

MODELO DE PREVISÃO DE TEMPERATURA DE CHEGADA NO FORNO-PANELA DO AÇO LÍQUIDO EM ACIARIA ELÉTRICA*

Bianca Vieira Stragliotto¹
Deisi Vieira²
Wagner Viana Bielefeldt³
Antônio Cezar Faria Vilela⁴
Leonardo Barboza Trindade⁵
André Carlos Contini⁶
Felipe das Dores Machado⁷

Resumo

O controle térmico do aço dentro da panela de aciaria depende do conhecimento das perdas térmicas e da estabilidade do processo, durante a etapa de refino secundário. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo que prevê a temperatura de chegada do aço líquido no forno-panela. Foram calculadas as perdas térmicas do aço durante o vazamento do forno elétrico a arco e transporte para o forno-panela. As perdas por adição de ligas e escorificantes, pelos refratários, por convecção e radiação da escória e tempos de processo foram consideradas. Os cálculos foram aplicados em dados históricos de 469 corridas de uma aciaria elétrica, distribuídas em 14 qualidades de aço produzidas. As perdas por adição de ligas e escorificantes ocasionaram no sistema uma perda de temperatura média mínima de 5°C e máxima de 53°C. O modelo mostrou-se apto para testes em escala industrial, apresentando acerto médio de 72,5%.

Palavras-chave: Efeito térmico das ligas no vazamento; Perdas Térmicas do Aço Líquido; Modelo de Previsão de Temperatura.

MODEL TO PREDICT TEMPERATURE ARRIVAL IN THE LADLE FURNACE OF LIQUID STEEL IN ELETRIC STEEL MILL

Abstract

The steel thermal control in the ladle depends on the knowledge of the thermal losses and the stability of the process during the secondary refining stages. The objective of this study is to develop a model that predicts the arrival temperature of liquid steel in the ladle furnace. The thermal losses of steel during the tapping of the electric arc furnace and transport to ladle furnace were calculated. The losses due to addition of alloys and slag formers; by the refractories; by convection and radiation of the slag and process times were considered. The calculations were applied in historical data of 469 heats of an electric steel mill, distributed in 14 qualities of steel produced. Losses due to the addition of alloys and slag formers resulted in a minimum average temperature loss of 5°C and a maximum of 53°C in the system. The model proved to be suitable for Industrial scale test, presenting average hit of 72.5%.

Keywords: Thermal effect of the alloys in the tapping; Thermal Losses of Liquid Steel; Temperature Prediction Model.

¹ Graduanda em Engenharia Metalúrgica; Laboratório de Siderurgia (LaSid); UFRGS.

² Eng^a Metalúrgica, Mestranda; Laboratório de Siderurgia (LaSid), PPGE3M/UFRGS.

³ Prof. Dr. LaSid; Depto. de Metalurgia; PPGE3M/UFRGS.

⁴ Prof. Dr.-Ing. LaSid; Depto. de Metalurgia; PPGE3M/UFRGS.

⁵ Dr. Diretor na STE - Science, Technology & Engineering.

⁶ M.Sc. Equipe Técnica na STE - Science; Technology & Engineering.

⁷ M.Sc. Equipe da Gerdau Aços Especiais.

1 INTRODUÇÃO

As indústrias siderúrgicas colocam em prática grandes esforços para garantir produtos de alta qualidade, combinado com o aumento da produtividade. 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, quando a composição química e a temperatura almejada do banho são atingidas no FEA. O furo de vazamento, canal EBT, é aberto e o forno é inclinado de modo que o aço seja transferido para panela. Durante o processo de vazamento, são adicionadas ligas com base na análise do banho metálico e do tipo de aço desejado. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do processo de vazamento. Inicia-se a desoxidação e, deste modo, o refino secundário do aço líquido. Simultaneamente a adição de ligas, ocorre à adição de escorificantes, responsáveis por formar uma nova escória e que garante a proteção da superfície do banho, uma possível melhor dessulfuração no forno-panela (FP) e remoção/modificação de inclusões [2].

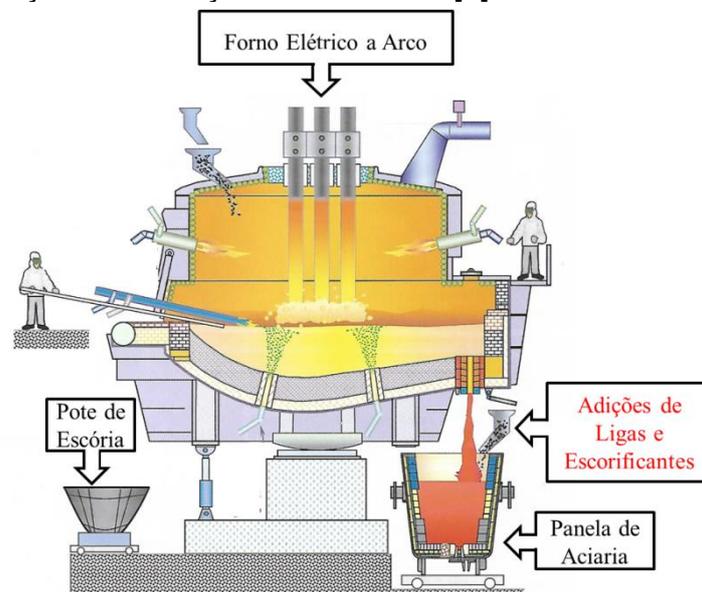


Figura 1: Desenho representativo do conjunto FEA-Panela e adições de ligas e escorificantes durante o vazamento do aço na panela, (adaptado de Rizzo, 2006) [3].

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 [4].

Cada liga ou escorificante adicionado causa diferentes efeitos térmicos quando dissolvidos no aço, pois possuem distintos fatores resfriadores (*chill factors*). Os fatores resfriadores representam o efeito térmico de cada liga e escorificante na temperatura do banho metálico, quando ocorrem as reações de dissolução e oxidação no aço [5]. A dissolução do silício no aço, por exemplo, é exotérmica, resultando no aquecimento do banho metálico, diferente da dissolução das ligas de manganês, que são endotérmicas, causando o decréscimo da temperatura [6].

No instante em que são adicionadas as ligas e escorificantes, ocorrem as reações de dissolução das ligas para a incorporação dos elementos no aço. Sendo assim, é possível observar a ocorrência de três fenômenos térmicos distintos:

1. Efeito térmico das ligas: fenômeno proveniente das reações de dissolução das ligas adicionadas. Tais reações são do tipo endotérmicas, portanto, retiram calor do banho metálico. As ligas de alumínio e silício apresentam reações de dissolução exotérmicas, fornecendo temperatura para o banho metálico.
2. Efeito térmico dos escorificantes: fenômeno proveniente das reações de dissolução dos escorificantes adicionados. Tais reações são endotérmicas.
3. Efeito térmico dos elementos oxidados: fenômeno proveniente das reações de oxidação dos elementos. Tais reações são exotérmicas, gerando aquecimento químico do banho metálico.

A literatura apresenta poucos trabalhos envolvendo o cálculo das perdas térmicas que ocorrem durante o vazamento, entre as etapas de refino primário e secundário dos aços. Fan, Xiong e Huang estudaram a queda de temperatura no aço durante o vazamento, quantificando os percentuais de perdas. Perdas por adição de ligas e escorificantes (35,8%), perdas por refratários (58,5%), perdas pela superfície do banho (5,2%) e perdas pelo jato de vazamento (0,5%). Contudo, não foram apresentados detalhes a respeito da composição das ligas, mas foi possível avaliar a magnitude das principais fontes de perda térmica [7]. Tripathi et al. realizaram simulações envolvendo dinâmica dos fluídos computacional e transferência de calor para calcular a temperatura do aço líquido durante o processo de aciaria. Parâmetros importantes do processo, tais como tempo de aquecimento da panela e tempo de vazamento foram avaliados. Novamente, o efeito das ligas não foi explorado em detalhe. Embora os fatores resfriadores de algumas ligas tenham sido considerados, não houve um estudo avaliando a influência de cada liga. Segundo os autores, as perdas térmicas devido ao vazamento e adição de ligas ficam em torno de 30°C, com duração média de 7 minutos, em uma panela de 160 t. [8].

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 forno elétrico a arco (FEA) em painéis de aciaria 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. Com a predição de valores totais de perdas de temperatura é possível um maior controle da temperatura do aço líquido e uma maior sincronização do processo nas estações de refino primário e secundário. A aplicação do modelo na indústria possibilita a tomada de medidas para otimizar o processo. Podendo assim, minimizar os gastos energéticos no FP, reduzindo custos de produção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram utilizados dados de adições de ligas e escorificantes, tempo de vazamento, tempo de transporte da panela da estação do FEA até o FP, temperaturas de vazamento e de chegada ao FP e estados térmicos das painéis. Foram consideradas 469 corridas, distribuídas em 14 qualidades de aço produzidas, com média de 20 corridas por qualidade. Estes dados foram obtidos de uma aciaria elétrica, que possui um FEA com capacidade de 65 toneladas de aço.

A Figura 2 mostra uma linha do tempo da panela entre as estações do FEA e FP.



Figura 2: Linha do tempo da panela com as etapas de processo até a chegada ao FP.

Desta forma, o procedimento experimental foi realizado seguindo os passos do fluxograma da Figura 3.

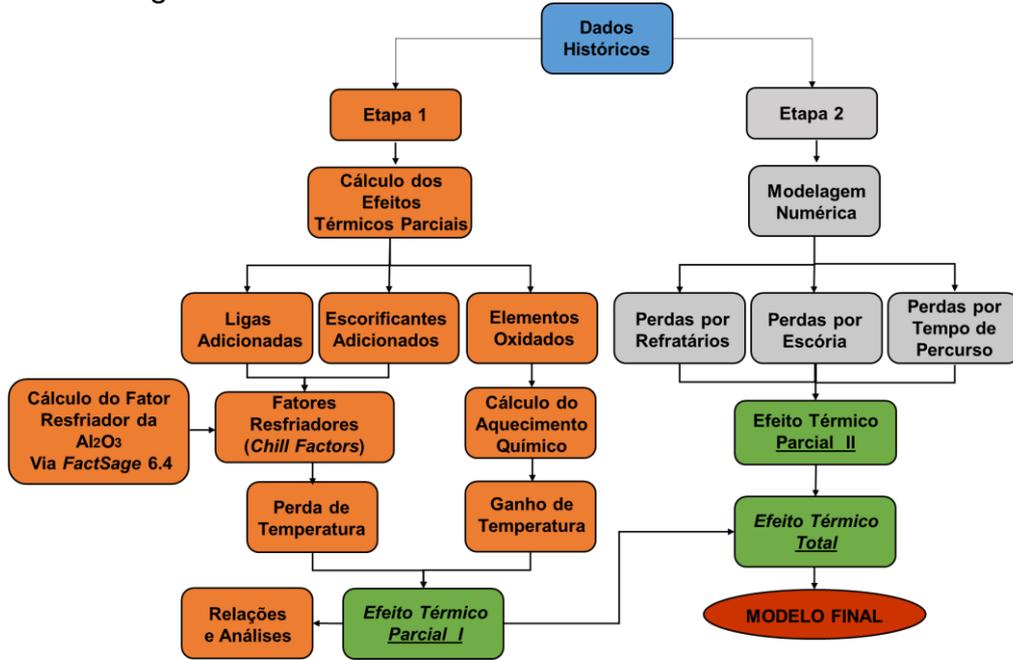


Figura 3: Fluxograma do procedimento experimental.

O estudo foi dividido em duas etapas. Etapa 1: correspondente ao cálculo do Efeito Térmico Parcial I, devido às adições de ligas e escorificantes. Etapa 2: correspondente ao cálculo do Efeito Parcial II, que considera as perdas de temperatura pelo estado térmico da panela, composta pelas perdas por refratários, escória e tempo de percurso. Devido às variações que ocorrem no processo, foram executados filtros referentes aos tempos de processo, considerando tempo de forno ligado (*power - on*), tempo de forno desligado (*power - off*), tempo de espera para vaziar o aço e tempo de percurso.

As corridas foram agrupadas conforme a sua qualidade, pois cada qualidade possui diferentes quantidades de adições. Posteriormente, iniciaram-se as análises do efeito térmico parcial I, conforme a Figura 4.

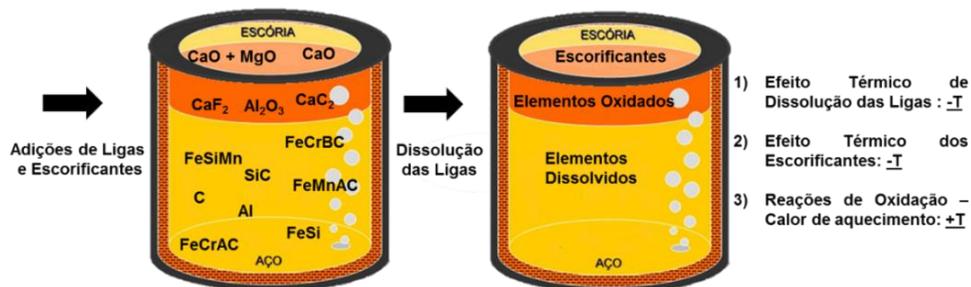


Figura 4: Desenho esquemático do Efeito Térmico Parcial I causado pelas adições.

Os efeitos térmicos vistos na Figura 4 causam o decréscimo da temperatura do aço líquido. Durante a dissolução das ligas, nota-se a oxidação parcial dos elementos, devido à interação com o oxigênio dissolvido do banho metálico. Sendo assim, ocorre aumento da temperatura do aço líquido. O cálculo do efeito térmico devido às adições de ligas foi baseado nos fatores resfriadores (*Chill Factor*), fornecidos pela literatura, conforme a Tabela 1. A Tabela 1 mostra o efeito térmico causado por 1 kg da liga adicionada por tonelada de aço líquido a 1630°C.

Tabela 1: Fatores resfriadores para 1 kg de liga adicionada por tonelada de aço a 1630°C.

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

Adaptado de Webber, 2011 [9] e Fundamentals of Steelmaking, 1996 [5].

Escorificantes são adicionados simultaneamente com as ligas durante o vazamento do FEA. O objetivo é formar uma escória que garanta proteção da superfície do banho metálico, visando reduzir a perda de calor, incorporação de gases da atmosfera e para que a dessulfuração seja eficiente no FP [3]. Outra importante função da escória é a limpeza inclusionária. As inclusões não-metálicas formadas durante o processamento de aço líquido são removidas através da escória [10].

Da mesma maneira, o cálculo devido ao efeito térmico dos escorificantes foi baseado nos valores de fatores resfriadores (*Chill Factor*), fornecidos pela literatura, conforme a Tabela 2. A Tabela 2 mostra o efeito térmico causado por 1 kg do escorificante adicionado por tonelada de aço líquido a 1630°C.

Tabela 2: Fatores resfriadores para 1 kg de escorificante adicionado por tonelada de aço a 1630°C.

Escorificante	Efeito Térmico (ΔT , °C)
Fluorita (CaF_2)	-3,37
Cal (CaO)	-2,16
Cal Calcítica (CaCO_3)	-3,47
Cal Dolomítica (CaO.MgO)	-2,30
*Alumina (Al_2O_3)	-3,49

Adaptado de Kor e Glaws, 1998 [11], *calculado via *FactSage* versão 6.4, módulo *Equilib*.

O *FactSage* é um dos maiores sistemas de computação de banco de dados totalmente integrados em termodinâmica química do mundo. Consiste em uma série de módulos de informação, cálculo e manipulação que permitem acessar e manipular bancos de dados de compostos e de soluções [12].

Para o cálculo das perdas de temperatura devido às adições de ligas e escorificantes foi usada a equação (1)

$$\text{Perda Temperatura por ligas e escorificantes} = \frac{F.R \cdot x}{\text{Massa Vazada}} \quad (1)$$

A equação 1 representa a perda de temperatura (°C) devido às adições de ligas e escorificantes, onde F.R é o fator resfriador da adição (x), considerando a massa vazada em quilogramas.

Para o cálculo do ganho de temperatura devido à oxidação dos elementos, foi necessário realizar um balanço de massa em função da quantidade de elemento oxidado. O balanço de massa é representado pela equação (2).

$$\text{Elemento Oxidado} = \sum(\text{Liga} * y) - (P_2 - P_1) * (\text{Massa Vazada}) \quad (2)$$

A quantidade de Elemento Oxidado é obtida por meio da equação (2), na qual é considerada a quantidade de liga adicionada (Liga), a quantidade do elemento contido na liga adicionada (y), a análise química de aço retirado no FEA (P_1), a análise química de aço retirada no forno-panela (P_2) e a massa total de aço vazado (Massa Vazada).

A Tabela 3 mostra o efeito térmico resultante da oxidação de 1% de cada elemento por tonelada de aço líquido a 1630°C.

Tabela 3: Aquecimento químico para 1% de elemento oxidado por tonelada de aço a 1630°C.

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

Adaptado de Bielefeldt, 2010 [13].

Para o cálculo do ganho de temperatura devido à oxidação dos elementos foi utilizada a equação (3).

$$\text{Ganho Temperatura por Oxidação dos Elementos} = \frac{A.Q * \text{elemento oxidado}}{\text{Massa Vazada}} \quad (3)$$

Onde A.Q representa o aquecimento químico do elemento oxidado.

Portanto, para o cálculo do Efeito Térmico Parcial I, foram utilizados os resultados das equações 1 e 3, conforme a equação (4).

$$\text{Efeito Térmico Parcial I} = \text{Perda Temperatura por Ligas e Escorificantes} + \text{Ganho Temperatura por Oxidação dos Elementos} \quad (4)$$

Desoxidantes são adicionados ao aço para reduzir o teor de oxigênio antes da chegada do aço ao FP, por meio das reações de oxidação. Entre as ligas desoxidantes mais utilizadas, o silício apresenta maior afinidade com o oxigênio depois do alumínio. A oxidação do silício ocorre conforme a equação (5).



A Injeção de oxigênio no FEA fornece energia química ao processo, devido às reações exotérmicas que ocorrem no refino do aço. Também visa o ajuste de Mn, Si, P, Al do aço. Além disso, promovem agitação no banho metálico e uma maior homogeneidade química [15]. Parte do oxigênio, no entanto, fica dissolvido no aço. O grau de oxidação do aço líquido, que pode ser definido pelo oxigênio dissolvido em ppm (O_2 dissolvido), tem sua medição realizada antes do vazamento do FEA. A determinação do O_2 dissolvido é um parâmetro significativo em aciarias, pois a oxidação excessiva do banho metálico pode ocasionar problemas, como a perda de rendimento em massa de aço líquido, alto consumo e perda de rendimento das ligas adicionadas [3]. Portanto, o conhecimento preciso do nível de oxidação do banho metálico é de suma importância, para avaliar a evolução das ligas no processo de vazamento, e analisar o impacto na temperatura. A ferramenta *BoxPlot* foi utilizada para comparar a distribuição dos dados de O_2 dissolvido entre as qualidades. A ferramenta mostra os pontos mínimos e máximos (*outliers*), média e mediana, distribuindo os dados em faixas de 25% do total.

Para o cálculo das perdas de temperatura devido às paredes refratárias, escória e tempo de transporte da panela entre as estações do FEA e FP, foi calculado o Efeito Térmico Parcial II, através do método de diferenças finitas. O método tem como base os trabalhos publicados por Morales et al [16] e Contini et al [17]. Esse modelo

permite calcular o estado térmico dos refratários da panela em função da posição desta no ciclo da aciaria, permitindo estimar a parcela de contribuição na perda térmica em função dos parâmetros do processo. Para calcular a distribuição de temperatura dos refratários são resolvidas as equações (6) e (7). As condições de contorno usadas na face quente são de primeira espécie e igual à temperatura do aço. Na carcaça metálica da panela, na face externa, é usada condição de convecção somada às perdas por radiação.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (6)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

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 fundo (Q_s), conforme a equação (8).

$$Q_f + Q_l + Q_s = m_{aço} c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

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 (9).

$$Q_s = \varepsilon \sigma (T_{aço}^4 - T_{amb}^4) + h(T_{aço} - T_{amb}) \quad (9)$$

Onde ε , σ , h são a emissividade, a constante de Stefan-Boltzmann e o coeficiente de convecção. A emissividade foi ajustada em função da etapa do processo, sendo assumido o valor de 0,75 durante o vazamento e 0,1 no transporte. O coeficiente de convecção foi assumido como $30 \text{ W/m}^2\text{K}$. 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.

O modelo foi aplicado em uma panela de 65 t, com tempo padrão de vazamento em torno de 2 min e tempo médio de transporte FEA-FP de 10 min. Cada corrida possui seus tempos característicos, bem como panelas com diferentes estados térmicos. 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, adquiridos através da equação 4, e os resultados do Efeito Térmico Parcial II, equações (6), (7), (8) e (9). Portanto, simulações foram realizadas com o objetivo de calcular a temperatura de chegada ao FP em função de uma temperatura medida no vazamento do FEA, assim:

$$\text{Modelo Final } (T_{FP}) = T \text{ Vazamento Real} + \text{Efeito Térmico I} + \text{Efeito Térmico II} \quad (10)$$

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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Quantidade em Massa de Ligas e Escorificantes por Qualidade de Aço

A quantidade de adições no vazamento varia conforme a qualidade de aço produzido. A Figura 5 mostra como as 14 qualidades estão distribuídas em relação à massa de ligas e escorificantes. Quatro faixas de adições são apresentadas, variando de 500 até 3000 quilogramas.

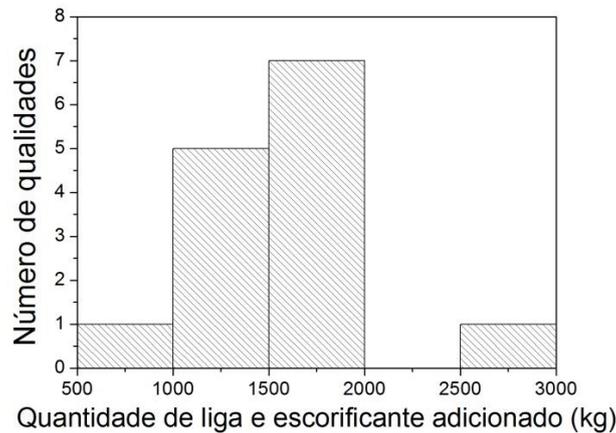


Figura 5. Histograma de distribuição das qualidades em relação à quantidade de liga e escorificante adicionado durante o vazamento.

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. As outras duas qualidades estão distribuídas nas demais faixas, mostradas na Figura 5.

3.2 Análise do Oxigênio Dissolvido no Aço Líquido

Para a análise do impacto do O_2 dissolvido no aço foi plotado o gráfico da Figura 6. A Figura 6 mostra a relação entre o O_2 dissolvido médio no banho metálico e o ganho de temperatura média por oxidação dos elementos para as 14 qualidades.

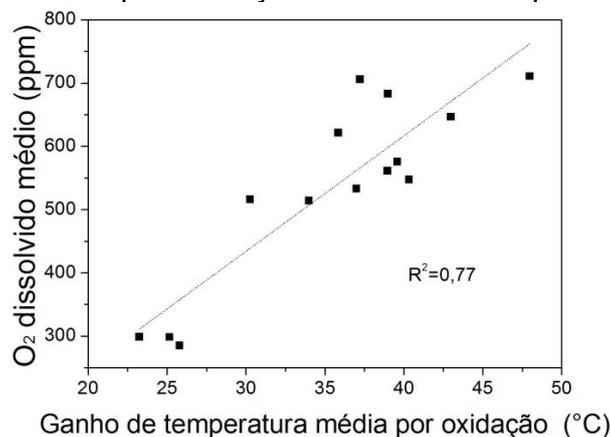


Figura 6: Oxigênio dissolvido médio das corridas versus Ganho de $T(^{\circ}C)$ média por oxidação para cada qualidade.

Analisando a Figura 6, observa-se a relação diretamente proporcional entre a concentração de O_2 dissolvido no banho metálico e o ganho de temperatura pelas reações de oxidação. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 77%, dada às variações do processo em função das diferentes qualidades. Esse comportamento já era esperado, pois quanto maior a concentração de O_2 dissolvido no aço, maior é a oxidação dos elementos de liga com o oxigênio. Essas reações são do tipo exotérmicas, sendo assim maior o aquecimento químico, resultando na elevação da temperatura do banho metálico [18]. Constata-se na Figura 6 diferentes padrões de O_2 dissolvido, apresentando maior controle nas qualidades localizadas na faixa de 300 ppm. Essa variação de O_2 dissolvido é observada mais detalhadamente na Figura 7.

A Figura 7 apresenta um *BoxPlot* com a distribuição de O₂ dissolvido para cada qualidade de aço estudada.

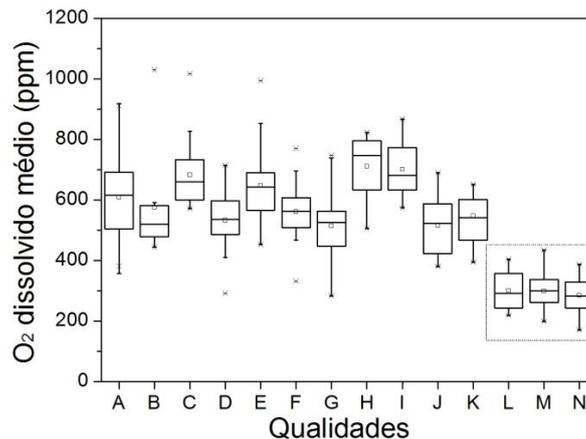


Figura 7: Distribuição de O₂ dissolvido para cada qualidade de aço produzida.

Nota-se que existe certa instabilidade na distribuição do O₂ dissolvido entre as qualidades. Para a qualidade A, o O₂ dissolvido varia de 300 a 900 ppm, apresentando a maior instabilidade dentro das qualidades estudadas. Esse comportamento deve-se ao menor controle do O₂ dissolvido em qualidades que não apresentam ligas de alto custo, como cromo. O controle do oxigênio dissolvido é apurado quando existe a presença de cromo nas qualidades, pois não se deseja a oxidação deste elemento para a escória. O que representa certa perda do cromo e a não incorporação no aço líquido. Salientando a influência do oxigênio nas propriedades mecânicas das ligas de aço cromo, quanto maior a quantidade de O₂, maior a tendência à fragilidade desse aço em altas temperaturas [18]. Portanto, conforme a Figura 7, a instabilidade diminui à medida que há a adição de ligas com cromo (qualidades J, K, L, M e N). Destaca-se também as qualidades na marcação pontilhada, que constitui qualidades com alta adição de ligas de ferro-cromo baixo carbono (FeCrBC), que contém 70% de cromo. Tais qualidades obtiveram controle rígido do oxigênio dissolvido, mantendo alta estabilidade e valores médios O₂ dissolvido de 300 ppm, reduzindo ao máximo a oxidação de cromo.

3.3 Análise do Carbono Adicionado no Vazamento

Dentre os valores apresentados na Tabela 1, a reação de dissolução do carbono é a mais endotérmica. A Figura 8 apresenta a influência da adição média de carbono na perda de temperatura média por adição de ligas.

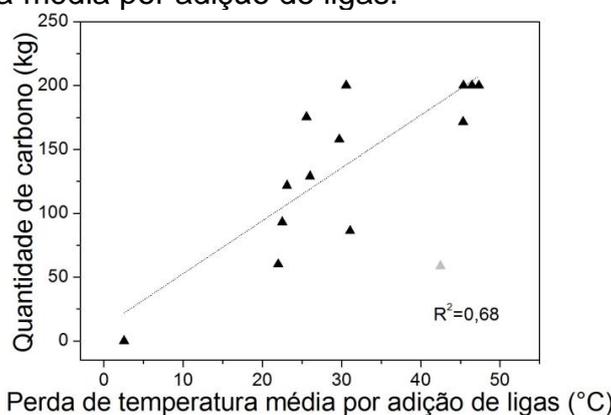


Figura 8: Quantidade de carbono média versus Perda de T(°C) média por adição de ligas.

Por meio da Figura 8 é possível constatar a relação entre os valores médios para cada qualidade de perda de temperatura devido à adição de ligas e a quantidade de carbono adicionado. Quanto maior a adição de carbono maior é a perda de temperatura, resultando em perda de temperatura média mínima de 22°C e máxima de 47°C. Nota-se também que a menor perda de temperatura média (2,5°C) foi constatada pela qualidade que não foi adicionada carbono. O que mostra a grande influência da adição de carbono na perda de temperatura devido à dissolução do carbono. O ponto cinza, excluído da relação, é a qualidade que não obteve a perda de temperatura em função do carbono. A perda de temperatura foi principalmente pela alta adição da liga ferro-cromo alto carbono (FeCrAC), em média 732 kg.

3.4 Análise da Alumina Adicionada no Vazamento

Dentre os escorificantes apresentados, a alumina contém o valor mais endotérmico. Portanto, a quantidade de alumina adicionada também pode ser relacionada com a perda de temperatura por adição de escorificantes. A Figura 9 apresenta a relação da quantidade média de alumina com a perda de temperatura média por adição de escorificantes para cada qualidade.

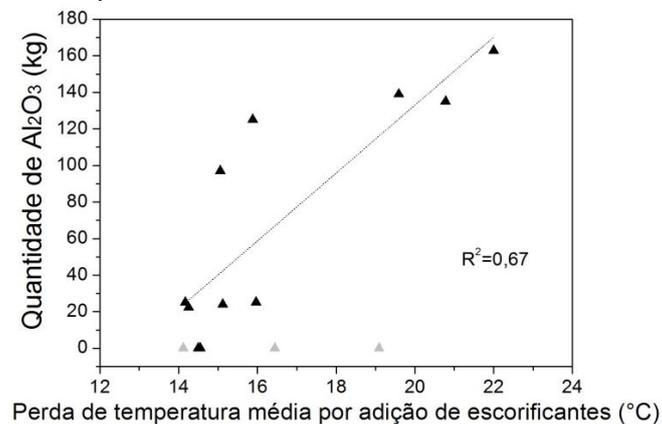


Figura 9: Quantidade média de Al₂O₃ versus Perda de T(°C) média por adição de escorificantes para cada qualidade.

Segundo os autores Kor e Glaws, a adição de escorificantes resulta na perda de temperatura do aço líquido [11]. De fato, pode-se concluir da Figura 9 a relação diretamente proporcional entre a quantidade média de alumina adicionada com a perda de temperatura média devido à adição de escorificantes, resultando em perda de temperatura média mínima de 14°C e máxima de 22°C. Os pontos desconsiderados da relação são qualidades que não obtiveram a perda de temperatura em função da alumina. Esses valores de perda foram originados por altas adições dos escorificantes cal calcítica e cal dolomítica.

3.5 Análise do Silício Adicionado no Vazamento

Conforme mostra a Tabela 3 o elemento silício quando oxidado torna-se crítico na análise do efeito térmico, pois tal elemento representa a principal fonte de aquecimento químico para o banho metálico, estando presente em todas as qualidades e em grandes quantidades. A Figura 10 mostra o comportamento do silício oxidado em função do ganho de temperatura média por oxidação para cada qualidade.

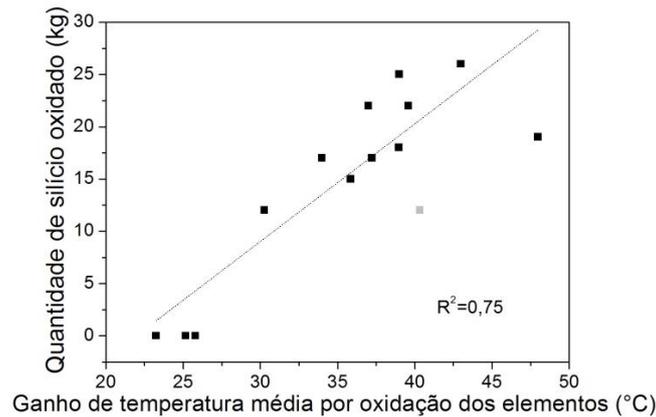


Figura 10: Quantidade média de silício oxidado *versus* Ganho de T(°C) média por oxidação para cada qualidade.

A Figura 10 retrata a relação existente entre a quantidade média de silício oxidado com o ganho de temperatura média para cada qualidade. Quanto maior a quantidade do elemento silício oxidado, maior o ganho de temperatura média devido às reações de oxidação dos elementos de ligas. O silício oxidado ocasionou ganho de temperatura média mínima de 30°C e máxima de 48°C. Na a Tabela 3, o alumínio contém o valor mais exotérmico. Porém, nas qualidades deste estudo, possui influência pouco significativa, pois é adicionado em baixas quantidades. A exceção é a qualidade desconsiderada da relação, por apresentar valor superior a 45 kg de alumínio, já que o objetivo é analisar a influência do silício. É possível constatar na Figura 10, que os menores ganhos de temperaturas foram adquiridos por qualidades que não obtiveram oxidação do silício, mostrando a influência deste elemento quando oxidado no ganho de temperatura.

3.6 Efeito Térmico Parcial I

A Figura 11 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.

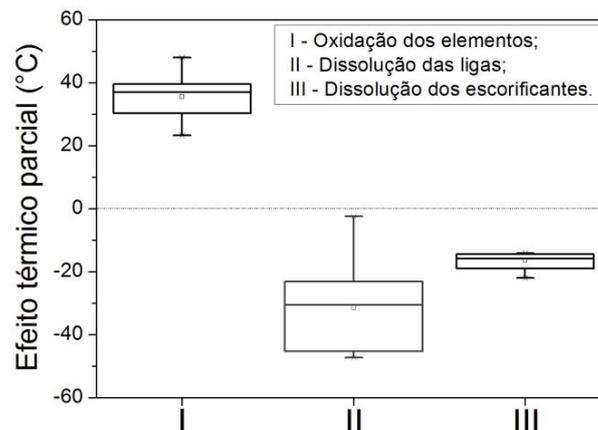


Figura 11: Distribuição do efeito térmico parcial I para todas as qualidades.

Na Figura 11 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. Para todas as qualidades, as quantidades de escorificantes adicionados são próximas. 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.

3.7 Perda de Temperatura por Adição de Ligas e Escorificantes

A Figura 12 mostra como a adição de ligas e escorificantes influencia no efeito térmico para cada qualidade.

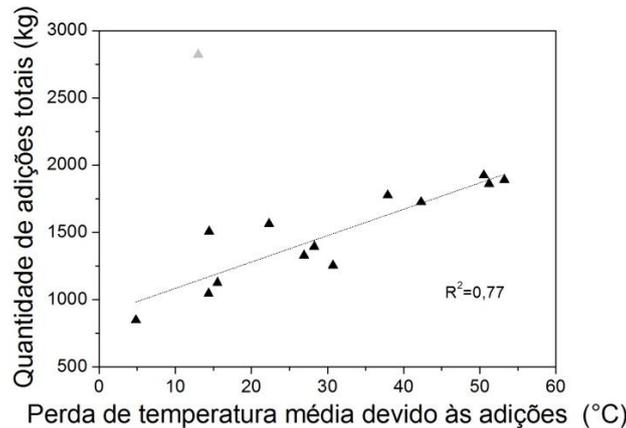


Figura 12: Perda de T(°C) média devido às adições totais durante o vazamento para cada qualidade.

É possível observar na Figura 12 uma clara relação entre a quantidade total média de ligas e escorificantes e o efeito térmico das adições. Evidenciando uma relação crescente, no qual 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. 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, sendo assim, esta liga fornece temperatura para o aço líquido. Portanto, mesmo sendo a qualidade com maior adição de ligas, a base dessa qualidade é a liga ferro-silício, resultando em uma menor perda de temperatura.

3.8 Modelo de Previsão de Temperatura de Chegada ao Forno-Panela

Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo, o mesmo foi testado em corridas do histórico da aciaria em estudo, onde as informações do processo foram usadas como condições iniciais e de contorno. O acerto do modelo (%) é calculado pela expressão (11), 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.

$$Acerto = |T_{FP}^{Calculada} - T_{FP}^{Medida}| \leq 25^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

A Tabela 4 apresenta a porcentagem de acertos do modelo para cada qualidade.

Tabela 4: Dados do acerto do modelo em relação aos dados históricos.

Qualidades	Acerto Modelo (%)	Qualidades	Acerto Modelo (%)
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

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, que corresponde a 7,2% das corridas estudadas. É necessário um melhor ajuste no modelo para essa qualidade, a partir de testes em escala industrial.

4 CONCLUSÕES

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

1. As qualidades com a adição de ligas nobres, como ferro-cromo baixo carbono e ferro-cromo alto carbono, apresentaram uma média de oxigênio ativo de 300 ppm.
2. A adição de carbono influencia diretamente na perda de temperatura, ocasionando perda de temperatura média mínima de 22°C e máxima de 47°C.
3. A adição de alumina, escorificante adicionado no vazamento, ocasionou perda de temperatura média mínima de 14°C e máxima de 22°C.
4. O silício oxidado durante o vazamento resultou em ganho de temperatura média mínima de 30°C e máxima de 48°C.
5. A oxidação dos elementos fornece em média 35°C ao sistema aço-escória. As reações de dissolução das ligas consomem em média 35°C, mas apresentam grande dispersão, pois dependem da qualidade do aço. A adição de escorificantes consomem em média 20°C.
6. 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.
7. Adições da liga ferro-silício (75%Si), maiores que 1143 kg em média, influenciam diretamente na perda de temperatura, pois ocorrem reações extremamente exotérmicas.
8. O modelo apresentou um índice de acerto médio igual a 72,5%. Os valores mínimo e máximo foram de 40 e 100%, respectivamente.
9. 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.

Agradecimentos

A aluna agradece ao professor Antônio C. F. Vilela, Coordenador do Laboratório de Siderurgia, pela oportunidade de experiência junto ao laboratório. Ao Professor Wagner Bielefeldt pela orientação, amizade e oportunidade. A Mestre Deisi Vieira e aos demais colegas do laboratório de siderurgia pelo apoio e companheirismo. Á

Gerdau Charqueadas e ao Mestre Felipe Machado. Os autores agradecem à Fundação Luiz Englert e ao CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 BRUCH; Rafael. Estudo das Perdas Térmicas de Painelas entre o Vazamento no Forno Elétrico à Arco e o Transporte para o Forno-Panela. Dissertação de mestrado – UFRGS. Porto Alegre, 2012.
- 2 JONES.J.A.T. Electric Arc Furnace Steelmaking. Disponível em: https://perswww.kuleuven.be/~u0008825/Cursusmateriaal_html/Cursus%20Constructiemateriaal_n%202-Bach/Steelmaking%20-%20Electric%20Arc%20Furnace.doc.
- 3 RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.
- 4 HILTON, Luís Pereira Lopes. Modelo para Previsão da Condição Térmica de Painelas de Aciaria. Dissertação de mestrado – UFRGS. Porto Alegre, 2007.
- 5 TURKDOGAN, E.T. Fundamentals of Steelmaking. London, 1996.
- 6 COSTA E SILVA, André Luiz Vasconcellos. Cálculos de Equilíbrio em Aciaria Através da Termodinâmica Computacional. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2006, v.3, n.1, p. 45-52.
- 7 FAN Z., XIONG W., HUANG Y. Study on Temperature Drop of Molten Steel During Converter Tapping. 4th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering. P. 538-542.
- 8 TRIPATHI A., SAHA J. K., SINGH J. B. and AJMANI S. K. Numerical Simulation of Heat Transfer Phenomenon in Steel Making Ladle. ISIJ International. 2012, v. 52, n. 9, p. 1591–1600.
- 9 WEBBER, Darryl. Alloy Dissolution In Argon Stirred Steel. Dissertação de doutorado. 2011.
- 10 Fruehan R.J. Unique functions of slags in steelmaking. 7th International Conference on Molten Slags, Fluxes, and Salts. 2004.
- 11 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.
- 12 BALE, C.W *et al.* FactSage thermochemical software and databases, 2010–2016. Calphad, 2016, p. 35-53.
- 13 BIELEFELDT, Wagner V. Relatório interno, projeto Gerdau, pareceria Laboratório de Siderurgia-UFRGS.
- 14 HOLAPPA, Lauri. Secondary Steelmaking. In: SEETHARAMAN, (Ed.). Treatise on Process Metallurgy – Industrial Process parte A, United Kingdom: Elsevier, 2014. v.2, cap. 1.6, p. 302-304.
- 15 PRETORIUS, Eugene; OLTMANN, H; JONES, J. EAF Fundamentals. Disponível em: <http://etech.lwbref.com/Downloads/Theory/Fundamentals%20of%20the%20EAF%20Process.pdf>.
- 16 MORALES, B. B., NADALON, J. E. A., REIS, B. H., CONTINI, A. C., TRINDADE, L. B., VILELA, A. C. F. Modelo de predição da temperatura de liberação do forno panela. 44° Seminário de Aciaria – Internacional. 26 a 29 de maio de 2013 – Araxá, Minas Gerais, Brasil. P. 46-54.
- 17 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. 43° Seminário de Aciaria – Internacional. 20 a 23 de maio de 2012 – Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. P. 383-389.
- 18 CALADO, Cleves Eraldo. Determinação da Quantidade de Oxigênio no Aço Através da Análise por Ativação com Nêutrons de 14 mev. Dissertação de mestrado, 1978.