

Modelos de previsão da qualidade metalúrgica do coque a partir da qualidade dos carvões individuais e do coque obtido no forno-piloto de coqueificação

Robson Jacinto Coelho

M.Sc Engenharia de Materiais pela REDEMAT, Analista Industrial da CST. E-mail: rcoelho@tubarao.com.br

Odilon José da Silva

Especialista de Controle Técnico da Área de Gusa da CST

Marcelo Tardim Alves

Especialista de Controle Técnico da Área de Gusa da CST

Luiz Afonso de Andrade

Especialista de Controle Técnico da Área de Gusa da CST

Paulo Santos Assis

Prof. Dr. Prof Titular da Escola de Minas da UFOP, Prof. da REDEMAT. E-mail: assis@em.ufop.br

Resumo

É bem conhecido o alto peso que o coque representa no custo final dos produtos, além do que as suas propriedades estão intimamente ligadas à performance dos altos-fornos. Portanto buscar uma qualidade do coque compatível com as necessidades do alto-forno e com o menor custo possível se transforma em uma tarefa difícil se não se dispuser de ferramentas que permitam uma correta seleção de carvões.

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver modelo de previsão para o DI - resistência mecânica do coque, através de análises estatísticas de dados industriais e coqueificação em escala-piloto.

O modelo de previsão do DI representa 75,8% dos dados industriais, obtendo-se um aumento de precisão de 8,07 pontos percentuais em comparação com o modelo atual. Portanto o novo modelo desenvolvido mostrou-se adequado e pode ser usado como ferramenta para auxiliar a compra de carvões.

Palavras-chave: Qualidade do coque; modelos de previsão, carvão.

Abstract

Coke has a major significance in the final cost of products. Besides, its properties are closely connected with the performance of blast furnaces. Therefore, seeking a type of coke compatible with the needs of the high furnace and at the lowest price may become a very hard task if it does not have the necessary tools available to accomplish a correct selection of coals.

The main goal of this dissertation is to develop models for the prediction for DI - Coke Mechanics Strength and CSR - Coke Strength after Reaction, through of statistics analyses of industrial data and coking in pilot scale.

The model for the prediction for DI represent 75,8% of industrial data, amounting to a precision improvement of 8,07% in comparison with the present model. Therefore, the new model has proved adequate and may be used as a tool to help the purchase of coals.

Keywords: *Coke quality; models for the prediction; coals.*

1. Introdução

O processo de coqueificação tem grande importância na produtividade e rentabilidade de uma indústria siderúrgica integrada. O coque, que desempenha funções vitais no processo de produção do ferro gusa, é produzido a partir de misturas de carvões metalúrgicos, preparadas para atender tanto as condições operacionais do processo de coqueificação como os requisitos de qualidade especificados pelo alto-forno. Portanto devem-se concentrar os esforços no sentido de melhoria da qualidade do coque compatível com as necessidades do alto-forno e com o menor custo possível.

Em uma indústria siderúrgica integrada, a aquisição de matérias-primas é uma etapa fundamental em termos de estratégia do negócio. Para a siderurgia brasileira, esse processo é de vital importância, principalmente quando se trata do carvão coqueificável, matéria-prima importada de diversos países e responsável por uma parcela altamente significativa dos custos de produção de aço no país, como se pode observar na Figura 1, que mostra a estratificação do custo de produção do ferro gusa da CST.

A partir de 1990, devido às deficiências do carvão nacional, a siderurgia brasileira passou a utilizar apenas carvões adquiridos no mercado externo em suas misturas para a fabricação do coque. Os carvões de boa qualidade estão escassos, o que indica um futuro sombrio para os países que dependem dessa matéria-prima. Apenas aqueles que possuem o domínio do processo é que poderão discutir e propor, adequadamente, modificações no processo, vislumbrando a utilização de carvões de qualidade inferior e a um custo mais baixo, sem prejuízo para a qualidade do coque e produtividade da bateria.

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver modelos de previsão da qualidade do coque (DI e CSR), através de análises estatísticas de dados industriais e coqueificação em escala-piloto da CST. Esses modelos são importantes

no aspecto de controle de qualidade, evitando variações na qualidade quando existe a necessidade de fazer alterações na mistura de carvões e também na política de compra de carvões.

2. Avaliação da qualidade física e estrutural do coque para os altos-fornos

A qualidade metalúrgica do coque pode ser definida como sendo a sua capacidade de preencher os requisitos básicos dele exigidos no alto-forno, sendo determinada a partir da avaliação dos papéis que ele desempenha no processo e/ou fatores que atuam sobre ele durante a sua passagem pelo reator ⁽²⁾.

O coque metalúrgico, produto da coqueificação, desempenha três funções principais no alto-forno: fornecimento de calor, gerar calor queimando na ponta das ventaneiras (papel térmico); fornecimento de gás redutor, fonte de carbono que provoca redução direta e indireta do minério de ferro (papel químico); fornecimento de estrutura de suporte de carga sólida e estrutura permeabilizadora à passagem de gases, descer até o cadinho sem perder seu formato (papel físico).

Os papéis térmico e químico do coque podem ser assumidos, em parte, por outros combustíveis, por exemplo, pelo carvão na operação com injeção de carvão pulverizado. O papel físico do coque é considerado de primordial importância para uma operação eficiente do alto-forno e não pode ser assumido por nenhum outro combustível ⁽²⁾.

Para cumprir com as funções de combustível, redutor, carburante e permeabilizador do processo de alto-forno, o coque deve apresentar as seguintes características:

- Máximo teor em carbono e mínimos teores em cinza, enxofre e umidade.
- Adequados valores de reatividade ao CO₂ e H₂O.
- Faixa granulométrica, ao ser carregado, estrita e adequada.
- Altos valores de resistência a degradação de origem mecânica, térmica e química.

3. Procedimentos experimentais

Para o desenvolvimento de modelos para o DI, diferentes misturas de carvões, com diferentes propriedades coqueificantes, foram enformadas, nos for-

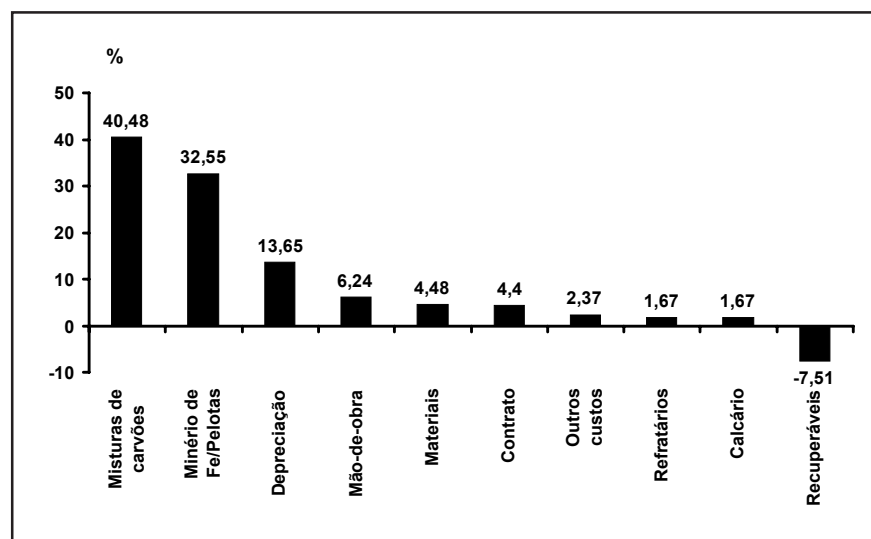


Figura 1 - Estratificação do custo de produção do ferro gusa da CST.

nos de coque da CST, com as seguintes dimensões: comprimento 15.200 mm, altura 6.500 mm, largura média 420 mm, conicidade 64 mm, volume útil 39,50 m³ e, no forno-piloto de coqueificação - FPC, capaz de coqueificar os carvões individuais ou misturas de carvões em condições similares às dos fornos industriais. Para realização dos ensaios de DI, utiliza-se o tambor de ensaios de DI. São utilizados, para realização dos ensaios de CRI, fornos elétricos. O equipamento destinado ao ensaio de CSR consiste de um tambor tipo "I". As características e especificações principais desses equipamentos são apresentadas a seguir.

As seguintes atividades foram desenvolvidas:

- I) Coleta de amostras de carvões coqueificáveis.
- II) Coqueificação da mistura de carvões nos fornos de coque da CST, com coleta e análise das amostras.
- III) Testes no FPC dos carvões individuais e de misturas de carvões, coleta e teste das amostras de coque.

4. Apresentação e discussão dos resultados

Consideram-se as misturas de carvões utilizadas no período de setembro de 2001 a maio de 2003. A necessidade da revisão do modelo atual de previsão da qualidade do coque pode ser justificada pela baixa precisão observada no modelo para o DI, que representa 67,7% dos dados reais e possui desvio-padrão de 0,28%. O modelo atual do DI utilizado pela CST foi desenvolvido através de regressão linear múltipla. As Figuras 2 e 3 mostram a baixa correlação entre os valores de DI previsto pelo modelo atual e os resultados obtidos na prática.

Modelo atual para o DI: Desvio-Padrão = 0,28%; R² = 67,7%.

$$DI = \alpha + 1,4466 \text{Fluidez efetiva} - 0,0013244TB + 2,1295 \text{Refletância média} - 0,29481 \text{Álcalis} + 0,06955TI \quad (1)$$

Onde:

DI = índice de resistência do coque, produzido industrialmente [%].

Fluidez efetiva = produto da fluidez da mistura pela refletância efetiva [logddpm].

TB = tempo bruto de coqueificação [min].

Refletância média = média das 10 medições determinadas por análise microscópica dos macerais [%].

Álcalis = soma do percentual na cinza dos alcalinos e ZnO [%].

TI = total de inertes [%].

α = constante = 79,532.

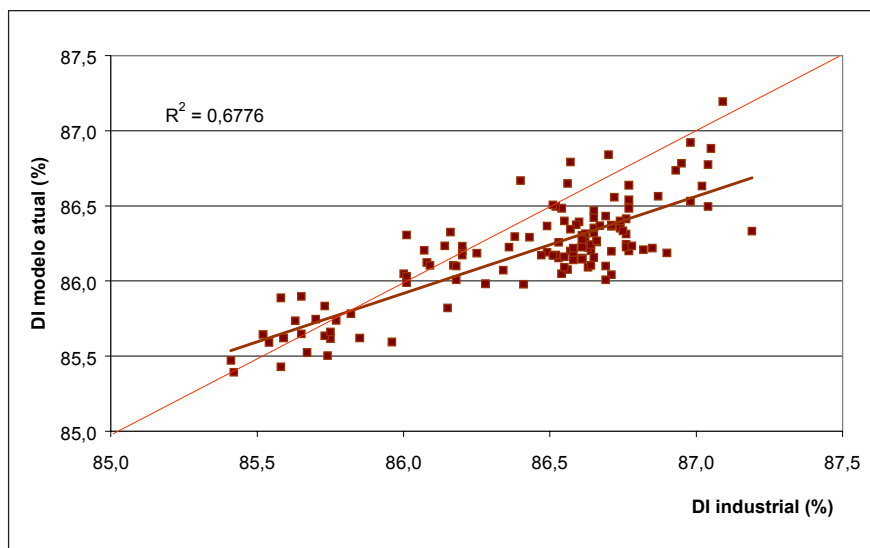


Figura 2 - Correlação entre o DI industrial e o DI previsto pelo modelo atual.

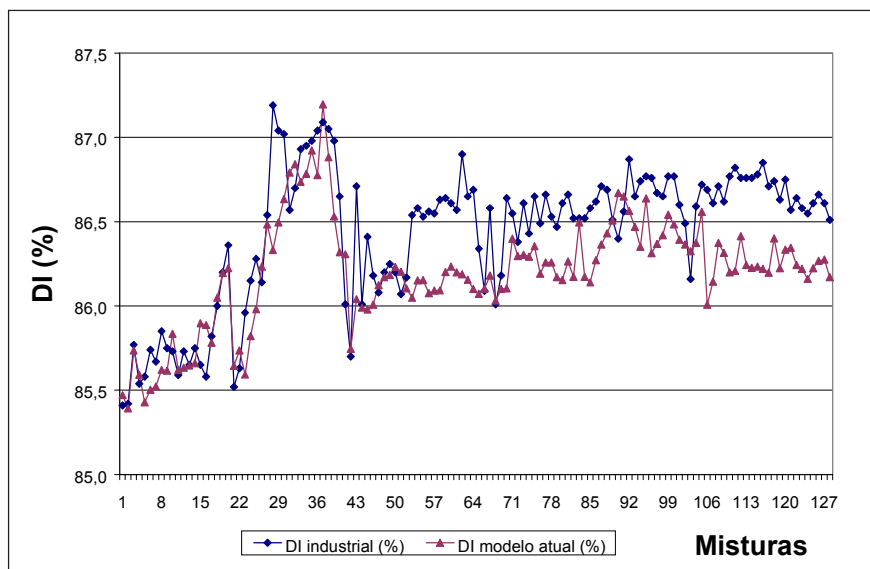


Figura 3 - Comparação entre o DI industrial e o DI previsto pelo modelo atual.

A revisão periódica desses modelos é necessária, principalmente em função da mudança da gama de carvões consumidos para a produção do coque e também devido à mudança de práticas operacionais.

4.1 Previsão da qualidade do coque

A transformação do carvão em coque é muito complexa e pode ser dividida em várias etapas. A qualidade metalúrgica do coque (CSR, CRI e DI), produzido em escala-piloto, a partir dos carvões individuais representa os fatores determinantes dos índices a serem obtidos no coque industrial.

Análise descritiva, análise de regressão linear múltipla, análise de resíduos e teste de normalidade foram ex-

cutados convenientemente para desenvolvimento dos modelos de previsão do DI e do CSR do coque produzido nos fornos de coque da CST. O programa estatístico utilizado para desenvolvimento dos modelos foi o minitab 13.32.

Consideram-se, para o desenvolvimento dos modelos, os dados das análises químicas e petrográficas dos carvões e os dados das análises metalúrgicas do coque, obtido tanto do FPC, quanto dos fornos de coque da CST, no período de setembro de 2001 a maio de 2003.

4.1.1 Modelo para o DI

Com base nos índices de resistência do coque, a análise de regressão linear múltipla dos dados levou ao desenvolvimento do modelo de previsão do DI produzido em condições industriais a

partir da qualidade do coque obtido do FPC. A Tabela 1 apresenta as variáveis utilizadas para desenvolvimento do modelo para o DI com as respectivas medidas estatísticas.

Um modelo de regressão ajustado, que pode representar a relação existente entre as variáveis envolvidas no processo e o DI, é:

$$DI = \alpha + 93,5 \sum DI - 0,537 (\sum DI)^2 \quad (2)$$

Onde:

DI = índice de resistência do coque, produzido industrialmente [%].

$\sum DI$ = média ponderada do DI de cada carvão da mistura, obtido com o coque do FPC [%].

α = constante = -3983.

Tabela 1 - Apresentação das variáveis com as medidas estatísticas.

Variável (%)	Tipo	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-Padrão
DI	contínua	128	85,41	87,19	86,43	0,42
DI	contínua	128	85,43	87,61	86,38	0,44

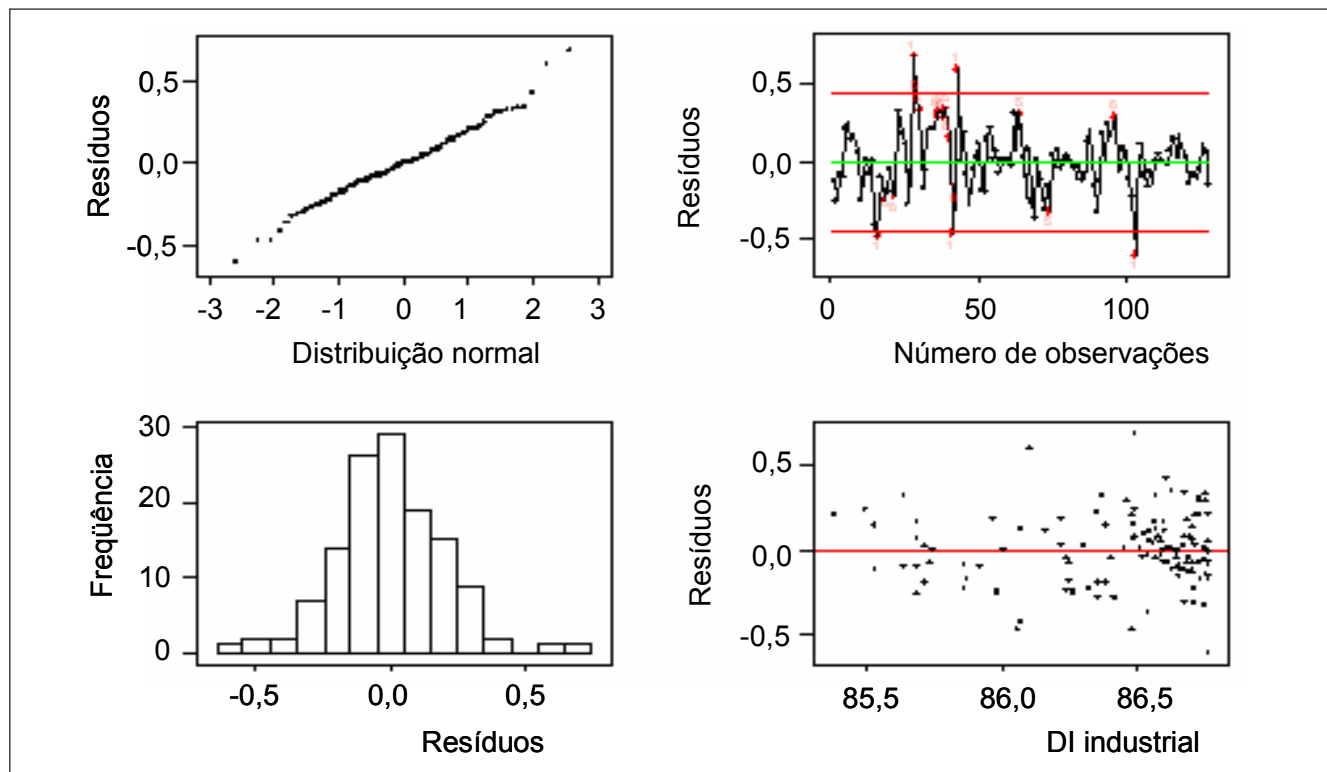


Figura 4 - Gráficos dos resíduos.

A Figura 4 apresenta a adequação do modelo de regressão linear múltipla para a variável DI. Observa-se que as pressuposições dos resíduos não foram violadas.

Para verificar os pressupostos de que os resíduos têm distribuição normal e média igual a zero, exigidos para validar o modelo gerado na análise de regressão, utilizaram-se o teste de Ryan-Joiner e o gráfico de probabilidade normal apresentados na Figura 5, portanto, em nível de significância de 5%, os resíduos têm distribuição normal. A Figura 5 também fornece o valor da média dos resíduos que é igual a zero.

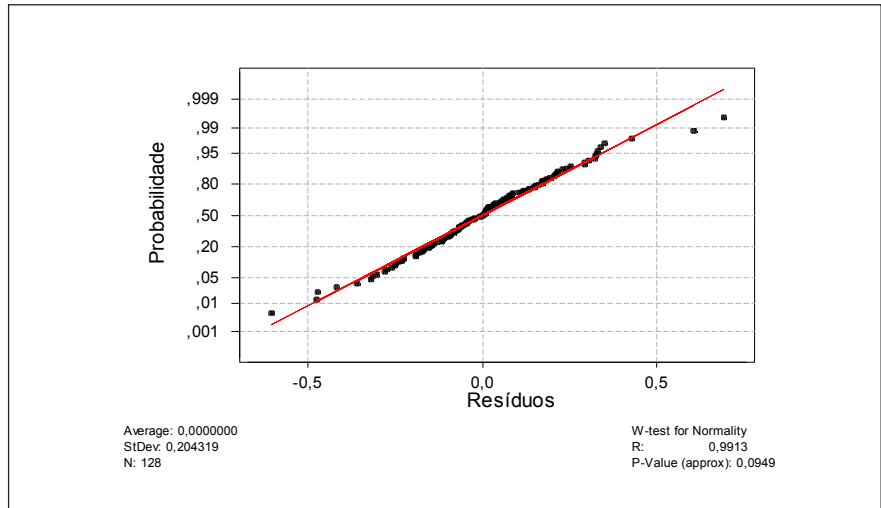


Figura 5 - Gráfico de probabilidade normal, teste de Ryan-Joiner.

Observa-se uma boa correlação entre os valores de DI previstos pelo novo modelo, equação (2), e os valores industriais, obtendo-se para 128 resultados um desvio-padrão de 0,20% e $R^2 = 75,8\%$, um $R^2_{ajustado} = 75,4\%$, como mostrado nas Figuras 6 e 7. O modelo ajustado representa 75,8% dos dados reais.

No desenvolvimento do modelo de previsão para o DI, utilizam-se apenas os dados do FPC. Pode-se justificar essa metodologia, pela necessidade de determinar uma correlação entre os resultados obtidos em escala industrial e os resultados obtidos em escala-piloto.

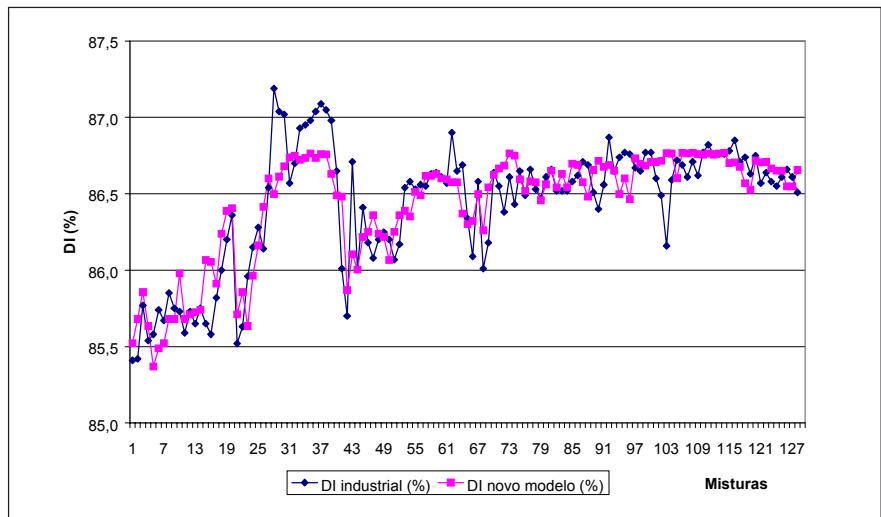


Figura 6 - Comparação entre o DI industrial e o DI previsto pelo novo modelo.

As Figuras 8 e 9 mostram a comparação e a correlação do DI industrial, do DI previsto pela equação atual e do DI previsto pelo novo modelo, respectivamente.

- **Novo modelo:** desvio-padrão = 0,20%; $R^2 = 75,8\%$.

$$DI = \alpha + 93,5 \sum DI - 0,537 (\sum DI)^2 \quad (2)$$

- **Modelo atual:** desvio-padrão = 0,28%; $R^2 = 67,7\%$.

$$DI = \alpha + 1,4466 \text{Fluidez efetiva} - 0,0013244TB + 2,1295 \text{Reflectância média} - 0,29481 \text{Álcalis} + 0,06955TI \quad (1)$$

O modelo de previsão do DI representa 75,8 % dos dados industriais, obtendo-se um aumento de precisão de 8,07% pontos percentuais em comparação com o modelo atual.

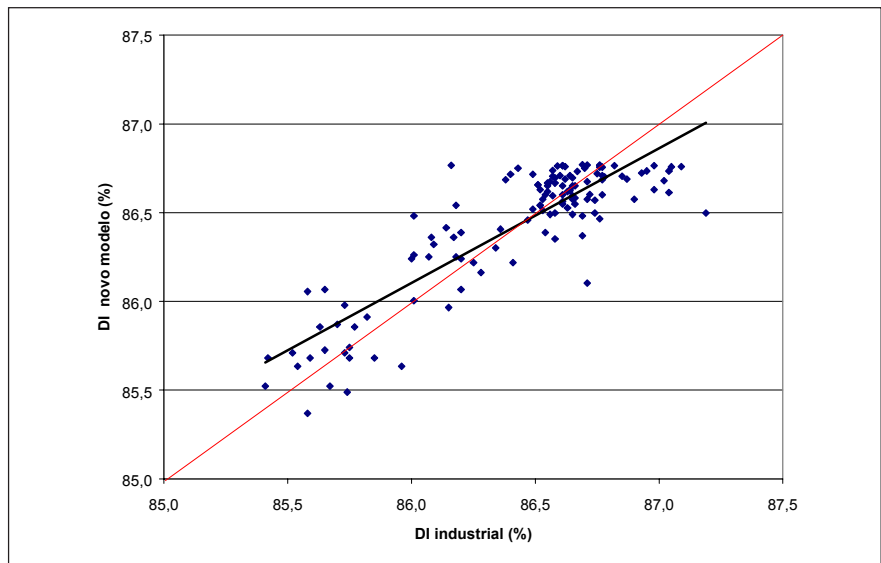


Figura 7 - Correlação de dados de DI do novo modelo e o DI industrial.

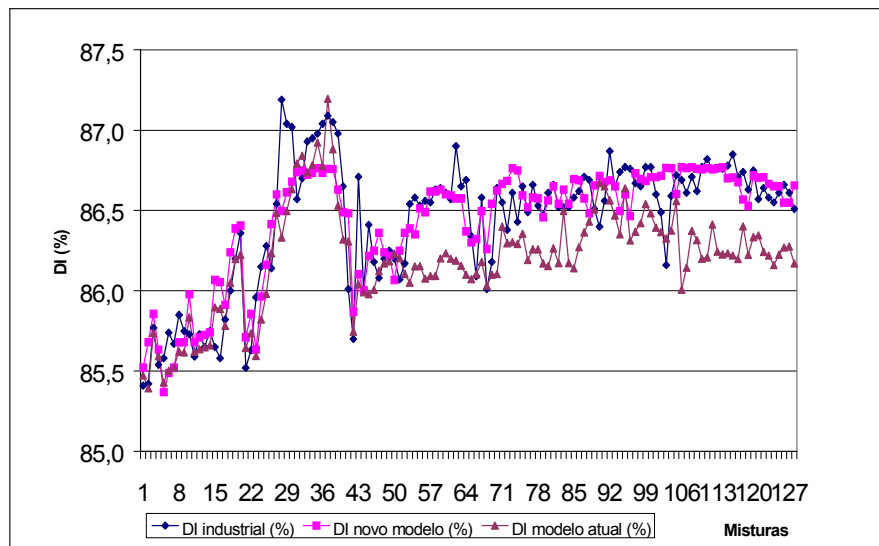


Figura 8 - Comparação de dados entre o DI industrial, o DI do novo modelo e o DI do modelo atual.

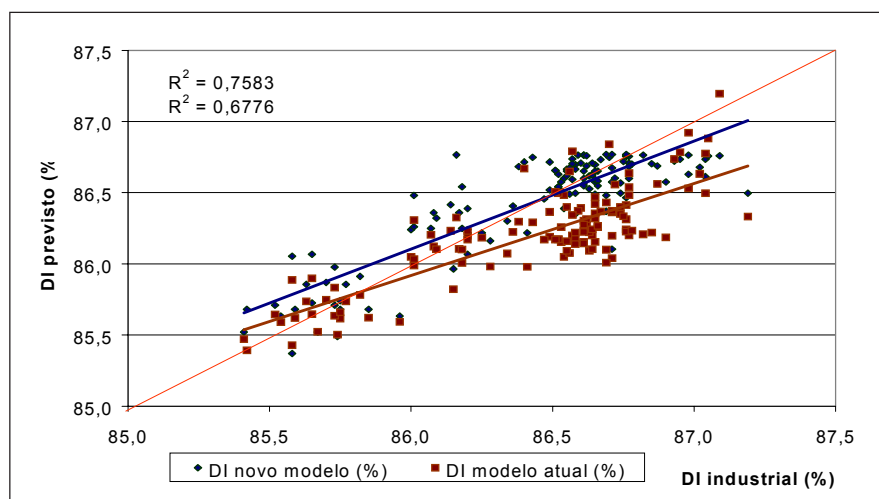


Figura 9 - Correlação de dados entre o DI industrial, o DI do novo modelo e o DI do modelo atual.

5. Conclusões

O modelo de previsão do DI, desenvolvido a partir de coqueificação em escala-piloto, representa 75,8 % dos dados industriais, obtendo-se um aumento de precisão de 8,07 % pontos percentuais em comparação com o modelo atual, assim a melhoria de precisão conseguida pelo novo modelo para o DI aumentará a certeza de que o coque produzido com uma determinada mistura atenderá aos requisitos de qualidade do alto-forno.

O modelo para o DI desenvolvido

mostrou-se adequado. Assim, após o acompanhamento no sistema de previsão de misturas e comprovação da eficácia, ele deve ser implantado definitivamente.

As misturas de carvões são planejadas em longo prazo, através de complexos sistemas que levam em consideração diversos aspectos como os prazos contratuais dos carvões, custo, previsão de recebimento, disponibilidade no pátio, previsão da qualidade do coque e segurança operacional das baterias. Nesse contexto, o modelo de previsão de DI é uma das ferramentas que auxiliará na compra de carvões.

Referências bibliográficas

- RODRIGUES NETO, Tobias. *Seleção e formulação de misturas de carvão usando uma abordagem multicritério e programação linear*. In: Programa de educação continuada. São Paulo: ABM, 2003. p.153-182.
- CARNEIRO, Rogério Tales da Silva. *O papel do coque no alto-forno*. In: Programa de educação continuada. São Paulo: ABM, jun., 2003. p.1-9.
- SOUZA, Luiz Octávio Barros de. *Características de coques oriundos de diferentes condições de coqueificação e suas Influências sobre a reação C-CO₂*. Curso de Pós - Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 1988. (Dissertação de Mestrado).
- LIA, Luiz Renato Bastos. *Modelo matemático unidimensional do processo de coqueificação*. Rio de Janeiro: Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1987. (Dissertação de Mestrado).
- REIS, H.M.B., ULHÔA, Murilo Botelho., CORREA, G. *Qualidade de coque de alto-forno*. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DA ABM,30; SEMINÁRIO DE CONTROLE QUÍMICO EM METALURGIA, 14; SEMINÁRIO DE CARBOQUÍMICOS, 10. Belo Horizonte: 1999. p.93-110.
- S.JUNIOR, N.A., MELO, A.T., SILVA, V.G. *Fatores que influenciam na reatividade do coque: a experiência da USIMINAS*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, nov, 1986. p.117-132.
- ULHÔA, M.B., SOUZA, L.O.B., GIUDICE, F.D.P. *Heterogeneidade de coque de forno horizontal*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 44., São Paulo, v. 2 p. 287-301, 1989.
- REIS, H.M.B., SILVA Júnior, H.R., CORRÊA, G. *Mapeamento da qualidade de coque em forno horizontal*. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS DA ABM, 32.Vila Velha: 2002. p. 337-346.
- ULHÔA, Murilo Botelho. *Modelos de previsão de resistência do coque*. In: Programa de educação continuada. São Paulo: ABM, Jun, 2003. p. 143-152.
- SHARMA,M.K et al. *Correlation studies on coke quality from pilot oven and commercial oven*. *Cokemaking International*. New York, n.2, p.26-29, 2000.
- DESHENG, Hu. *Control and prediction of coke quality at baosteel*. In: EUROPEAN COKE AND IRONMAKING CONGRESS, 4th. Paris: 2000. p.157-160.
- LIA, L.R.B., MARANHA, S.P.D. *Previsão da qualidade do coque: comparação entre regressões lineares e redes neurais*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 51. Porto Alegre, v.1. p. 197-207, 1996.
- LOISON, R., FOCH, P., BOYER, A. *Coke quality and production*. Butterworth & Co (Publishers) Ltda, 1989.
- COELHO, Robson Jacinto. *Modelos de previsão de qualidade metalúrgica do coque a partir da qualidade dos carvões individuais e do coque obtido no forno-piloto de coqueificação da CST*. 2003. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais).

Artigo recebido em 06/10/2003 e aprovado em 28/02/2004.