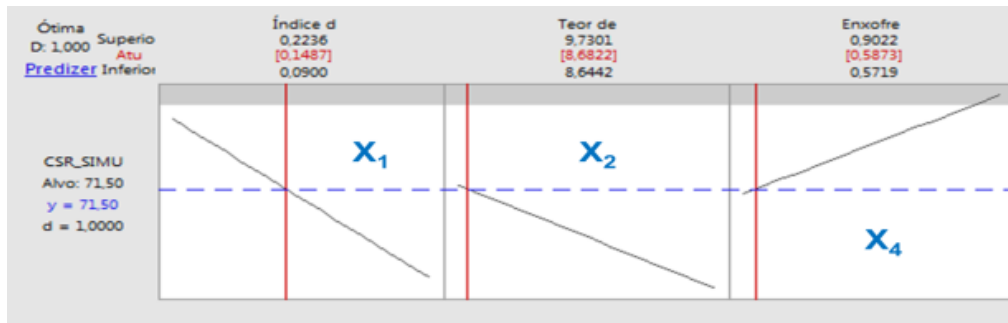


Figura 12 – Gráfico de Otimização ajustado pelos resultados simulados

2.4 ETAPA DE IMPLEMENTAÇÃO

Nesta etapa validamos o novo modelo de previsão do CSR utilizando dados reais das misturas consumidas na planta industrial e coletados ao longo dos meses de Setembro, Outubro e Novembro de 2018 (X1, X2, X4). O objetivo foi compararmos o valor projetado para CSR utilizando o novo modelo com o valor real obtido utilizando o modelo anterior. Foi observada uma melhora significativa na capacidade do processo de previsão de CSR utilizando o novo modelo proposto.

Pelas Figuras 13 e 14, é possível verificar uma redução superior a 70% no percentual fora de especificação (% defeitos), demonstrando que o processo de previsão de CSR foi aprimorado quando calculado pelo novo modelo.

Posteriormente foi testado o novo modelo realizando ajustes de processo de mistura de carvão, consumindo misturas tendo as variáveis (X1, X2 e X4) ajustadas pelo otimizador de processo gerado pelo novo modelo. Desta forma foi possível comparar o valor previsto pelo gráfico de otimização para resposta CSR com o valor produzido pela planta. Para os testes na planta industrial, foram utilizados materiais disponíveis nos pátios de carvão no mês de Novembro de 2018 consumidos nas misturas identificadas como NOV 4, NOV 5 e NOV 5E4, conforme as Figuras 15, 16 e 17.

Melhoria

Nova Capacidade do Processo

Set-Out-Nov/18

34 dados de X1, X2, X4

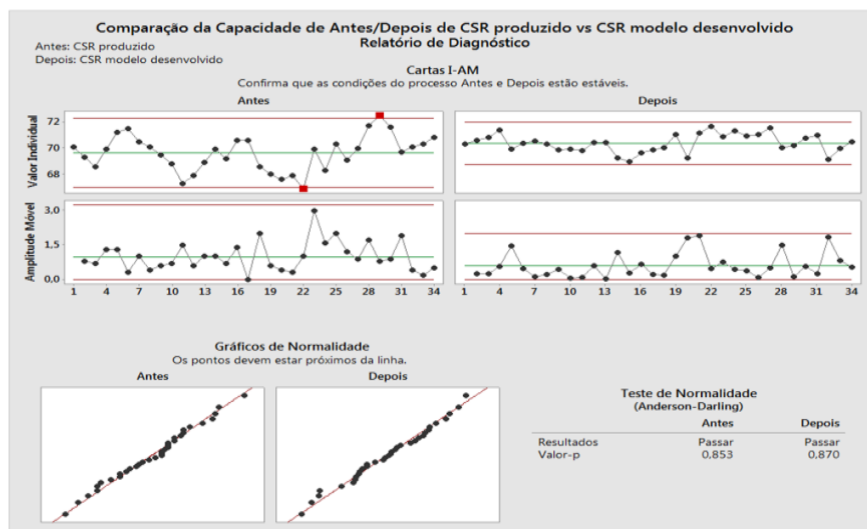
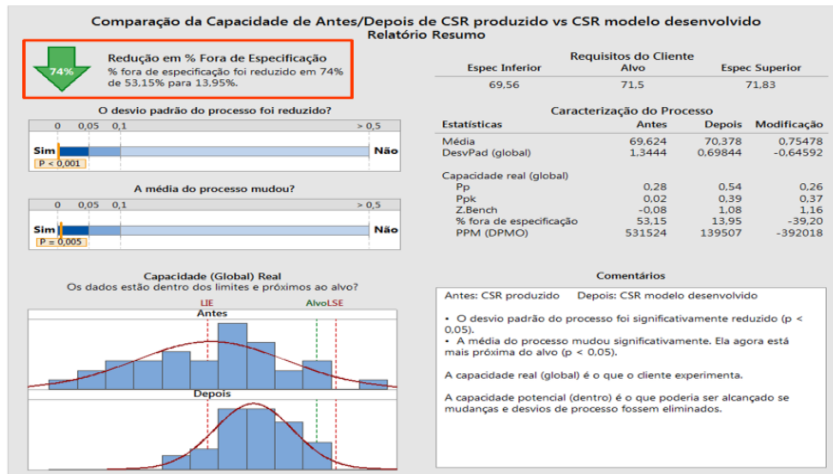


Figura 13 – Relatório de Diagnóstico



ANTES:
CSR real
produzido pelo
processo atual

DEPOIS:
CSR calculado
pelo novo
modelo de
qualidade
desenvolvido

Base line (contrato do projeto)
Sigma – 1,48
Defeitos – 48,75%
Meta – Defeitos < 25%

Condição Atual (Similar)
Sigma – 1,42
Defeitos – 53,15%

**Processo Aprimorado
calculado pelo novo modelo**
Sigma atual – 2,58
Defeitos – 13,95%
Atendimento da META !!!

Figura 14 – Relatório Resumo da nova Capabilidade do Processo

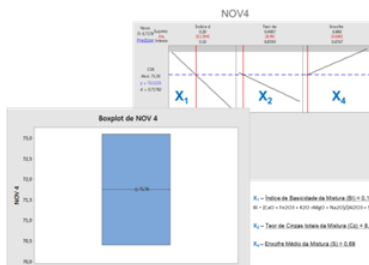


Figura 15 – Mistura NOV 4
com valor alvo CSR 72,11%
e média obtida 71,75%



Figura 16 – Mistura NOV 5
com valor alvo CSR 71,64%
e média obtida 71,93%

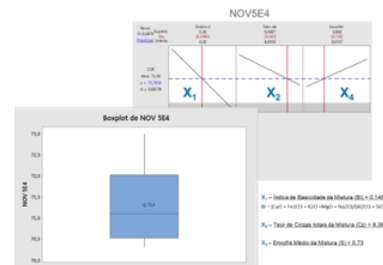


Figura 17 – Mistura NOV 5E4
com valor alvo CSR 70,79%
e média obtida 71,30%

2.5 ETAPA DE CONTROLE

Como estratégia de controle, espera-se garantir a manutenção das melhorias obtidas com a utilização da nova modelagem desenvolvida para elaboração do planejamento de misturas e programação de embarques.

3 CONCLUSÃO

O novo modelo de previsão de CSR desenvolvido e validado neste estudo foi desenvolvido a partir de dados estatísticos que refletem condições específicas do período de avaliação do processo de produção de coque da ArcelorMittal Tubarão considerado para este estudo, e portanto, deve ser periodicamente ajustado às novas condições de operação e diferentes perfis de composição de misturas por origem e qualidade. A equação de regressão linear múltipla proposta foi construída a partir da escolha de variáveis correlacionadas ao CSR (P-Value < 0,05), sendo estas: Índice de Basicidade e Teor de Cinzas totais da mistura. Também foi incluído no modelo a variável Enxofre Médio da Mistura, pois apesar de obtermos fraca correlação nesta base de dados, o enxofre possui alta significância para o CSR conforme proposto por diversos modelos disponíveis na literatura. No entanto, esperava-se que esta variável apresentasse uma contribuição deletéria para previsão de CSR.

Neste estudo, a modelagem de previsão de CSR é apresentada como uma possibilidade de aumento da precisão dos resultados obtidos quando comparado ao modelo de referência utilizado pela ArcelorMittal Tubarão com potencial de redução do custo de mistura de carvão, contribuindo para redução da variabilidade do processo de produção de coque e maior estabilidade operacional dos altos-fornos.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho foi possível atingir uma redução de 74% dos resultados fora de especificação (defeitos) demonstrando que o processo de previsão de CSR foi aprimorado quando calculado pelo novo modelo.

REFERÊNCIAS

- 1 DIEZ M. A., ALVAREZ R., BARRIOCANAL C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *International Journal of Coal Geology*. 2002; 50: 389-412
- 2 NAKAMURA N., TOGINO Y., TATEOKA T. Behaviour of coke in large blast furnace. *The Metals Society London*. 1977; 1-18
- 3 AMOSOV I.I., EREMIN I.V., SUKHENKO S.F., OSHURKOVA L.S. Calculation of coking changes on basis of petrographic characteristics of coals. *Coke Chem. U.S.S.R.* 1957; 2: 9-12
- 4 SHAPIRO N., GRAY R.J., EUSNER G.R. Recent developments in coal petrography. *Blast furnace, Coke Oven and Raw Materials Committee New York*. 1961; 20: 89-112
- 5 MIYAZU T., OKUYAMA Y., FUKUYAMA T., SUZUKI N. The evaluations and design of blends using many kinds of coal for cokemaking. *International Iron and Steel Congress Dusseldorf*. 1974
- 6 MIURA Y. The science of cokemaking technology and its development in Japan. *The Coke Oven Managers' Association Year Book*. 1978; 292-311
- 7 VALIA H.S. Prediction of coke strength after reaction with CO₂ from coal analyses at Inland Steel Company. *Iron Steel-mak*. 1989; 77-87
- 8 MARIANO DE CORDOVA, JORGE MADIAS, JAVIER BARREIRO. Review on modeling of coal blends for prediction of coke quality. *AISTech Proceedings*. 2016; AIST: 297-309
- 9 DEBJANI NAG, S. K. HALDAR, P. K. CHOUDHARY. Prediction of coke CSR from ash chemistry of coal blend. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2009; 29: 243–250
- 10 N. ANDRIOPOULOS. Prediction of CSR of coke made from Australian low-volatile-matter coking coals. *AISTech Proceedings*. 2018; AIST: 217-227
- 11 SILVA, ODILON JOSÉ DA. Caracterização tecnológica de carvões para coqueria. *Dissertação (Mestrado) – UFOP 2008*
- 12 SILVA, GUILHERME LIZIERO RUGGIO DA. Otimização da mistura de carvão na produção de coque metalúrgico. *Dissertação (Mestrado) - UFOP 2011*
- 13 VALIA, HARDARSHAN S. All about heat recovery – non recovery coke and its use in blast furnace. *Short Course*. 2006
- 14 MURILO BOTELHO ULHÔA, TOBIAS RODRIGUES NETO, ÉDSON GOMES DA SILVA. Causas de variações de qualidade do coque fabricado em baterias de fornos horizontais da CST. *Contrato de assistência técnica entre a Coal & Coke e-mentoring e a Companhia Siderúrgica de Tubarão para estudo de variabilidade de qualidade de coque de alto-forno – CT 10002788*. 2007

- 15 GROSSPIETSCH K.H., LUGEN H.B., DAUWELS G., FERSTI T., KARJALAHTI T., NEGRO P., VAN DER VELDEN B., WILLMERS R. Proc. 4th European Coke and Ironmaking Cong. Vol 1. ATS-RM Paris, 2000
- 16 Zhang S, Bi X. Theoretical consideration of problems relating to high coal rate injection into blast Furnaces. Ironmaking and Steelmaking. 2003; 30(6): 467-474
- 17 Ishii, K. Advanced Pulverised Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation, Pergamon, publishers. 2000
- 18 Kohei SUNAHARA, Takuya NATSUI, Kyoichiro SHIZAWA, Yutaka UJISAWA. Effect of Coke Reactivity on Sinter Softening-melting Property by Simultaneous Evaluation Method of Carbonaceous and Ferrous. ISIJ International. 2011; 51: 1322–1332