

MODELAMENTO MATEMÁTICO DA CUBA SUPERIOR DO FORNO TECNORED

José Carlos D'Abreu ¹
 Hélio Marques Kohler ²
 José Henrique Noldin Junior ³
 Pedro Henrique Carpinetti Costa ⁴
 Edmar Saul Marcheze ⁴
 Norberto Jacomini ⁵

Resumo

O processo TecnoRed é uma tecnologia inovadora de produção de ferro primário que combinou no seu desenvolvimento conhecimentos teóricos e empíricos, baseados em extensivos testes realizados na usina piloto e através de estreita colaboração com universidades e institutos de pesquisa. As campanhas da usina piloto focaram na operação em reatores de diferentes escalas incluindo uma “fatia” do forno industrial. Esta estratégia garantiu as condições para definição das dimensões internas do reator, geometria da zona de combustão, perfis térmico e gasoso e etc., além de fornecer dados reais para alimentação e calibração da modelagem matemática do processo. Este trabalho apresenta o primeiro modelo matemático desenvolvido para a tecnologia TecnoRed, modelo este que trata o comportamento de um aglomerado auto-redutor na zona superior do forno (zona de redução no estado sólido). Alguns resultados típicos são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: TecnoRed; Auto-redução; Modelagem; Pelota auto-redutora.

MATHEMATICAL MODELING OF THE TECNORED PROCESS – UPPER SHAFT

Abstract

The TecnoRed process is a new ironmaking technology, developed on a unique approach that combined empirical and theoretical knowledge backed by extensive tests carried out in a dedicated pilot-plant and with close support of universities and research centers. Campaigns in the pilot-plant focused on operate different reactors of different sizes, including a full size slice of the industrial furnace. This approach provided actual conditions to develop the main features of the process such as the internal dimensions, raceway pattern, thermal and gaseous profiles, etc, besides provide reliable data to feed and calibrate a specific mathematical process modeling. This paper presents the first computer model used by the TecnoRed technical staff, focusing the behavior of a self reducing agglomerate in the upper shaft of the furnace (zone of solid state reduction). Some results of this model are given and discussed.

Key words: TecnoRed; Self-reduction; Modeling; Self-reducing pellets

I INTRODUÇÃO

O processo TecnoRed é uma tecnologia inovadora, concebida para a produção de ferro-primário líquido, através da redução de aglomerados auto-redutores (pelotas ou briquetes) de cura a frio, produzidos a partir de finos de minérios de ferro ou resíduos ferrosos, mais um agente redutor como finos de coque verde de petróleo, finos de carvão vegetal ou finos de carvão mineral. Estes materiais, misturados com fluxantes e ligantes, são aglomerados e curados ao tempo ou em equipamentos de concepção especial.

Os aglomerados produzidos são então reduzidos e fundidos em um forno de cuba com geometria diferenciada, o forno TecnoRed, que por suas características únicas, permite o uso variado de combustíveis sólidos de baixo custo, como coque verde de petróleo, coque siderúrgico, carvão mineral ou semi-coques, produzindo metal líquido e escória com características similares aos produzidos pelos processos convencionais.

¹Membro da ABM, D.Sc., Professor Associado. PUC-Rio. Rua Marques de São Vicente 225, 542-L - 22453-900 – Rio de Janeiro - RJ

²Membro da ABM. Ph.D., Consultor. Rua Marques de São Vicente 225, 542-L - 22453-900 – Rio de Janeiro - RJ

³Membro da ABM. M.Sc., D.Sc., Engenheiro Sênior. Tecno-Logos. Tecno-Logos S/A. Rua General Garzon, 22/306 – 22470-010 - Rio de Janeiro - RJ

⁴Membro da ABM. M.Sc., Engenheiro Sênior. Tecno-Logos S/A. Rua General Garzon, 22/306 – 22470-010 - Rio de Janeiro - RJ

⁵Membro da ABM. Especialista Técnico. Tecno-Logos S/A. Rua General Garzon, 22/306 – 22470-010 - Rio de Janeiro - RJ

A primeira usina industrial do processo brasileiro Tecnoled de produção de ferro primário está sendo construída no Brasil, visando a produção ambientalmente sustentável de ferro gusa de alta qualidade e baixo preço a partir de matérias-primas não convencionais. A produção inicial da usina será de 10 t/h e seu objetivo principal será o de demonstrar a viabilidade técnica-comercial-ambiental do processo, especialmente o forno Tecnoled.

Historicamente, antes de alcançar tal estágio de maturidade, esta tecnologia passou por cerca de 20 anos de desenvolvimento em planta piloto. Este desenvolvimento sempre foi baseado em uma sólida metodologia que aliou conhecimentos empíricos e teóricos, com estreita cooperação com universidades e centros de pesquisa, particularmente o grupo de siderurgia da PUC-Rio.

Esta cooperação resultou numa série de bancos de dados operacionais, teses acadêmicas e publicações tanto nacionais como internacionais, desenvolvimento de ligantes alternativos, observação in-loco de processos reacionais relevantes, aprendizado dos mecanismos e fenomenologia do processo, além de modelos matemáticos específicos ao processo e à auto-redução.

O modelamento matemático discutido neste trabalho foi concebido de maneira a simular o comportamento de um aglomerado individualmente, durante sua descida na zona superior do forno Tecnoled, acompanhando detalhadamente o comportamento de aquecimento e de redução do mesmo.

2 O MODELAMENTO MATEMÁTICO

O modelamento foi desenvolvido para a zona de auto-redução do forno (cuba superior). A metodologia adotada foi a da solução numérica discreta, devido à sua intrínseca flexibilidade que permitiu, inclusive, a introdução continuada de vários progressos obtidos no desenvolvimento da tecnologia.

Basicamente, este modelo discreto considerou a análise e quantificação do comportamento dos aglomerados na carga como uma descrição fenomenológica para as transferências de calor e reações químicas envolvidas. O modelo baseia-se em um único aglomerado, que a cada tempo reside em alguma das fatias horizontais em que a zona superior do forno foi dividida. A espessura adotada das fatias foi da ordem da dimensão característica dos aglomerados.

O tempo de residência dos aglomerados nos elementos corte (fatias) é determinado pela velocidade de alimentação da carga. O aglomerado é dividido em cascas concêntricas cuja espessura é definida pela difusividade térmica, sendo esta uma função dos vários materiais constituintes. Estas cascas são usadas pelo modelo para dimensionar o progresso da conversão química dentro do aglomerado.

Adicionalmente o fluxo total de gás é distribuído entre os aglomerados em cada corte horizontal em obediência às condições operacionais da zona do forno.

Em ordem de etapas, a arquitetura do algoritmo do modelo, escrita em Turbo-Pascal, obedece a seguinte rotina:

- Aglomerado entra no elemento z do forno vindo de “z-1”;

- cálculo de todas as propriedades do gás na temperatura do elemento “z-1” do forno (densidade, massa molecular, calor específico, viscosidade, etc);
- cálculo da distribuição das frações mássicas do gás entre os aglomerados no elemento “z” do forno de acordo com o perfil de fluxo do gás;
- determinação dos parâmetros termais do sistema (coef. de filme convecção, condutividade termal efetiva, etc) à temperatura do elemento “z-1”;
- avaliação do calor trocado por convecção na casca externa do aglomerado;
- cálculo dos calores conduzidos entre as cascas internas do aglomerado;
- correção da composição do aglomerado por meio da cinética reacional, avaliação do perfil de temperatura e do balanço de massa do aglomerado no elemento “z”;
- determinação, por meio do balanço térmico nos sólidos da nova temperatura do aglomerado (T_s em “z”), a ser usada nos cálculos para o elemento “z + 1”;
- avaliação do balanço de massa do gás para o elemento “z” do forno levando em conta que a metodologia de cálculo deve obedecer o fato que o fluxo de gás é de contra-corrente; e
- cálculo do balanço térmico do gás, levando em consideração as transferências de calor e perdas, para determinação da nova temperatura do gás (T_g em “z”) a ser usada nos cálculos para o elemento “z + 1”.

Algumas hipóteses operacionais foram feitas para os estudos de caso apresentadas neste trabalho: os fluxos no leito reacional são considerados unidimensionais e de natureza pistonada; os aglomerados são assumidos como sendo pelotas exibindo arranjo no leito do tipo cúbico de face centrada; os gases possuem comportamento ideal e por último, por convenção, os processos de convecção, condução e reação química são considerados na modelagem sequencialmente.

As principais equações da rotina de cálculo são as seguintes:

$$\Delta r = \sqrt{\alpha \Delta t} = \sqrt{\frac{k \Delta t}{\rho C_p T}} \quad (1)$$

Na Equação 1 Δr é a profundidade radial de penetração do calor; k a condutividade térmica efetiva; ρ a densidade; e C_p o calor específico do material das cascas do aglomerado.

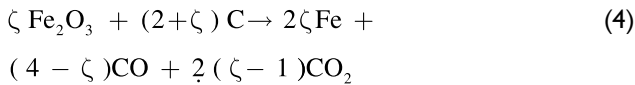
$$dq_{\text{conv}} = A_1 H (T_g - T_1) dt \quad \left| H = \frac{1}{1/h + (\Delta r/2)/k} \right. \quad (2)$$

Para a Equação 2 dq_{conv} é o calor de convecção trocado entre o aglomerado e o gás; A_1 a área da superfície externa dos aglomerados; H o coeficiente global de troca de calor (a média harmônica entre o coeficiente de filme de convecção h e a condutividade térmica, k); T_g é a temperatura do gás; e T_1 a temperatura da casca externa do aglomerado;

$$dq_{\text{cond}} = -\rho C_p V_i dT_i \quad (3)$$

Na Equação 3 dq_{cond} é o calor conduzido entre as cascas “ i ” e “ $i+1$ ” do aglomerado e ainda V_i e T_i são o volume e a temperatura da casca “ i ”, respectivamente.

O processo que avalia as entalpias para o processo de redução da hematita ao ferro metálico, considera que a taxa global da cinética é controlada pela reação de Boudouard e que as fases wüstita e ferro alcançam o equilíbrio, portanto:



$$\zeta = 2[2 - Z] / [1 + Z] \quad (5)$$

$$Z = [1 + \exp\{-\Delta G_{\text{red}}^0 / (RT)\}]^{-1} \quad (6)$$

$$v_{\text{gb}} = k_{\text{eff}} \times f[p(\text{CO}_2)] \quad (7)$$

Aqui ΔG_{red}^0 é a energia livre do equilíbrio wüstita-ferro, v_{gb} é a velocidade reacional global; f é a função de dependência da pressão parcial de CO_2 e k_{eff} o coeficiente ahrreniano da equação cinética da reação de Boudouard.

O diagrama esquemático mostrado na Figura 1 resume o esquema de cálculo.

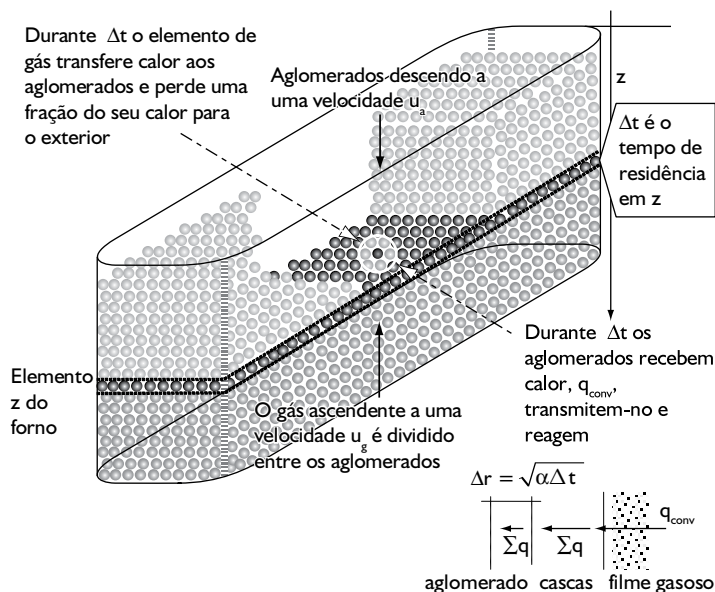


Figura 1. Esquema de cálculo do modelo.

3 OPERAÇÃO DO SOFTWARE

A primeira tela do modelamento matemático, contém alguns parâmetros que permitem ao usuário o estabelecimento dos dados de entrada para uma campanha específica, tais como propriedades das matérias-primas, modelo de sopro, temperatura do gás de topo, geometria do forno, etc.

Objetivando uma maior flexibilidade e melhorando a interatividade do software, cinco telas adicionais foram incorporadas ao sistema, permitindo ao operador acesso à todas as variáveis e parâmetros utilizadas no modelo, como coeficientes termodinâmicos e cinéticos, e dados complementares como porosidade do leito,, coeficientes de engenharia da chama e assim por diante.

4 RESULTADOS DO MODELO

A Figura 2 mostra um resultado do software, baseado em dados operacionais simulados do forno. A área ampliada detalha o significado das principais linhas do gráfico.

De acordo com os resultados do “exemplo básico” mostrado acima na Figura 2, o grau de redução no final da Zona de Redução (ZR) foi de 93,6% em 27,3 minutos, confirmando a rapidez das reações que ocorrem no processo TecnoRed. Além disso, uma zona de reserva térmica devida à reação endotérmica de Bourdouard para um redutor de alta reatividade apresenta-se claramente. Como previsto pelos testes de bancada, um gradiente térmico dentro do aglomerado é também indicado pelo modelo, atestando a importância do mecanismo de transferência de calor no processo global. Finalmente, no canto inferior esquerdo do gráfico, o modelo prediz o estado final do aglomerado reduzido, podendo indicar fusão primária de escória, o final da redução, ou como mostrado no exemplo, a fusão da fase metálica.

Levando em conta que o forno TecnoRed utiliza duas diferentes fontes de carbono (reductor dentro do aglomerado e como combustível no forno), a Figura 3 ilustra o comportamento do aglomerado quando considerada uma reatividade 15% menor do reductor, em relação ao exemplo básico.

Adicionalmente foi feita uma simulação onde a vazão do sopro frio é aumentada em cerca de 40% com relação ao exemplo básico. A Figura 4 mostra a resposta do software para esta simulação.

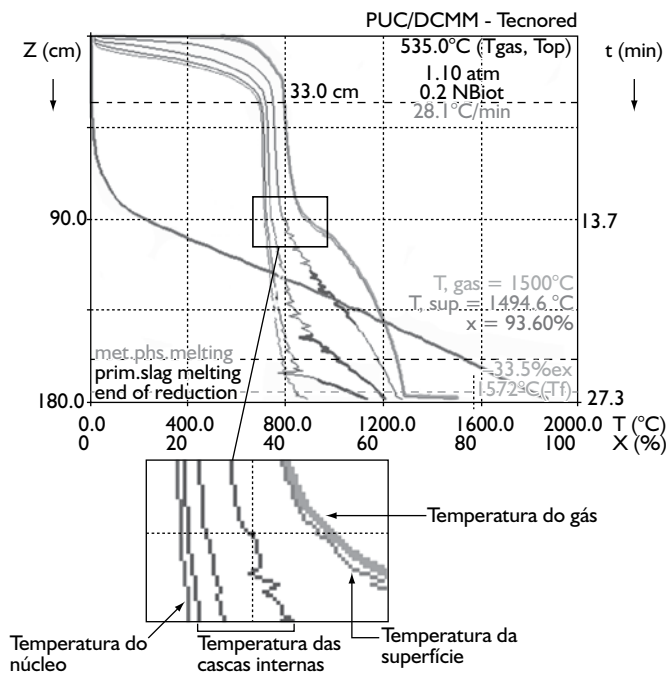


Figura 2. Exemplo básico dos resultados do software.

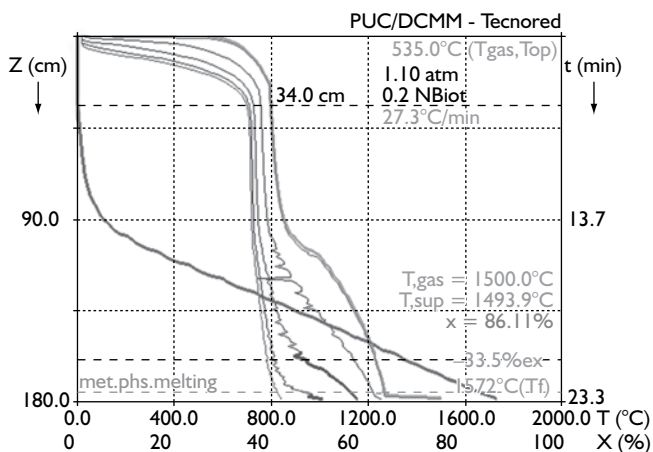


Figura 3. Variação do exemplo básico pela diminuição da reatividade do redutor.

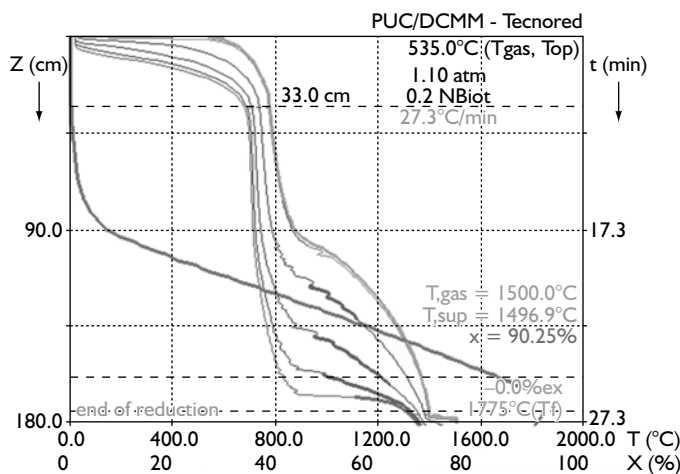


Figura 4. Variação do exemplo básico pelo aumento da vazão de ar na ventaneira de sopro frio.

Com relação à zona de reserva térmica nenhuma modificação significativa é observada comparando-se ao exemplo básico. Por outro lado, a simulação produziu uma diminuição na metalização, de 93,6% no caso básico para 90,3%.

Vale a pena ressaltar que os dados experimentais colhidos ao longo dos anos e nos muitos testes experimentais realizados na planta piloto foram utilizados para validação do modelo matemático. Como resultado deve-se ressaltar que o modelo desenvolvido serviu como ferramenta à equipe técnica da TecnoRed, para o entendimento das principais fenomenologias do processo, auxiliando no scale-up da tecnologia e no projeto do reator industrial.

5 CONCLUSÕES

O software mostrou-se útil na simulação da operação do forno TecnoRed, evidenciando as altíssimas velocidades reacionais atingidas na redução dos aglomerados auto-redutores, o que é a principal característica desta inovadora tecnologia;

A simulação do processo confirmou a existência de uma pequena zona de reserva térmica no forno TecnoRed, com intensidade extremamente dependente da reatividade do redutor usado;

Além disso, a modelagem indicou a importância dos mecanismos de troca de calor na zona superior do forno devido à existência de significantes gradientes térmicos entre a superfície e o núcleo dos aglomerados, confirmando assim os experimentos de bancada;

A importância da pós-combustão interna do CO pelo sopro secundário foi evidenciada pelos valores dos índices de metalização e pelos principais fatores que afetam a formação da zona coesiva;

Este modelo matemático, sem dúvida, abriu o caminho para o aperfeiçoamento da geometria dos aglomerados (briquetes cilíndricos ou em formato de traveseiro) e para o projeto de diferentes reatores (geometria, seção transversal, comprimento e largura).

REFERÊNCIAS

- 1 CONTRUCCI, M. Tecnoired process industrial plant in construction. In: BEYOND THE BLAST FURNACE CONFERENCE, 2000, Atlanta, EUA. Atlanta: Gorham, 2000.
- 2 D'ABREU, J.C.; NOLDIN JUNIOR, J. H.; MARTINS, K. M.; ARAUJO, D. R. Kinetics and morphological assessment of self-reducing briquettes of hematite and magnetite ores. In: SCANMET-INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROCESS DEVELOPMENT IN IRON AND STEELMAKING, 2., 2004, Luleå, Suécia. [S.n.t.]
- 3 NOLDIN JUNIOR, J.H.; D'ABREU, J.C.; KOHLER, H.M.; RODRIGUES FILHO, R.N.; MARTINS, K.M. A kinetic study of a self-reducing briquette aiming at the new ironmaking technologies. In: CONFERENCE OF METALLURGISTS, 41., 2002, Canada. [S.n.t.]. 1 CD.
- 4 NOLDIN JUNIOR, J.H.; D'ABREU, J.C.; MARTINS, K.M. Kinetics and morphological studies of a carbon composite briquette aiming the emergent ironmaking technologies. In: TMS ANNUAL MEETING, 132., 2003, San Diego, EUA. [S.n.t.]
- 5 TAKANO, C.; MOURÃO, M.B.; D'ABREU, J.C.; NOLDIN JUNIOR, J.H. Physical and chemical behaviour of self-reducing agglomerates. In: SCIENCE AND TECHNOLOGY OF INNOVATIVE IRONMAKING FOR AIMING AT ENERGY HALF CONSUMPTION, 2003, Tokyo. [S.n.t.]
- 6 NOLDIN JUNIOR, J.H.; CONTRUCCI, M. A. ; MEIJER, K. ; D'ABREU, J. C. Tecnoired process - Low cost pig iron production. In: SCRAP SUBSTITUTES AND ALTERNATIVE IRONMAKING, 4., 2004, Baltimore, USA. [S.n.t.]
- 7 NOLDIN JUNIOR, J.H.; BENTES, M. A. G.; D'ABREU, J. C.; ROSSI, L. A. LEITE, A. B. Recycling of CST by-products by Tecnoired ironmaking. In: INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING, 2., 2004, Vitória. **Anais...** São Paulo: ABM, 2004.
- 8 NOLDIN JUNIOR, J.H.; CONTRUCCI, M.A.; D'ABREU, J.C.; JACOMINI, N. Fuel flexibility in the Tecnoired process. In: INTERNATIONAL MEETING ON IRONMAKING, 2., 2004, Vitória. **Anais...** São Paulo: ABM, 2004.
- 9 D'ABREU, J.C.; KOHLER, H.M.; NOLDIN JUNIOR, J.H. Reduction Simulation of a Descending Self-Reducing Pellet in the Upper Shaft of the Tecnoired Furnace. In: JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 5, 2004, Vitória. **Anais...** São Paulo: ABM, 2004.

Recebido em: 03/06/07

Aceito em: 22/06/07

Proveniente de: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 34., 2006, Ouro Preto, MG. São Paulo: ABM, 2006.