

INTRODUÇÃO

A introdução da metalurgia da panela contribuiu para o aumento da qualidade do aço produzido. Porém, originaram no processo as maiores perdas de temperatura do aço líquido, acentuando-se durante o vazamento do forno elétrico a arco (FEA) [1]. O vazamento ocorre ao final do refino primário do aço, durante o processo de vazamento, são adicionadas ligas com base na análise do banho metálico e do tipo de aço desejado. Inicia-se a desoxidação e, deste modo, o refino secundário do aço líquido. Simultaneamente, ocorre a adição de escorificantes, responsáveis por formar uma nova escória. Logo após o vazamento na panela, a temperatura do aço líquido sofre influência de alguns fatores, tais como: a condução de calor através do revestimento refratário, perdas por radiação e convecção para o ambiente (pela escória e estrutura metálica da panela) e dissolução de ligas e escorificantes adicionados [2].

OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de previsão de temperatura de chegada do aço líquido ao forno-panela (FP). Para tanto, é feito o estudo das perdas térmicas ocorridas no aço líquido durante o vazamento de um FEA até a chegada ao FP, avaliando o efeito térmico causado pelas adições de ligas e escorificantes. Além disso, foi desenvolvido um algoritmo para o cálculo das perdas térmicas pelos refratários e pela escória em função dos tempos característicos de processo.

METODOLOGIA

Neste estudo, foram utilizados dados de adições de ligas e escorificantes, tempos de processo, temperaturas de vazamento e de chegada ao FP e estados térmicos das panelas. Foram consideradas 469 corridas, distribuídas em 14 qualidades de aço produzidas. Estes dados foram obtidos de uma aciaria elétrica. Desta forma, o procedimento experimental foi realizado seguindo os passos do fluxograma da Figura 1.

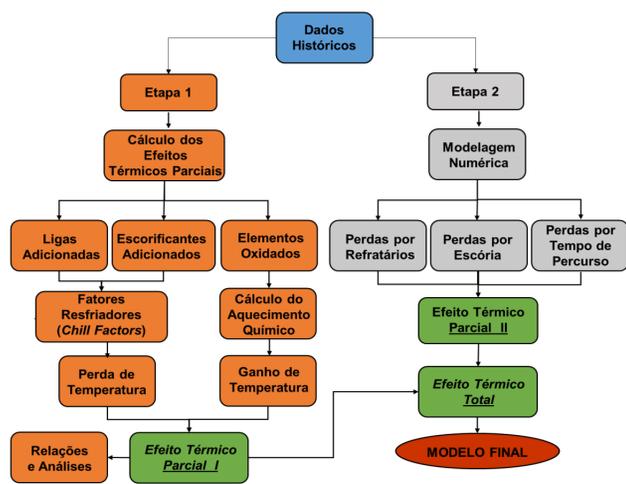


Figura 1: Fluxograma do procedimento experimental

A Etapa 1: corresponde ao cálculo do Efeito Térmico Parcial I, devido às adições de ligas e escorificantes. Etapa 2: corresponde ao cálculo do Efeito Parcial II, que considera as perdas de temperatura pelo estado térmico da panela. O cálculo do efeito térmico I foi baseado nos fatores resfriadores (*chill factors*), apresentados nas tabelas 1 e 2 fornecidos pela literatura, que representam o efeito térmico de cada liga e escorificante na temperatura do banho metálico, quando ocorrem as reações de dissolução e oxidação no aço. O cálculo do aquecimento químico devido a oxidação dos elementos foi baseado na tabela 3.

Tabela 1: Para 1 kg de liga adicionada por tonelada de aço a 1630°C [3] [4].

Liga	Efeito Térmico (ΔT , °C)
Carbono (grafita)	-6,0
FeCrAC (50% Cr)	-2,05
FeCrBC (70% Cr)	-1,68
FeMnAC	-2,22
FeMnBC	-2,34
SiC	-0,66
Alumínio (95% Al)	+0,2
FeSi (75% Si)	+0,4

Tabela 2: Para 1 kg de escorificante adicionado por tonelada de aço a 1630°C [5].

Escorificante	Efeito Térmico (ΔT , °C)
Fluorita	-3,37
Cal	-2,16
Cal Calcética	-3,47
Cal Dolomítica	-2,30
*Alumina	-3,49

*Calculado via *FactSage* versão 6.4, módulo *Equilib*.

Tabela 3: Para 1% de elemento oxidado por tonelada de aço a 1630°C [6].

Elemento Oxidado	Aquecimento Químico (ΔT , °C)
Silício	+27
Manganês	+9
Cromo	+13
Carbono	+14
Alumínio	+30

Por meio da equação (1) foi possível calcular a perda de temperatura devido a adição da liga x. O cálculo do ganho de temperatura conforme a equação (2).

$$Perda\ Temperatura = \frac{Fator\ Resfriador * x}{Massa\ Vazada} \quad (1)$$

$$Ganho\ Temperatura = \frac{Aquecimento\ químico * elemento\ oxidado}{Massa\ Vazada} \quad (2)$$

O cálculo do Efeito Térmico Parcial II foi baseado no método de diferenças finitas [7] [8]. Para o cálculo da temperatura do aço dentro da panela é realizado um balanço de energia considerando as perdas de calor que ocorrem no fundo (Q_f), nas laterais (Q_l) e no superfície (Q_s), conforme a equação (3). Para o cálculo do fluxo de calor da superfície do aço foi considerado as perdas que ocorrem devido à radiação e convecção, conforme apresentado na equação (4). Onde ϵ , σ , h são a emissividade (0,75 durante o vazamento e 0,1 no transporte), a constante de Stefan-Boltzmann e o coeficiente de convecção ($30\ W/m^2$). Os valores de massa específica (ρ), calor específico (c_p) e condutividade térmica (k) dos refratários foram obtidos com o fornecedor e suas espessuras (r , x) variam conforme o projeto da panela.

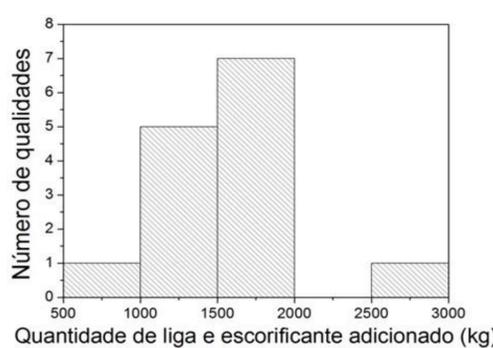
$$Q_f + Q_l + Q_s = m_{aço} c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3) \quad Q_s = \epsilon \sigma (T_{aço}^4 - T_{amb}^4) + h(T_{aço} - T_{amb}) \quad (4)$$

Assim, o modelo calcula a temperatura de chegada ao forno-panela (T_{FP}). Dessa forma, o Efeito Térmico Total, considera os resultados dos valores do Efeito Térmico Parcial I, e os resultados do Efeito Térmico Parcial II, conforme a equação (5).

$$Modelo\ Final\ (T_{FP}) = T\ Vazamento\ Real + Efeito\ Térmico\ I + Efeito\ Térmico\ II \quad (5)$$

Os resultados foram comparados com dados históricos do grupo de corridas analisadas. Assim, foi possível o cálculo do índice de acerto e validação do modelo, para testes em escala industrial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO



Quantidade em Massa de Ligas e Escorificantes por Qualidade de Aço

A Figura 2 mostra como as 14 qualidades estão distribuídas em relação à massa de ligas e escorificantes. As qualidades de aços mais produzidas estão na faixa de 1000 até 2000 quilogramas de ligas e formadores de escórias adicionados no vazamento, compreendendo 12 qualidades do presente estudo.

Figura 2: Histograma de distribuição das qualidades em relação às adições.

Efeito Térmico Parcial I

A Figura 3 mostra as médias de perda e ganho de temperatura para cada efeito térmico parcial, que compõem o efeito térmico parcial I, efeito térmico devido à oxidação dos elementos, efeito térmico devido à reação de dissolução das ligas e escorificantes. A oxidação dos elementos fornece em média 35°C ao sistema aço-escória. As reações de dissolução das ligas consomem em média 35°C, e apresentam uma maior dispersão entre os valores devido às diferentes adições para cada qualidade. Já a perda de temperatura por adição de escorificantes é em média 20°C, com uma baixa dispersão. Nota-se a importância da análise do ganho de temperatura por oxidação, pois se este cálculo fosse desconsiderado, as perdas de temperatura no vazamento seriam superestimadas.

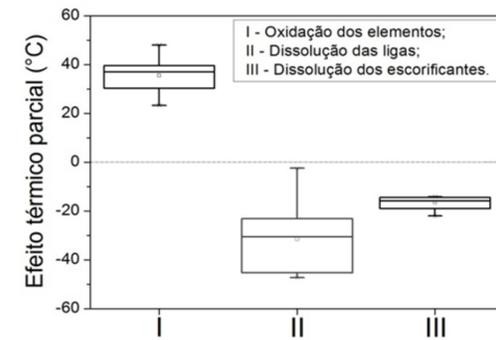


Figura 3: Distribuição do efeito térmico parcial I para todas as qualidades.

Perda de Temperatura por Adição de Ligas e Escorificantes

A Figura 4 mostra como as adições influenciam no efeito térmico para cada qualidade. É possível observar que quanto maior a quantidade de adições, maior a perda de temperatura média durante o vazamento. A perda de temperatura média mínima é de 5°C, e uma perda de temperatura máxima de 53°C, visto que o tipo de adição também interfere na perda de temperatura. Assim, a qualidade com maior adição de liga foi excluída da relação, por ser uma qualidade composta principalmente por ferro-silício (75% Si), em média 1143 kg, diferente das outras qualidades que apresentam em média 50 kg desta liga. A peculiaridade desta está no fato de sua reação de dissolução ser uma reação exotérmica.

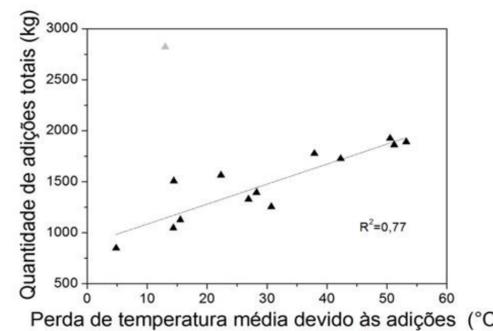


Figura 4: Perda de T(°C) média devido às adições totais para cada qualidade.

Modelo de Previsão de Temperatura de Chegada ao Forno-Panela

O modelo foi testado utilizando corridas do histórico da aciaria em estudo. Informações do processo foram usadas como condições de contorno. O acerto do modelo (%) é calculado pela expressão (6), que basicamente compara a temperatura calculada no forno-panela com a temperatura medida. Se módulo da diferença for menor ou igual a 25°C, o modelo é considerado satisfatório.

Tabela 4: Dados do acerto do modelo em relação ao histórico.

Qualidades	Acerto(%)	Qualidades	Acerto (%)
A	84,82	H	70,59
B	76,47	I	83,33
C	68,97	J	40,00
D	81,82	K	73,06
E	64,29	L	100,00
F	50,00	M	66,67
G	70,59	N	80,00

$$Acerto = |T_{FP}^{Calculada} - T_{FP}^{Medida}| \leq 25^\circ C \quad (6)$$

A Tabela 4 apresenta a porcentagem de acertos do modelo para cada qualidade. A média de acerto do modelo foi de 72,5%, valor satisfatório, mostrando-se apto para testes em escala industrial. A qualidade J apresentou o menor índice de acerto. É necessário um melhor ajuste no modelo para essa qualidade, a partir de testes em escala industrial.

CONCLUSÕES

Para os resultados apresentados neste trabalho, conclui-se que:

- As reações de dissolução das ligas consomem em média 35°C, mas apresentam grande dispersão, pois dependem da qualidade do aço;
- A perda de temperatura média mínima encontrada no estudo foi de 5°C, para menores adições, e uma perda de temperatura média máxima de 53°C;
- Adições da liga ferro-silício (75%Si), maiores que 1143 kg em média, influenciam diretamente na perda de temperatura, pois ocorrem reações extremamente exotérmicas;
- O modelo apresentou um índice de acerto médio igual a 72,5%. Os valores mínimo e máximo foram de 40 e 100%, respectivamente;
- O cálculo do efeito térmico por adição de ligas e escorificantes mostrou alta significância, evidenciando o fato de não poder ser desconsiderado em estudos relacionados a perdas de temperatura do aço líquido em panelas de aciaria.

REFERÊNCIAS

- BRUCH; Rafael. Estudo das Perdas Térmicas de Painéis entre o Vazamento no Forno Elétrico à Arco e o Transporte para o Forno-Panela. Dissertação de mestrado – UFRGS-2012.
- HILTON, Luís Modelo para Previsão da Condição Térmica de Painéis de Aciaria. Dissertação de mestrado – UFRGS – 2007.
- WEBBER, Darryl. Alloy Dissolution In Argon Stirred Steel. Dissertação de doutorado. 2011.
- TURKDOGAN, E.T. Fundamentals of Steelmaking. London, 1996.
- KOR, G. J. W; Glaws, P. C. A. Ladle Refining and Vacuum Degassing. In: FRUEHAN, R. J. (Ed.). The Making, Shaping and Treating of Steel – Steelmaking and Refining Volume. Pittsburgh: cap. 11, p. 661.
- BIELEFELDT, Wagner V. Relatório interno, projeto Gerdau, parceria Laboratório de Siderurgia- UFRGS.
- MORALES, B. B., NADALON, J. E. A., REIS, B. H., CONTINI, A. C., TRINDADE, L. B., VILELA, A. C. F. Modelo de previsão da temperatura de liberação do forno panela. 44º Seminário de Aciaria – Maio de 2013.
- CONTINI, A. C., MORALES, B. B., NADALON, J. E. A., TRINDADE, L. B., VILELA, A. C. F. Influência da geometria da panela na temperatura do aço durante o refino secundário e lingotamento. 43º Seminário de Aciaria – Maio de 2012.