



PREVISÃO DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO DO CONVERSOR LD ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO DE CONTROLE SEMIDINÂMICO¹

Zilmar Alcântara Júnior²
Alexandre Furtado Ferreira³

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo averiguar se a utilização de dados intermediários do processo de refino primário em Conversor LD-KGC aumenta o acerto na previsão da temperatura de vazamento do aço líquido, através de modelo de controle semidinâmico. Para tal foi desenvolvido um modelo matemático de controle, implementado computacionalmente em Fortran 90, que calcula, de forma iterativa, balanços de massa e balanços térmicos dos constituintes do banho metálico num Conversor LD durante o sopro de oxigênio. Quando o sopro de oxigênio atinge 89%, rotineiramente, uma sublança desce paralela à lança de oxigênio para dentro do Conversor LD a fim de coletar amostra e medir a temperatura do banho metálico. Através desse dado intermediário (temperatura) coletado rotineiramente a 89% do sopro, foram feitos ajustes no modelo de modo a realimentar os cálculos dos balanços, conferindo assim um caráter semidinâmico ao mesmo. Para sua validação os resultados calculados foram comparados com dados comerciais. As previsões de temperatura de fim de sopro obtidas com o modelo semidinâmico foram mais precisas do que as obtidas com o modelo de controle estático.

Palavras-chave: Conversor LD; Modelamento matemático; Balanço de massa; Balanço térmico.

ESTIMATES OF CASTING TEMPERATURE IN LD CONVERTER TROUGH MATHEMATICAL MODEL OF SEMIDYNAMIC CONTROL

Abstract

This study aims to investigate if the use of intermediate data of the primary refining process LD-KGC Converter increases the accuracy in predicting the temperature of casting of liquid steel through model of semidynamic control. To this end we developed a mathematical model of control, computationally implemented in Fortran 90, which calculates iteratively, mass balances and heat balances of the constituents in the melt during the oxygen blowing in LD Converter. When the oxygen blowing reaches 89%, routinely, a subsection descends parallel to releases oxygen into the LD Converter in order to collect samples and measure the temperature of the melt. Through this intermediate data (temperature) collected routinely to 89% of the blow, adjustments were made in the model in order to feedback the calculations of balances, thus providing a semidynamic character to the model. To it's validate the calculated results were compared with commercial data. The estimates of final blow temperature from semidynamic model were more accurate than those obtained with the model of static control.

Key words: LD Converter, Mathematical Model, Mass Balance, Heat Balance.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Aluno do Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica - Universidade Federal Fluminense.

³ Professor Adjunto - Universidade Federal Fluminense.



1 INTRODUÇÃO

A proposta é de se analisar a influência da utilização de dados intermediários de refino primário do aço na geração de resultados de fim de sopro calculados pelo modelo matemático de controle semidinâmico. Tal análise tem caráter acadêmico, visando o estudo do comportamento do modelo em questão. A futura utilização prática do modelo aqui apresentado será em função de seu amadurecimento e oportunidade industrial.

A constante busca pela qualidade do aço é um importante ponto nas atividades siderúrgicas desenvolvidas atualmente. À medida que a siderurgia evoluiu ao longo da história, o aço foi se tornando um produto cada vez mais refinado e a contínua evolução dos processos de fabricação aumentou a capacidade de se produzir aços de diversos tipos, com composições, propriedades e aplicações cada vez mais específicas, conforme Mourão et al.⁽¹⁾

Ciente dos benefícios de se conseguir um processo siderúrgico sob controle como mostra Campos,⁽²⁾ foi desenvolvido um modelo matemático semidinâmico, implementado computacionalmente em Fortran 90, que utiliza dados de entrada (sucata metálica, gusa líquido, oxigênio soprado e outros) e dados intermediários (temperatura da sublança) coletados rotineiramente durante o sopro de oxigênio no Conversor LD.

Os cálculos iniciais são realizados a partir de informações de carregamento do conversor. Os resultados obtidos são corrigidos a 89% do sopro de oxigênio, quando sublança desce para dentro do conversor para medir a temperatura e coletar amostra do banho metálico. A temperatura a 89% do sopro possibilita a realização de ajustes nos cálculos subsequentes.

O modelo semidinâmico desenvolvido tem como resultado a previsão da temperatura de fim de sopro em conversor de sopro combinado. Para tal, serão resolvidos iterativamente balanços térmicos e de massa para os componentes presentes no banho metálico.

A consideração dos balanços realizados a 89% do sopro de oxigênio caracteriza um ponto intermediário de ajuste dos resultados, conferindo assim um caráter semidinâmico ao modelo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O modelo Semidinâmico foi utilizado para calcular a temperatura de vazamento de quatorze corridas comerciais de um mesmo conversor de sopro combinado previamente selecionadas e agrupadas de acordo com suas características.

As temperaturas calculadas por cada modelo foram comparadas com as temperaturas de vazamento. A diferença entre calculado e medido foi considerada aceitável quando esteve dentro da faixa de $\pm 15^{\circ}\text{C}$. Este critério foi baseado em práticas siderúrgicas.

Os cálculos do modelo são baseados no balanço de massa e balanço térmico que ocorrem no conversor de sopro combinado durante o sopro de oxigênio.

Para a realização dos cálculos foi necessário adotar certas premissas, como vistas em Ferreira.⁽³⁾ Também são utilizadas equações empíricas que melhor se ajustaram aos dados experimentais do conversor de sopro combinado.

As premissas assumidas no modelo foram:

- o rendimento dos fundentes adicionados no processo é de 90%;
- 2% da carga metálica se perde como poeira; e



- 99% do carbono é oxidado na forma de CO.

As equações empíricas utilizadas foram:

- partição do fósforo, $L_P = (\%P)/[\%P]$;
- partição do manganês, $L_{Mn} = (\%MnO)/[\%Mn]$;
- teor de oxigênio dissolvido no fim de sopro;
- teor de FeO na escória de fim de sopro; e
- perdas térmicas.

2.1 Balanço Global

O modelo desenvolvido no presente trabalho utilizou equações que representam os balanços de massa e balanços térmicos que ocorrem durante o processo de fabricação de aço em conversor de sopro combinado.

Esses balanços são resolvidos de forma iterativa até que seja encontrada uma solução, ou seja, toda massa e energia que entram no conversor terão que igualar a energia e massa que saem do conversor no final do sopro de oxigênio.

É considerado um valor aceitável quando a diferença entre entrada e saída seja menor ou igual a 10^{-3} .

2.1.1 O balanço de massa

Os cálculos de balanço de massa são realizados com base no raciocínio esquematizado na Equação (1), massas em kg.

$$\boxed{\text{Massa Acumulada}} = \boxed{\text{Massa que Entra}} - \boxed{\text{Massa que Sai}} \quad \text{Eq. (1)}$$

O balanço de massa será calculado através do somatório dos balanços de massa parciais dos materiais, como exposto a seguir:

- balanço de massa do carbono;
- balanço de massa do silício;
- balanço de massa do ferro;
- balanço de massa do fósforo;
- balanço de massa do manganês;
- balanço de massa do oxigênio;
- balanço de massa do enxofre; e
- balanço de massa do alumínio.

2.1.2 O balanço térmico

O balanço térmico é realizado com base no mesmo raciocínio do balanço de massa, ou seja, o calor que entra menos o calor que sai (e ainda calor contido e gerado).

O balanço térmico calculado neste trabalho tem como objetivo prever a temperatura do metal líquido a 89% de sopro e no final da corrida. Para tal, o balanço térmico foi desenvolvido com base na conservação de entalpia do sistema.

Uma estratégia para se calcular o balanço térmico é calcular as entalpias do gusa, das reações e da dissolução dos óxidos na escória formada. Sendo a temperatura do gusa a mesma do início de sopro e a soma das entalpias de materiais que entram no conversor iguais à soma das perdas térmicas dos materiais que deixam o



conversor, isto é do metal líquido, da escória dos gases de exaustão e das perdas térmicas.

O balanço térmico foi formulado em consonância com as informações acima e está exposto na Equação (2), entalpias em Joule.

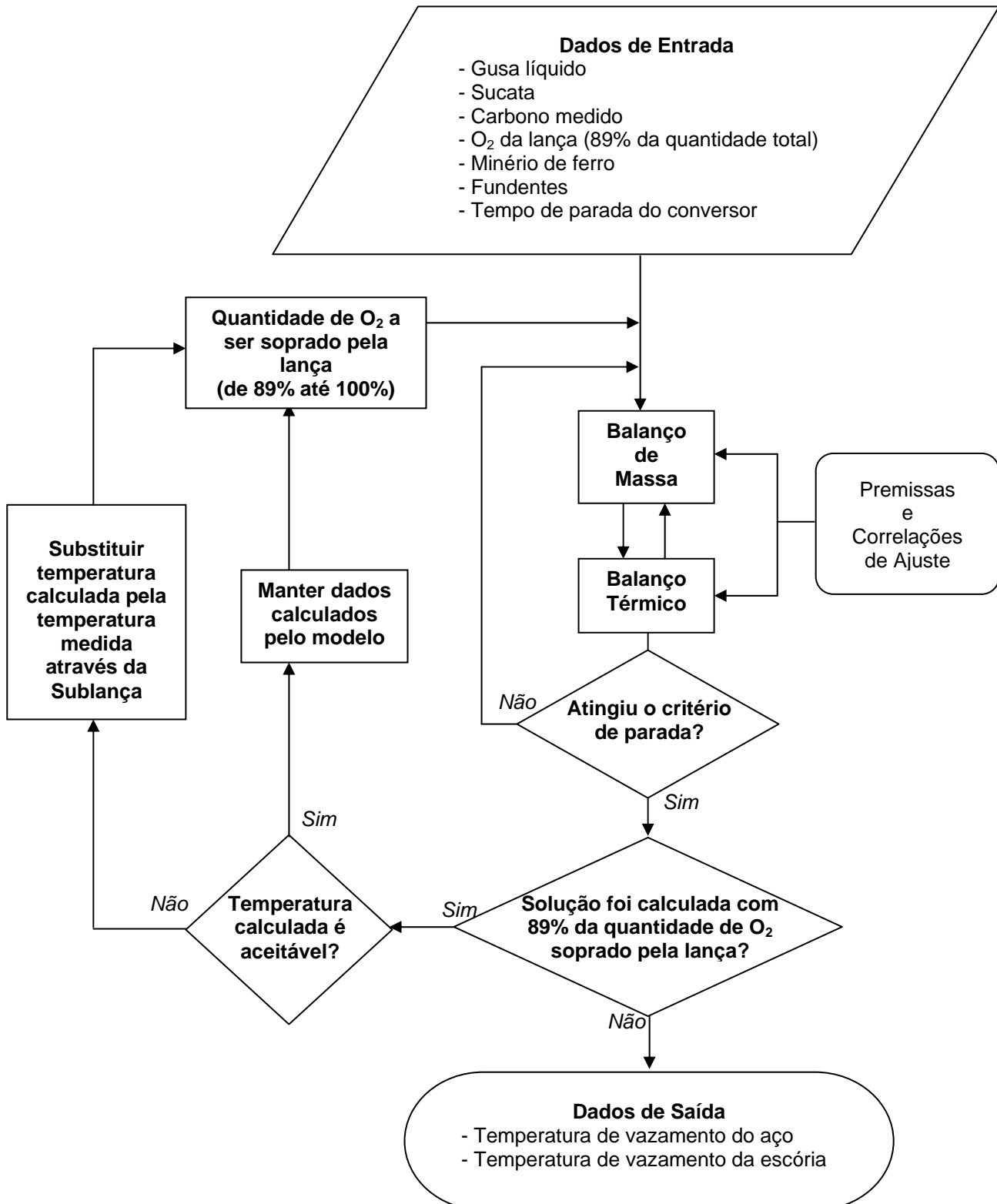
$$\begin{aligned} & \text{Entalpia do Gusa Líquido +} \\ & \text{Entalpia do Minério de Ferro +} \\ & \text{Entalpia do FeO das Sucatas +} \\ & \text{Entalpia dos Fundentes} \end{aligned} = \begin{aligned} & \text{Entalpia do Aço Líquido +} \\ & \text{Entalpia da Escória +} \\ & \text{Variação de Entalpia dos Óxidos +} \\ & \text{Entalpia de Dissolução dos Óxidos na Escória +} \\ & \text{Entalpia dos Gases +} \\ & \text{Perdas Térmicas} \end{aligned} \quad \text{Eq.(2)}$$

A equação acima, adaptada de Ferreira,⁽³⁾ possui como incógnita somente a temperatura de fim de sopro, que é calculada iterativamente através de balanço de massa e balanço térmico, até que seja encontrada uma solução satisfatória.

Após 89% de oxigênio soprado o modelo semidinâmico compara a temperatura intermediária calculada com a temperatura medida pela sublança. Se a diferença entre as temperaturas for superior, em módulo, a 10°C, então o modelo substitui a temperatura calculada pela medida pela sublança e continua as iterações matemáticas com os 11% de oxigênio.

2.2 Fluxograma do Modelo

Abaixo está expresso, em termos de macro atividades, o fluxograma do modelamento matemático.





3 RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados são as temperaturas de quatorze corridas calculadas pelos modelos semidinâmico e estático.

As temperaturas calculadas e medidas foram comparadas, a fim de verificar qual modelo mais eficaz.

Os resultados obtidos com o modelo semidinâmico estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Temperaturas calculadas pelo Modelo Semidinâmico e comparação com as temperaturas medidas no processo

Corrida	Temperatura de Vazamento Calculada pelo Modelo SEMIDINÂMICO (°C)	Temperatura de Vazamento Medida no Processo (°C)	Diferença (Calculada – Medida)
1	1663	1671	-8,5
2	1640	1656	-16,3
3	1671	1671	0,5
4	1664	1675	-10,9
5	1655	1657	-2,0
6	1663	1661	1,7
7	1649	1662	-12,6
8	1654	1665	-10,6
9	1674	1670	3,8
10	1667	1670	-2,6
11	1662	1665	-2,9
12	1666	1675	-8,8
13	1651	1657	-5,7
14	1686	1668	18,3

Pode-se observar que apenas duas corridas estão fora da faixa aceitável de $\pm 15^\circ\text{C}$ e a corrida de número 3 teve a diferença entre calculado e medido próxima de zero.

A Figura 1 mostra nitidamente as duas corridas fora da faixa.

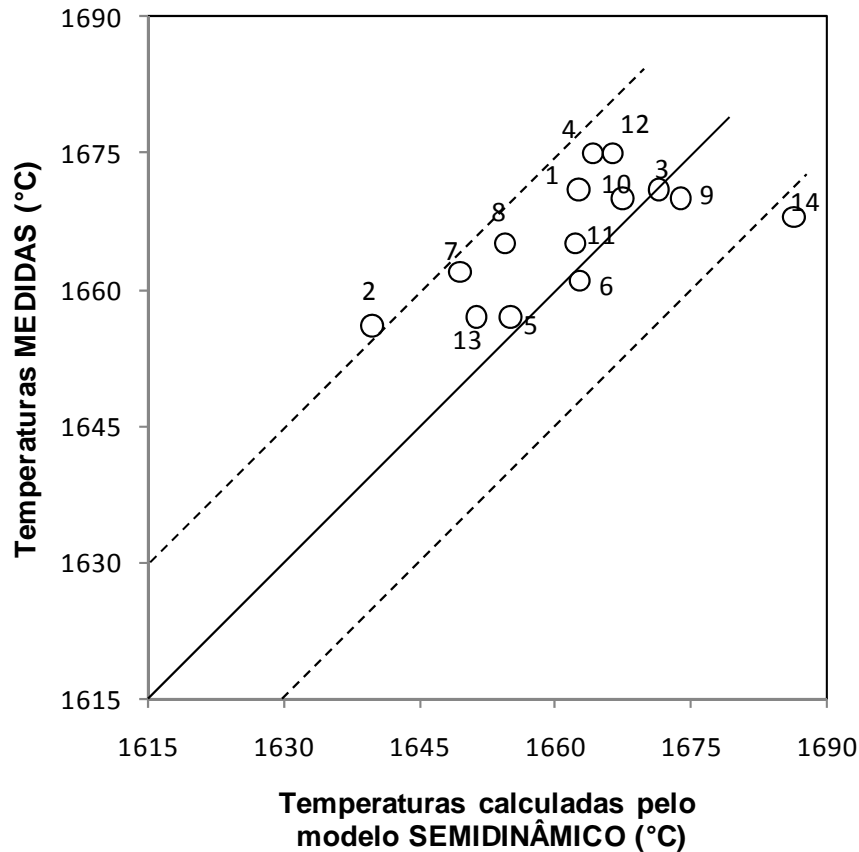


Figura 1. Dispersão entre temperatura calculada pelo modelo Semidinâmico e temperatura medida no processo de fabricação do aço em conversor de sopro combinado.

Da mesma forma estão expostos na Tabela 2 os resultados do modelo estático.

Tabela 1. Temperaturas calculadas pelo Modelo Estático e comparação com as temperaturas medidas no processo

Corrida	Temperatura de Vazamento Calculada pelo Modelo ESTÁTICO (°C)	Temperatura de Vazamento Medida no Processo (°C)	Diferença (Calculada – Medida)
1	1643	1671	-27,6
2	1668	1656	11,8
3	1693	1671	21,8
4	1631	1675	-43,5
5	1576	1657	-81,3
6	1608	1661	-53,5
7	1594	1662	-67,7
8	1616	1665	-48,8
9	1597	1670	-73,4
10	1645	1670	-25,1
11	1660	1665	-4,7
12	1645	1675	-29,7
13	1631	1657	-25,6
14	1645	1668	-23,4



Como vimos na Tabela 2, acima, apenas duas corridas estão dentro da faixa, o que também é demonstrado na Figura 1.

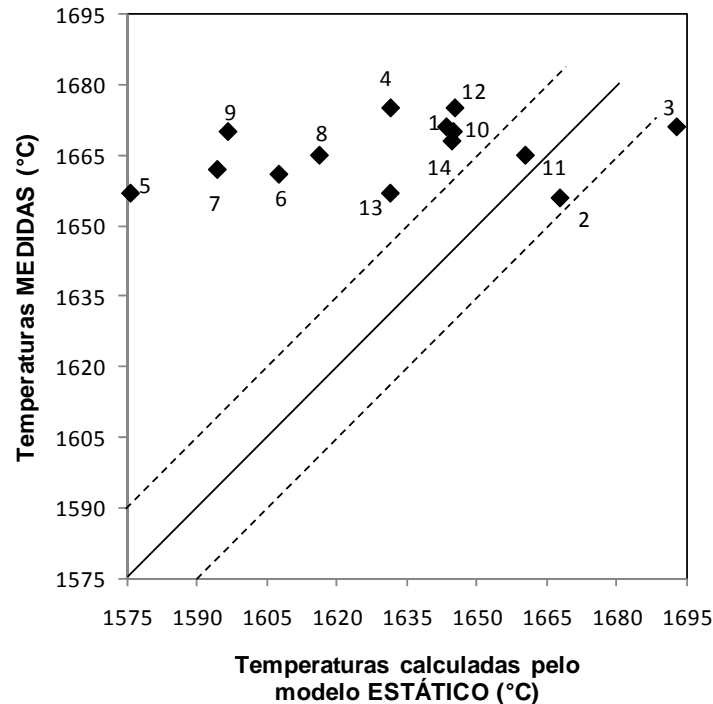


Figura 2. Dispersão entre temperatura calculada pelo modelo Estático e temperatura medida no processo de fabricação do aço em conversor de sopro combinado.

4 DISCUSSÃO

Para uma exposição quantitativa dos gráficos de dispersão apresentados anteriormente, é considerado o somatório dos quadrados das diferenças entre temperaturas medidas e calculadas, conforme método dos mínimos quadrados, como visto em Ruggiero e Lopes.⁽⁴⁾ Ao se considerar as temperaturas calculadas pelo modelo semidinâmico, o valor do somatório dos quadrados das diferenças vale aproximadamente 4.277, já para o modelo estático o valor deste somatório é aproximadamente 34.382.

A comparação entre o somatório do modelo semidinâmico e o somatório do modelo estático confirmam a maior aderência das temperaturas calculadas pelo modelo semidinâmico às temperaturas medidas no processo do que as temperaturas calculadas pelo estático.

Os resultados do modelo semidinâmico mostram um índice de acerto de 12 dentre 14 corridas, o que equivale a uma eficiência de aproximadamente 86%.

O modelo estático teve desempenho consideravelmente inferior, acertando duas corridas dentro da faixa de ± 15 °C. O índice de acerto é de 2 em 14 corridas, que equivale a uma eficiência de aproximadamente 14%.

É importante considerar que as corridas foram previamente selecionadas, o que poderia favorecer certo tipo de modelo de controle. Mesmo com essa fato relevante, pode-se considerar que o modelo semidinâmico, devido à realimentação dos cálculos, teve maior acerto na previsão de temperatura de fim de sopro que o modelo estático.



O índice de acerto da temperatura de fim de sopro para modelos utilizados em usinas siderúrgicas gira em torno de 70%.

5 CONCLUSÃO

O estudo mostrou que a utilização de dados intermediários do processo de fabricação do aço em conversor de sopro combinado contribui para o acerto da previsão de temperatura de fim de sopro.

É necessário aprimorar e submeter o modelo a corridas com maior diversidade de características, visando analisar o comportamento e o desempenho do modelo semidinâmico em situações diferentes.

O modelo pode ser aprimorado para estimar de forma satisfatória as composições finais de aço líquido e escória formada.

A principal vantagem do modelo semidinâmico em relação ao modelo estático é a possibilidade da utilização de dados intermediários, atingindo assim resultados finais mais precisos por conta dos ajustes nos cálculos iterativos. Contudo o modelo semidinâmico tem a limitação de necessitar de algum sistema físico que colete os dados desejados; pode-se considerar nesse aspecto que o modelo estático leva vantagem, pois necessita apenas de medições iniciais do processo.

O modelo dinâmico é um terceiro tipo de modelo, mais eficiente que os citados até aqui. Sua maior vantagem deve-se ao modelo utilizar uma realimentação dos cálculos constante, em função do tempo, possibilitando assim melhorias instantâneas nos cálculos e um maior acerto do resultado final.

Mesmo tendendo a ser menos preciso que o modelo dinâmico, o modelo semidinâmico leva vantagem no que diz respeito à maior praticidade na coleta de dados. Pois é fato que o modelo semidinâmico necessita de realimentar seus cálculos, porém, a coleta é feita em um único momento durante o processo. O modelo dinâmico paga sua maior eficiência com a necessidade de sistemas mais sofisticado de coleta de dados, como coleta em tempo real, onde os dados de interesse são medidos constantemente ao longo de todo o processo.

A escolha de qual modelo utilizar é em função da necessidade, capacidade tecnológica e condições de investimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Engenheiros Marcio Lins, Antônio Augusto Martins e Rodrigo da Silva, da Companhia Siderúrgica Nacional, Usina Presidente Vargas pelo apoio técnico; e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Mourão, B.M., et. al., 2007, "Introdução à Siderurgia", Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, pp. 3-14.
- 2 Campos, V.F., 1980, "Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido-Aciaria LD", Vol. 2, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- 3 Ferreira, A. F., 2000, "Formulação e Avaliação de Modelo para Previsão de Manganês e Fósforo no Fim de Sopro em Conversor de Sopro Combinado", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.
- 4 Ruggiero, M.A.G. e LOPES V.L.R., 1997, "Cálculo Numérico-Aspectos Teóricos e Computacionais", Ed. Pearson Makron Books, São Paulo, pp. 268-287.