

ESTIMATIVAS DE FIM DE SOPRO NA PRODUÇÃO DE AÇO LÍQUIDO EM CONVERSOR DE SOPRO COMBINADO PELO MODELO DE CONTROLE SEMIDINÂMICO

Zilmar Alcântara Júnior, ziljr@hotmail.com¹
Alexandre Furtado Ferreira, furtado@metal.ceimvr.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores, nº 420, Volta Redonda/RJ, Brasil - CEP: 27.255-250

Resumo: *A constante busca pela qualidade do aço, é um ponto importante nas atividades siderúrgicas desenvolvidas hoje em dia. Os processos siderúrgicos contam com sistemas cada vez mais sofisticados que auxiliam no controle da produção de aço. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo matemático semidinâmico capaz de prever a temperatura de vazamento do aço líquido ao final do sopro de oxigênio em Conversor de sopro combinado, ou, Conversor LD. As equações utilizadas no modelo matemático representam os Balanços de Massa e Térmicos que ocorrem no Conversor LD durante o processo de fabricação do aço. O modelo foi implementado computacionalmente utilizando métodos matemáticos iterativos para a resolução das equações e é chamado semidinâmico por utilizar, além de dados iniciais do processo, dados intermediários que já são coletados rotineiramente durante o processo de fabricação do aço. Esses dados intermediários servem para realimentar os cálculos, visando aprimorar o resultado final. Os resultados obtidos mostram que a utilização de dados intermediários de ajuste otimizam as previsões de fim de sopro.*

Palavras-chave: *Conversor LD, Modelo Matemático, Balanço de Massa, Balanço Térmico.*

1. INTRODUÇÃO

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 confeccionar aços de diversos tipos, com composições, propriedades e aplicações cada vez mais específicas, conforme Mourão et al (2007).

A constante busca pela qualidade do aço, é um ponto importante nas atividades siderúrgicas desenvolvidas atualmente. Processos contam com sistemas automatizados que auxiliam no controle da produção.

Visualizando a possibilidade de utilização de controles em Aciaria LD e a importância e os benefícios de se conseguir um processo de tais proporções sob controle como mostra Campos (1980), foi desenvolvido um modelo matemático semidinâmico, implementado computacionalmente em Fortran 90, que utiliza dados de entrada durante o carregamento do conversor e dados intermediários do processo de fabricação de aço, coletados na descida da sublança. O modelo semidinâmico desenvolvido no presente trabalho tem como foco 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.

Os cálculos preliminares serão realizados a partir de informações iniciais do carregamento do conversor e os resultados gerados serão corrigidos a 89% do sopro de oxigênio, quando uma sublança desce para dentro do conversor para medir temperatura e coletar amostra do banho metálico, fornecendo dados que possibilitarão ajustes no modelo para as previsões subsequentes. A consideração dos balanços realizados a 89% do sopro de oxigênio caracteriza um ponto intermediário, conferindo assim um caráter semidinâmico ao modelo.

2. MODELAMENTO MATEMÁTICO

O modelo foi implementado computacionalmente em linguagem Fortran 90, utilizando alguns dados de entrada e intermediários do processo de fabricação do aço para fazer as previsões no fim de sopro.

Os dados intermediários utilizados são coletados rotineiramente no processo de fabricação do aço através de uma sublança que desce verticalmente para dentro do Conversor LD, paralela à lança de oxigênio, e coleta amostra do banho metálico e mede a temperatura do mesmo.

Como visto em Furtrado (2000), assume certas premissas para se efetuar os cálculos, 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, conforme Cortes;
- 99% do carbono é oxidado na forma de CO.

As equações empíricas utilizadas foram:

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

3. BALANÇO GLOBAL

O modelo semidinâmico 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 energia e massa que entram no conversor terão que igualar a energia e massa que saem do conversor no final do sopro.

Consideramos um valor aceitável quando estas diferenças forem menor ou igual a 10^{-3} .

3.1 O Balanço de Massa

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

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{Massa} \\ \text{Acumulada} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{c} \text{Massa que} \\ \text{Entra} \end{array}} - \boxed{\begin{array}{c} \text{Massa que} \\ \text{Sai} \end{array}} \quad (1)$$

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;
- Balanço de massa do alumínio.

3.2 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 igualadas a 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.

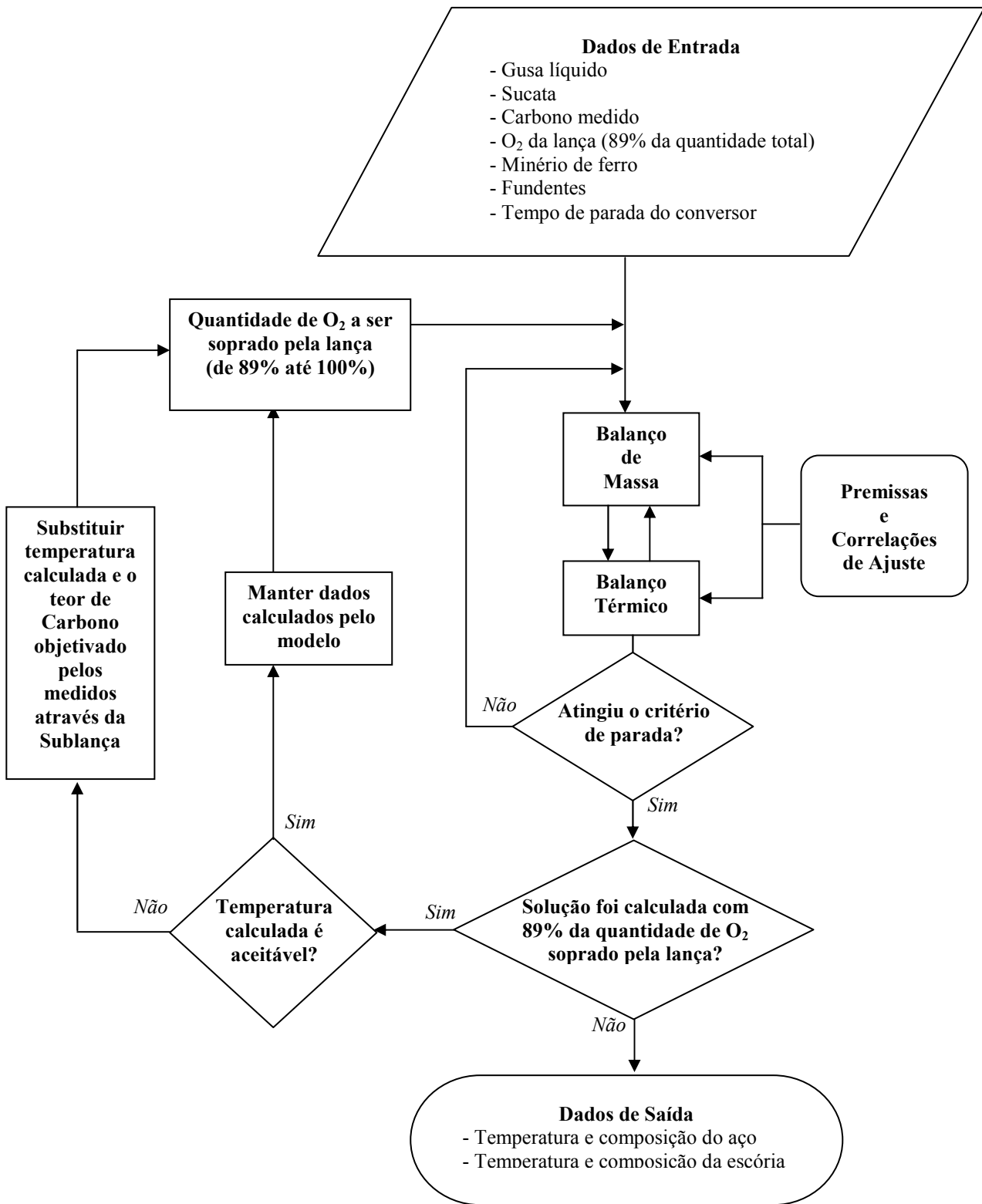
O balanço térmico foi formulado em consonância com as informações acima e está exposto na Eq. (2), com as entalpias em Joule.

$$\begin{array}{l} \text{Entalpia do gusa Líquido} + \\ \text{Entalpia do Minério de Ferro} + \\ \text{Entalpia do FeO das sucatas} + \\ \text{Entalpia dos Fundentes} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Entalpia do Aço Líquido} + \\ \text{Entalpia da Escória} + \\ \text{Variação de Entalpia dos Óxidos} + \\ \text{Entalpia de Dissolução dos Óxidos na Escória} + \\ \text{Entalpia dos Gases} + \text{Perdas Térmicas} \end{array} \quad (2)$$

A equação acima, adaptada de Ferreira (2000), 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.

4. FLUXOGRAMA DO MODELO

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



5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas de fim de sopro de vinte e uma corridas foram medidas, conforme rotina de trabalho de Conversor LD, ao final do sopro de oxigênio; e foram também calculadas pelo modelo semidinâmico e pelo modelo estático.

As temperaturas calculadas foram comparadas às temperaturas medidas no processo.

Foi considerada como aceitável, uma variação de $\pm 15^{\circ}\text{C}$ para a temperatura calculada. Essa faixa foi estabelecida com base em condições reais de trabalho de usinas siderúrgicas.

Na Tabela (1) é possível observar as temperaturas calculadas pelo modelo semidinâmico comparadas às temperaturas medidas no processo. A diferença entre as temperaturas está em negrito quando se encontra dentro da faixa aceitável de $\pm 15^{\circ}\text{C}$.

Num total de vinte e uma corridas, o modelo semidinâmico teve dezesseis temperaturas calculadas dentro da faixa aceitável, o que indica uma eficiência de 76,19% no acerto da temperatura de fim de sopro em Conversor LD, para a amostra em questão.

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

Corrida	Temperatura de Vazamento Medida no Processo ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura de Vazamento Calculada pelo Modelo Semidinâmico ($^{\circ}\text{C}$)	Diferença entre Temperaturas Medida e Calculada
1	1671	1663	8
2	1674	1683	-9
3	1656	1640	16
4	1671	1671	0
5	1675	1664	11
6	1657	1655	2
7	1661	1663	-2
8	1655	1654	1
9	1662	1649	13
10	1673	1685	-12
11	1665	1654	11
12	1670	1674	-4
13	1667	1689	-22
14	1670	1667	3
15	1665	1662	3
16	1675	1666	9
17	1657	1651	6
18	1675	1652	23
19	1659	1702	-43
20	1668	1686	-18
21	1648	1643	5

A Figura (1) a seguir ilustra a situação exposta na Tab. (1); possibilita visualizar a dispersão que existe entre a temperatura calculada pelo modelo semidinâmico e a temperatura medida no final do processo. As linhas guias, em tom mais claro na Fig. (1), mostram os limites inferiores e superiores de 15°C , dando condições de observar mais facilmente as corridas que ficaram dentro da faixa aceitável.

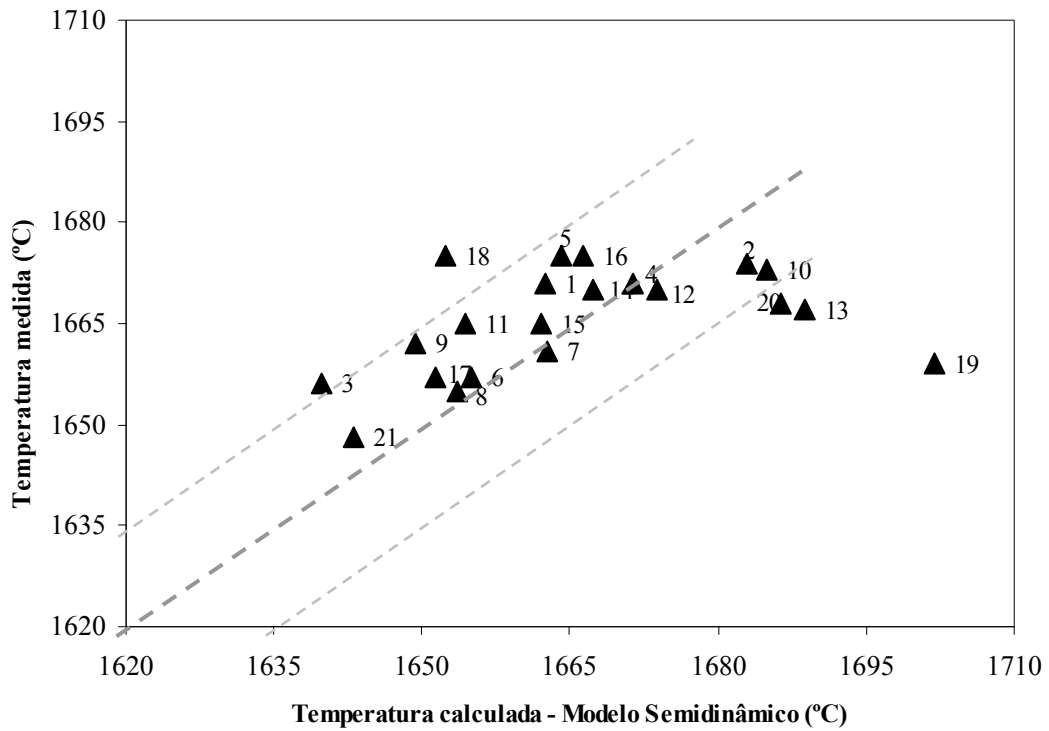


Figura 1. Dispersão entre Temperatura calculada pelo Modelo Semidinâmico e Temperatura medida no processo de fabricação do aço em Conversor de Sopro combinado.

A Tabela (2), a seguir, mostra a comparação entre as temperaturas calculadas para as vinte e uma corridas através do modelo estático e as temperaturas mediadas ao final do processo em Conversor LD.

Considerando a mesma faixa aceitável, $\pm 15^{\circ}\text{C}$, pode-se observar, em negrito, na Tab. (2), as corridas com a diferença entre temperaturas medida e calculada pelo modelo estático dentro da faixa.

Dentre vinte e uma corridas, seis tiveram a temperatura calculada dentro da faixa aceitável, o que corresponde a uma eficiência do modelo estático de 28,75%.

Tabela 2. Temperaturas calculadas pelo Modelo Estático e comparação com as temperaturas medidas.

Corrida	Temperatura de Vazamento Medida no Processo (°C)	Temperatura de Vazamento Calculada pelo Modelo Estático (°C)	Diferença entre Temperaturas Medida e Calculada
1	1671	1643	28
2	1674	1638	36
3	1656	1668	-12
4	1671	1693	-22
5	1675	1631	44
6	1657	1576	81
7	1661	1608	53
8	1655	1664	-9
9	1662	1594	68
10	1673	1662	11
11	1665	1616	49
12	1670	1597	73
13	1667	1671	-4
14	1670	1645	25
15	1665	1660	5
16	1675	1645	30
17	1657	1631	26
18	1675	1618	57
19	1659	1616	43
20	1668	1645	23
21	1648	1639	9

A dispersão das temperaturas de fim de sopro estimadas pelo modelo estático, comparadas com as temperaturas medidas no processo pode ser visualizada na Fig. (2).

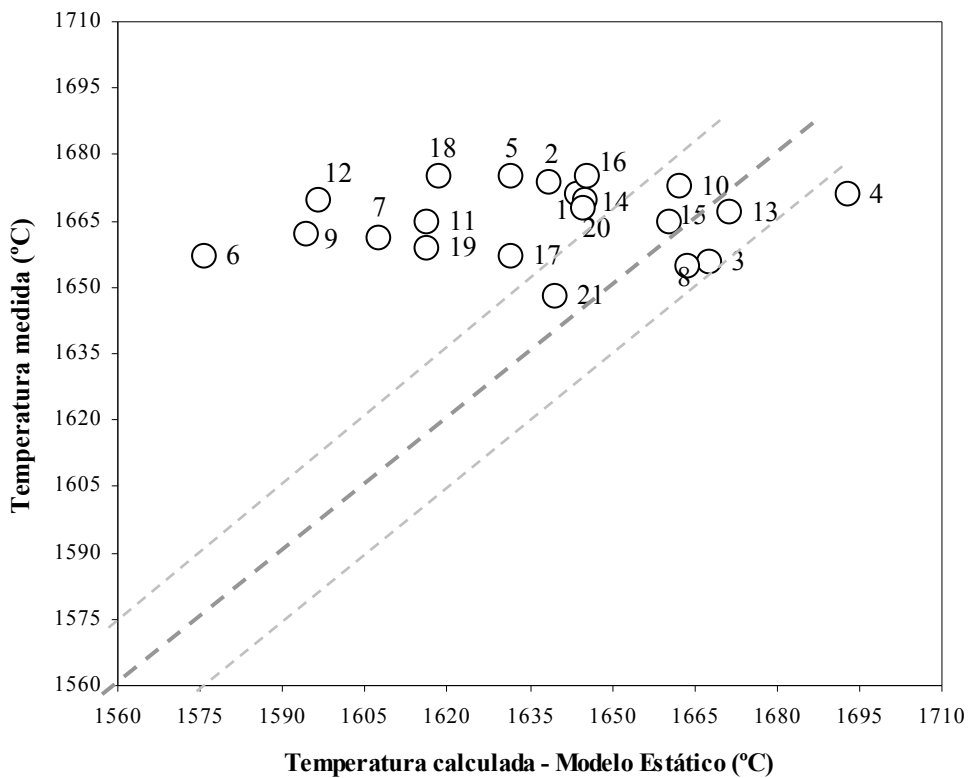


Figura 2. Dispersão entre Temperatura calculada pelo Modelo Estático e Temperatura medida no processo de fabricação do aço em Conversor de Sopro combinado.

Sobrepondo os gráficos de dispersão representados nas Fig. (1) e Fig. (2), referentes aos modelos semidinâmico e estático respectivamente, é possível observar a Fig. (3) e visualizar facilmente que as temperaturas calculadas pelo modelo semidinâmico são menos dispersas que as calculadas pelo modelo estático, se comparadas às temperaturas medidas no processo.

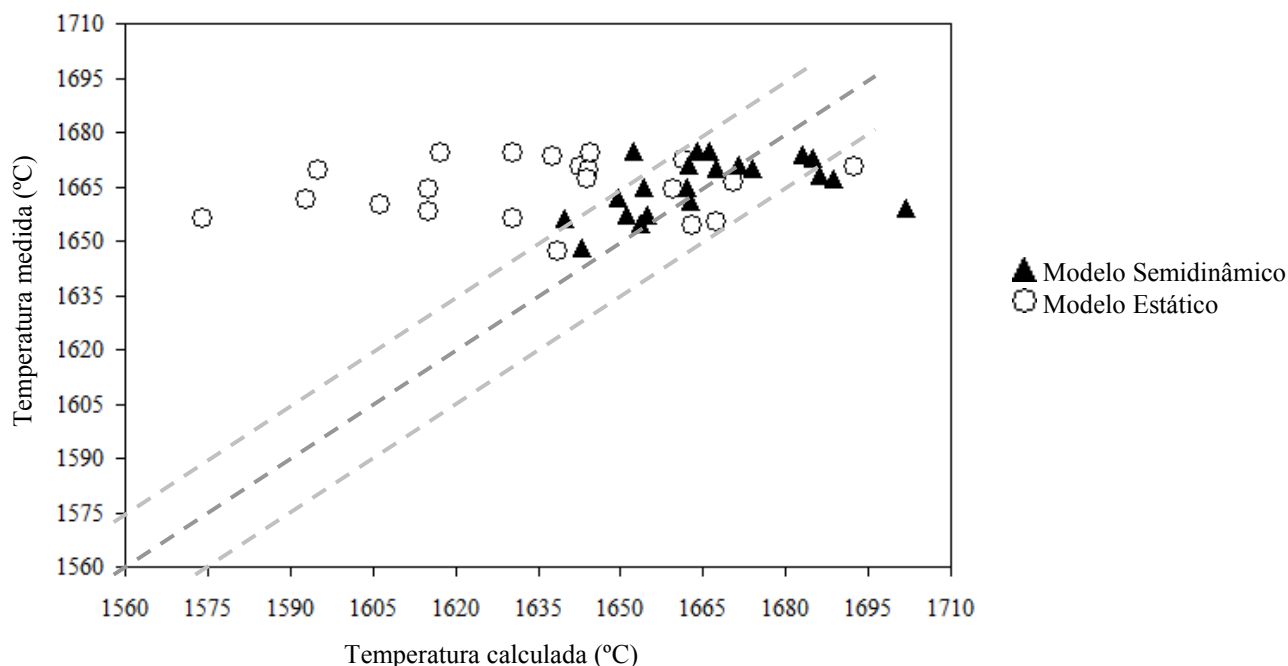


Figura 3. Dispersão entre Temperatura calculada pelo Modelo Semidinâmico e Temperatura medida no processo de fabricação do aço em Conversor de Sopro combinado.

Para uma exposição quantitativa das dispersões apresentadas, é considerado o somatório dos quadrados das diferenças entre temperaturas medidas e calculadas, conforme método dos mínimos quadrados como visto em Ruggiero (1997). Ao se considerar as temperaturas calculadas pelo modelo semidinâmico, o valor do somatório dos quadrados das diferenças vale aproximadamente 4277; para o modelo estático o valor deste somatório vale aproximadamente 34382.

A comparação entre o somatório do modelo semidinâmico e o somatório do modelo estático confirmam a maior aderência às temperaturas medidas nos processos gráficos de dispersão.

Ainda se analisarmos os gráficos de dispersão do modelo semidinâmico e do modelo estático conforme Fig. (1) e Fig. (2), respectivamente, também é possível visualizar que ao se comparar as temperaturas calculadas com as temperaturas medidas, ocorre maior dispersão da temperatura calculada pelo modelo estático do que pelo modelo semidinâmico.

A eficiência do modelo semidinâmico é 76,19%, quase 2,7 vezes a eficiência do modelo estático.

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

6. CONCLUSÃO

Como esperado, o estudo mostrou que a utilização de dados intermediários do processo de fabricação do aço contribuíram para o acerto da previsão da temperatura de fim de sopro em Conversor LD.

Tais resultados foram obtidos com corridas previamente filtradas, de modo a se obter maior regularidade entre as corridas consideradas no estudo. É necessário aprimorar e submeter o modelo a corridas com diversidade de características, visando analisar o comportamento e o desempenho do modelo semidinâmico em situações diferentes.

Baseado nas informações acima é possível afirmar que o modelo semidinâmico teve um índice de acerto da temperatura de fim de sopro consideravelmente superior ao modelo estático. O que explica a maior eficiência do modelo semidinâmico, é o fato dele realizar cálculos preliminares até 89% do sopro de oxigênio, quando corrige os cálculos, incrementando o sistema com dados coletados rotineiramente no processo; logo as iterações para os 11% de oxigênio restante são calculadas com dados atualizados.

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.

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 o mais eficiente dentre os três modelos. Sua maior eficiência deve-se ao modelo utilizar uma realimentação constante durante processo, em função de determinado parâmetro de tempo, possibilitando assim melhorias instantâneas nos cálculos.

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 determinado aparato para coletar os dados e realimentar seus cálculos, porém, esta coleta é feita em um único ponto 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.

7. 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.

8. REFERÊNCIAS

- Campos, V.F., 1980, “Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido-Aciaria LD”, Vol. 2, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- 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, Volta Redonda.
- Mourão, B.M., et. al., 2007, “Introdução à Siderurgia”, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, pp. 3-14.
- 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.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

FINAL BLOW ESTIMATES IN PRODUCTION OF LIQUID STEEL IN COMBINED BLOW CONVERTER TROUHGT SEMIDYNAMIC CONTROL MODEL

Zilmar Alcântara Júnior, ziljr@hotmail.com¹
Alexandre Furtado Ferreira, furtado@metal.ecimvr.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores, nº 420, Volta Redonda/RJ, Brazil - CEP: 27.255-250

Abstract: *The constant quest for quality of steel, is an important point in the siderurgical activities developed today. The siderurgical processes include systems with increasingly sophisticated that help the control of steel production. This study aimed to develop a semidynamic mathematical model able to predict the temperature of casting liquid steel at the end of oxygen blowing in combined blow Converter, or, LD Converter. The equations used in the mathematical model represent the mass balance and heat balance that occur in the LD Converter during the manufacturing process of steel. The model was implemented computationally using iterative mathematical method to solving equations, and it is called semidynamic because it uses, besides inputs, it uses intermediate data that are already routinely collected during the manufacturing process of steel. These intermediate data are used to replenish the calculations, to improve the final outcome. The results show that the use of intermediate adjustment data optimize the final blow estimates.*

Keywords: *LD Converter, Mathematical Model, Mass Balance, Heat Balance.*