

ANÁLISE NÚMERICA E IN-SITU DE REVESTIMENTOS REFRATÁRIOS SEM CARBONO PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE ENERGIA EM PANEAS DE AÇO *

Matheus Felipe dos Santos¹

Murilo Henrique Moreira²

Maria Gabriela Garcia Campos³

Ricardo Afonso Angelico⁴

Eric Yoshimitsu Sako⁵

Vladnilson Peter de Souza Ramos⁶

Douglas Fernando Galesi⁷

Victor Carlos Pandolfelli⁸

Resumo

O consumo de energia em panelas de aço está relacionado às etapas do processamento que ocorrem durante o refino secundário. O aço líquido perde energia térmica quando são adicionadas ligas, pelo sopro de gases, agitação e por convecção natural. Cerca de 70% dessas perdas ocorrem pelos revestimentos refratários, que dissipam energia para o ambiente quando suas superfícies são resfriadas. A microestrutura dos refratários Carbonfree resulta na redução da transferência de calor no material, devido a presença de fases de baixa condutividade térmica (por exemplo, agregados porosos) e sem o carbono que é uma fase usualmente presente e aumenta a condutividade térmica nos materiais. O processo nas panelas de aço é transiente e necessita de ferramentas numéricas avançadas para investigar o desempenho desses materiais nas condições específicas de cada aciaria. Tais ferramentas foram aplicadas para estimar o potencial de conservação de energia dos revestimentos Carbonfree em um caso real (linha de metal e sola) e os resultados mostram um potencial de redução de 21%. Os testes realizados in-situ compararam as diferentes taxas de queda de temperatura para cada configuração com as previstas pela ferramenta. Os benefícios estimados foram comprovados e a eficiência dos materiais investigados foi validada.

Palavras-chave: Refratário; Panela de aço; Simulação; Consumo de energia;

C-FREE REFRACTORY TO REDUCE STEEL LADLE ENERGY CONSUMPTION: NUMERICAL ANALYSIS AND IN-SITU MEASUREMENTS

Abstract

The energy consumption of steel ladles is closely related to the processing steps during the secondary refinement. Thermal energy from the liquid steel is lost when melting alloying elements, stirring gases or by natural heat transfer mechanisms. The refractory lining is responsible for approximately 70% of those energy losses, which will be dissipated to the environment while the ladle surfaces are being cooled. Carbonfree refractories are microstructurally engineered to reduce the heat transfer in the material due to the lack of carbon (conducting phase) and the presence of lower thermal conductivity phases (i.e. microporous materials). The steel ladle process is a transient cycle that requires enhanced numerical tools to investigate the performance of such materials in specific conditions for each steelmaking shop. These tools were applied to estimate the saving energy potential of Carbonfree refractories in a real case scenario (bottom and metal line) and the results showed a potential of reducing 21% the energy consumption. In-situ trials were also carried out and the reduction in the energy consumption was evaluated by comparing the liquid steel temperature for the different lining configurations. The expected benefits had good agreement with the tool predictions and the efficiency of such materials were validated.

Keywords: Refractory; Steel ladle; Energy consumption; Modeling;

- ¹ *Mestre em Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.*
- ² *Graduando em Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.*
- ³ *Graduanda em Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.*
- ⁴ *Professor e Doutor em Engenharia Aeronáutica, Departamento de Engenharia Aeronáutica, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.*
- ⁵ *Technical Manager – Ironmaking solutions, Technical Department, Saint-Gobain Ceramics, Vinhedo-SP, Brasil.*
- ⁶ *Technical Manager – Steel Making Refractory solutions, Technical Department, Saint-Gobain Ceramics, Vinhedo-SP, Brasil.*
- ⁷ *Application and R&D Manager, Technical Department, Saint-Gobain Ceramics, Vinhedo-SP, Brasil.*
- ⁸ *Professor e Doutor em Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O cenário de otimização dos processos industriais tem motivado a aplicação de novas tecnologias e materiais, como consequência direta das tendências e necessidades para a modernização industrial e da forma como nossa sociedade vem produzindo bens de consumo. Assim, as indústrias de transformação têm buscado soluções inovadoras para aumentar a produtividade de seus processos e a qualidade do ambiente de trabalho, visto que segurança é uma prioridade fundamental. Ainda, esses benefícios vêm sendo buscado por meio do aumento de previsibilidade durante a produção, reduzindo o consumo de energia e de materiais dessas indústrias que são intensivas em diversos recursos [1].

Nesse estudo, um modelo numérico é empregado para simular o ciclo de uma panela de aço, com foco no revestimento refratário aplicado. O objetivo inicial é verificar a acurácia entre as temperaturas previstas no modelo e os valores reais. A boa precisão e representatividade do modelo torna possível a investigação de outras configurações de revestimento e de materiais, que indicam cenários de maior eficiência (solução refratária). Por exemplo, a aplicação de refratários Carbonfree na forma de tijolos ou monolítica pode reduzir o consumo de energia nas panelas de aço, permitindo novas formas de aplicação, melhorar a qualidade do ambiente de trabalho, entre outras demandas das indústrias siderúrgicas. A presença do carbono na microestrutura desses materiais aumenta a condutividade térmica efetiva desses materiais, resultando no aumento das perdas térmicas através do revestimento e das temperaturas de carcaça. Ainda, devido a dificuldade em processar refratários com carbono na presença de água (monolíticos), a aplicação desses materiais se restringe aos conformados na forma de tijolos onde a dispersão de tal fase é facilitada [2].

Após a validação da ferramenta, a aplicação do revestimento sem carbono foi avaliada considerando o revestimento de trabalho da linha de metal e sola de panelas de aço. Os potenciais benefícios dessas configurações são destacados a partir da capacidade em reduzir a queda de temperatura do aço associada ao consumo de energia do refino secundário. Também é apresentado outros aspectos referentes a gestão térmica do processo como menores temperaturas de carcaça. Os ganhos térmicos e energéticos são comparados aos dados de processo coletados in-situ e mostram uma diferença de 5%.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais

Cada material tem uma função específica no revestimento refratário de panelas de aço (Figura 1) e sua propriedade precisa atender as solicitações específicas. De maneira geral, três camadas compõem o revestimento das panelas: a camada de trabalho e segurança, que são refratárias, e uma carcaça metálica. Ocasionalmente, a camada de segurança e trabalho podem ser subdivididas, para considerar a presença de materiais isolantes ou com maior resistência mecânica e a corrosão. Portanto, além das regiões principais esses casos apresentam um revestimento com uma camada isolante, duas ou mais camadas de segurança, linha de escória, zona de impacto, etc., como mostrado na Figura 1. Essas regiões são consideradas no modelo e afetam a transferência de calor no sistema.

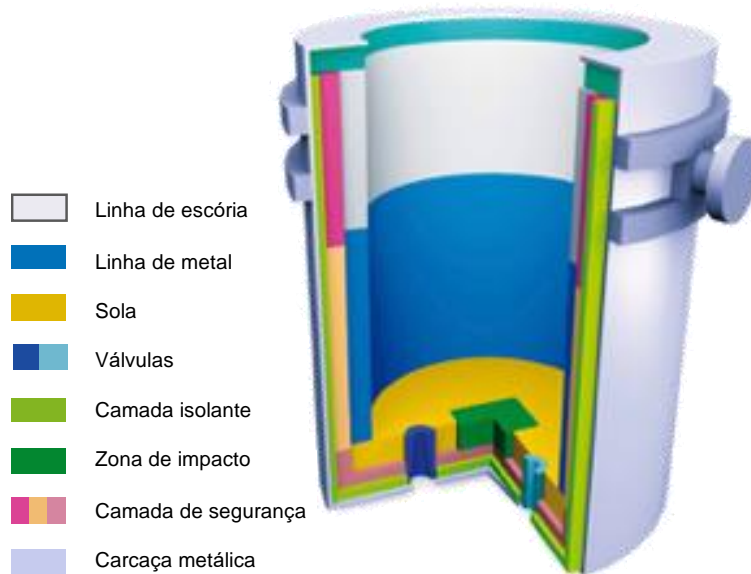


Figura 1. Representação esquemática do revestimento de painéis de aço [3].

Atualmente, a linha de escória das painéis de aço é revestida com tijolos refratários MgO-C e não há alternativa com desempenho equiparado sem carbono. Porém, diversas práticas e tecnologias para reduzir a quantidade dessa fase têm sido investigadas e isto pode ser benéfico para a conservação de energia. Os resultados apresentados são para materiais com teor usual de carbono (15%) e condutividade térmica mais elevada. Todas propriedades dos materiais com carbono foram obtidas de fichas técnicas fornecidas pelo fabricante. Para a configuração padrão considera-se a aplicação de tijolos MAC (magnésia-alumina-carbono) na linha de metal e sola.

Os refratários Carbonfree foram inicialmente desenvolvidos para reduzir o pick-up de carbono durante a produção de aços com ultrabaixo teor de carbono. Além disso, esses materiais apresentam vantagens devido a menor condutividade térmica em altas temperaturas. A alteração dessa propriedade está diretamente ligada ao potencial de conservar a energia nas painéis de aço e as temperaturas do revestimento refratário e da carcaça. Nos resultados, a configuração Carbonfree considera a aplicação desses refratários e as discussões investigam o potencial deles reduzirem a queda de temperatura do aço (consumo de energia). Os tijolos MAC da linha de metal e da sola são substituídos por tijolos AM (alumina-magnésia) e por um refratário monolítico aluminoso, respectivamente.

2.2 Processo

O processo metalúrgico nas painéis de aço apresenta mecanismos de transferência de calor distintos associados a cada etapa do processo. Nesse estudo, as etapas são modeladas assumindo simplificações do processo real e que apresentam maiores efeitos no estado térmico do equipamento [4]. A validação é feita para duas painéis em estágios distintos. A primeira foi monitorada logo nas primeiras corridas após a instalação do revestimento (5 corridas) e a segunda quando a panela já estava em operação (45 corridas). Cada cenário está associado a espessura distintas de revestimento refratário. Em ambos os casos, apenas as etapas de panela cheia e espera vazia são modeladas, pois nas corridas acompanhadas não houveram paradas.

O processo estudado inicia durante o vazamento do convertedor BOF. Em seguida, a panela segue para o refino secundário onde diversas etapas são executadas para preparar o aço para o lingotamento, de acordo com a liga produzida. Correções térmicas significativas são consideradas no modelo, como a adição de sucata ou aquecimento. Após todas as etapas intermediárias, a panela é posicionada na torre de lingotamento para ser esvaziada.

Ao final do lingotamento, a panela encontra-se vazia e a etapa de espera é iniciada para os reparos e verificações necessárias. Depois, a panela é novamente direcionada ao convertedor para o próximo vazamento e as etapas se repetem. É importante destacar que a duração de cada etapa varia e é necessário considerar esses valores para a validação. Logo, os tempos obtidos na operação foram usados nas simulações.

2.3 Modelo numérico

A geometria da panela é representada por um cilindro de revolução, considerando seis camadas na parede (camada de trabalho, junta de argamassa, duas camadas de segurança, camada de isolante e carcaça metálica) e quatro camadas no fundo (trabalho, segurança, isolante e carcaça metálica). Tanto a configuração do revestimento quanto as dimensões são consideradas para reproduzir a panela real, permitindo a investigação de diversos cenários com baixo custo computacional.

As análises destacam os impactos do revestimento refratário na transferência de calor e no consumo de energia do processo nas panelas de aço. Dessa forma, o estudo busca avaliar as configurações (MAC e Carbonfree), determinando a distribuição de temperatura e as perdas térmicas. Conseqüentemente, o objetivo resume-se em definir a temperatura $T(r,z,t)$ para um problema de transferência de calor com simetria radial e governado pela equação diferencial do calor (Equação 1). A solução transiente desse problema permite o cálculo do fluxo de calor em cada incremento de tempo, que é um indicativo da quantidade de energia transferida entre os nós do modelo, como apresentado abaixo:

$$\rho(T)c_p(T)\dot{T} - \nabla \cdot [k(T)\nabla T] = 0 \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do material ($kg\ m^{-3}$), c_p o calor específico ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) e k a condutividade térmica ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$). O calor latente associado às transformações de fase não foi computado. É importante destacar que as propriedades dos materiais foram avaliadas em função temperatura, quando disponíveis. O problema numérico foi solucionado usando o método dos elementos finitos no Abaqus/CAE 6.14-1. Outros detalhes sobre as condições de contorno são apresentados abaixo.

2.3.1 Condições de contorno e iniciais

A condição térmica inicial da panela foi considerada após seis ciclos analisados em condições médias do processo, como descrito em Santos et al [4]. Com isso, um perfil de temperatura médio foi desenvolvido no revestimento a fim de compensar eventos térmicos precedentes a análise realizada. Depois disso, as condições de contorno (CC) foram ajustadas para se aproximar e reproduzir as condições reais durante o monitoramento realizado.

As CC nas superfícies internas são alteradas de acordo com cada etapa do processo. Durante a etapa em que a panela está cheia com o aço líquido, a transferência de calor por convecção é predominante nas paredes internas e a Equação 2 define o fluxo de calor q_i associado ao fenômeno.

$$q_i = h_{aço}(T)(T_{aço} - T) \quad (2)$$

onde $T_{aço}$ é a temperatura média do aço fora da camada limite – seu valor inicial é obtido da temperatura média de vazamento obtida dos dados de operação, e $h_{aço}$ é o coeficiente de transferência de calor ($W m^{-2} K^{-1}$) para um processo de refino simples [4], no qual as perdas de calor são principalmente por convecção natural. Ainda, a quantidade de aço processada em cada corrida é ajustada para corrigir a altura do banho, $h_{aço}$ e a quantidade de energia inicial. Esses aspectos são considerados quando compara-se os resultados do modelo com as medidas in-situ. As etapas de enchimento e esvaziamento não são consideradas.

As CC nas superfícies externas são as mesmas durante todas as etapas dos ciclos investigados e estas são similares as condições nas superfícies internas quando a panela está esperando vazia. Nestes casos, as superfícies transferem calor por mecanismos de radiação e convecção.

2.4 Análise de imagens infravermelho

Diversas imagens em infravermelho da carcaça e da face quente das panelas foram obtidas durante o acompanhamento das duas panelas. Tais imagens foram obtidas a partir do uso da câmera FLIR T620 que gerou o conjunto de análise. Para ambos os equipamentos a temperatura de carcaça foi monitorada por 24 horas e a temperatura de face quente foi obtida nos momentos em que as superfícies internas estavam expostas (normalmente durante o momento de reparo das válvulas). A análise da temperatura média das superfícies foi feita por meio de máscaras para filtrar a temperatura em cada ponto das imagens, retornando uma série temporal da temperatura média de cada região analisada, como mostrado na Figura 2.

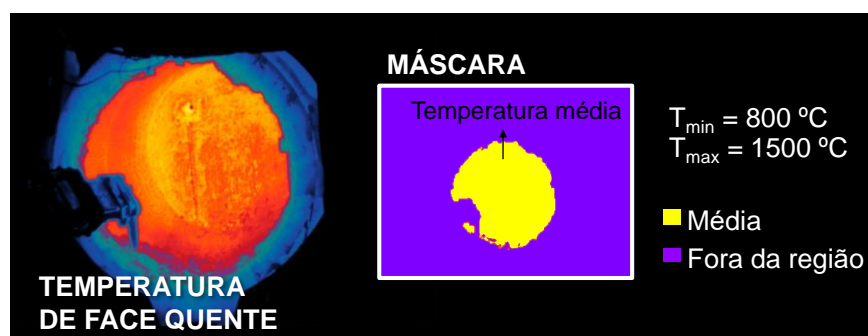


Figura 2. Exemplo da captura de uma imagem infravermelho e da análise feita a partir da aplicação de máscaras. Nessa imagem a temperatura de face quente é observada. Diferentes faixas foram aplicadas para determinar a temperatura média de face quente e carcaça.

2.5 Queda de temperatura e adições térmicas

O consumo de energia do processo nas panelas de aço pode ser estimado a partir da queda de temperatura do aço líquido. Durante o refino secundário, se a temperatura do banho encontra-se em um valor abaixo do esperado para a

continuidade do processo, alumínio e oxigênio são utilizados para aquecer o banho devido a energia liberada na oxidação do alumínio. Caso durante o refino a temperatura esteja acima da faixa desejada uma determinada quantidade de sucata é utilizada para reduzir a temperatura do banho. O fluxo de energia gerado ou removido do banho nos instantes de correção (q_r) é convertido e uma variação de temperatura que afeta o valor médio $T_{aço}$ utilizado para controle do processo.

A quantidade de energia que o aço perde para o revestimento refratário é investigado a partir da integral do fluxo de calor nas superfícies internas Γ , incluindo as perdas de energia pelo topo, através da camada de escória. A energia total perdida é integrada para determinar a variação da temperatura do aço em cada incremento de tempo, como:

$$\frac{dT_{aço}}{dt} = \frac{1}{\rho_{aço}c_{aço}V} \left(- \int_{\Gamma} q_i d\Gamma + q_r \right) \quad (3)$$

onde $\rho_{aço}$ é a densidade do aço líquido (7000 kg m^{-3}) e $c_{aço}$ o calor específico ($627 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões são apresentados em três seções. A primeira apresenta a validação do modelo com as condições de processo reais. A segunda apresenta a investigação de uma solução refratária com a utilização do revestimento Carbonfree no revestimento nas mesmas condições de processo. Por último, a comparação com os benefícios encontrados durante operação é realizada. A queda de temperatura do banho e o consumo de energia são destacados.

3.1 Validação

A simulação de processos industriais exige o desenvolvimento de ferramentas numéricas de modelagem. Principalmente quando busca-se investigar diferentes configurações de revestimento refratários, estimando seus benefícios energéticos. Nesse estudo, painéis com o revestimento de tijolos MAC na camada de trabalho são estudados.

Primeiramente, a temperatura de carcaça foi analisada. A temperatura média para cada imagem é plotada em função do tempo em que elas foram capturadas na Figura 3 (A). Os valores apresentados estão associados à média da temperatura obtida por meio das máscaras na região de interesse. O resultado mostra uma variação entre as medidas, o que em grande parte é consequência das diferentes regiões de captura das imagens dentro da aciaria. Em alguns momentos do processo, a carcaça não está exposta por completo e nesses casos a média de temperaturas corresponde a uma região específica como o topo ou somente parte da lateral (por exemplo, quando a panela está posicionada na máquina de lingotamento contínuo - MLC). Como existem diferenças na temperatura das diferentes regiões da carcaça devido ao material refratário utilizado e sua espessura, além dos mecanismos de transferência de calor distinto em cada região. Tais fatores possivelmente resultam nos desvios que estão mostrados na Figura 3 (A) e são associados aos pontos plotados. Note que a média móvel com um intervalo de 5 pontos (linha tracejada) é apresentada para facilitar a identificação da tendência e o comparativo com o modelo.

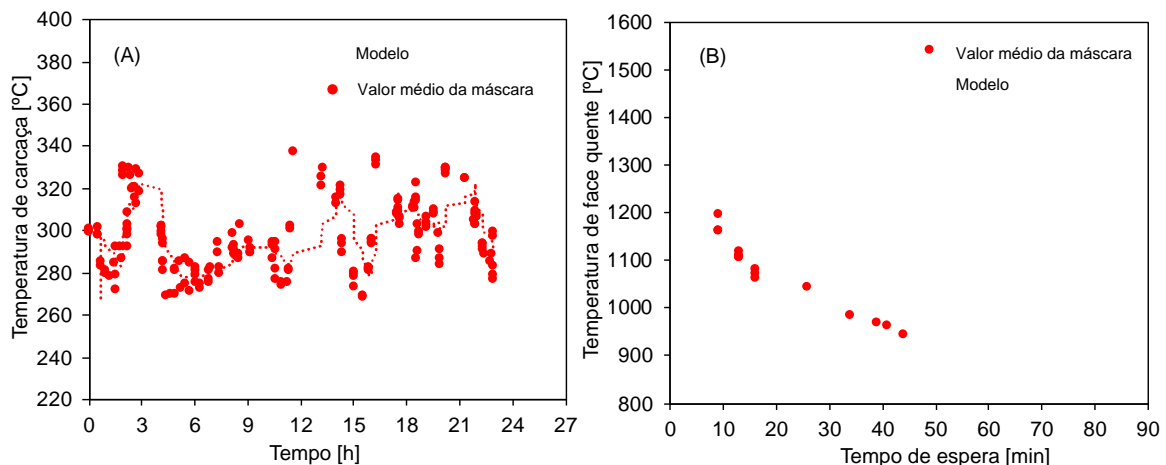


Figura 3. Temperatura média de carcaça para todos os ciclos avaliados (A) e a temperatura média da face quente para um dos ciclos (B). As imagens apresentam o comparativo entre o modelo e as medidas experimentais. O resultado mostra boa aproximação entre os valores.

A temperatura de carcaça média obtida do modelo apresenta um comportamento contínuo, justamente porque os valores são registrados similarmente à medição feita por um termopar em contato com a região. No geral, a comparação entre as temperaturas previstas e as observadas mostrou semelhança, em especial no caso analisado.

Na Figura 3 está apresentado um comparativo para as temperaturas de face quente. Aqui a comparação é apresentada para apenas uma corrida, visto que não há continuidade para essas medições. A semelhança entre os valores medidos e os previstos pelo modelo é bastante alta, tanto frente ao comportamento quanto a magnitude dos valores de temperatura. Nota-se que o comportamento mostrado é similar para as demais corridas e o que o número de imagens é muito menor que as medidas realizadas para a carcaça.

A última comparação é feita em relação a queda de temperatura do aço líquido durante o processamento, mostrada na Figura 4. No gráfico são apresentadas a temperatura obtida durante as simulações (linha contínua) e as medições operacionais (pontos e linha tracejada). A comparação foi feita para uma rota de processamento menos complexa da panela de aço, no qual o refino secundário consiste basicamente do tratamento realizado na estação de borbulhamento (EB). Esse caso apresenta maior similaridade aos fenômenos de

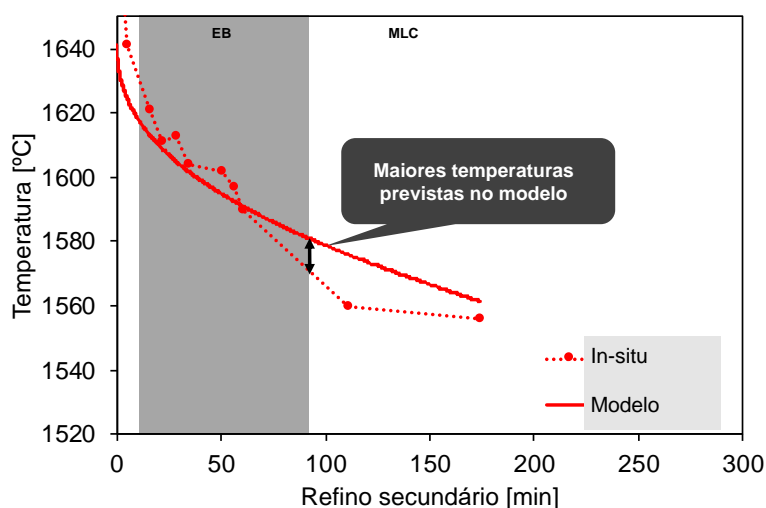


Figura 4. Comparação entre a temperatura média do aço medidas in-situ e as obtidas por meio do modelo de simulação numérica.

transferência de calor que estão sendo considerados. Devido aos mesmos fatores que a temperatura de face quente, a comparação é feita para cada corrida acompanhada. O comportamento que pode ser observado deixa claro que as perdas térmicas do modelo são inferiores às condições reais e as temperaturas previstas são superiores. De maneira geral, a ferramenta ainda se mostra eficiente para prever cenários do processo, principalmente quando o foco das análises é investigar o efeito de configurações refratárias sob as mesmas condições operacionais.

3.2 Solução refratária

O benefício estimado quando os refratários Carbonfree são utilizados na camada de trabalho é apresentado na Figura 5. Esse cenário foi investigado para a mesma corrida utilizada na validação da ferramenta. Os resultados mostraram que se as condições iniciais fossem mantidas, a configuração Carbonfree evitaria a queda de 16 °C na temperatura média do banho para o mesmo tempo de análise. Ou, se o objetivo é atingir as mesmas temperaturas, seria possível reduzir a temperatura inicial nos mesmos 16 °C. Ambos os casos são indicativos de uma redução no consumo de energia. O primeiro implicaria na menor necessidade de reaquecer o banho consumindo energia elétrica e alumínio, ou na redução do tempo necessário para produzir a mesma quantidade de aço. Já o segundo, menores temperaturas iniciais significam reduzir a temperatura de fim de sopro e de vazamento (no caso dos convertedores), que impactam diretamente no consumo de energia e em outros fatores de operação dos BOFs como o próprio desgaste do refratário. Esse benefício corresponde a uma redução na taxa de queda de temperatura do aço dentro da panela, que nessa comparação corresponde a 21% de melhoria.

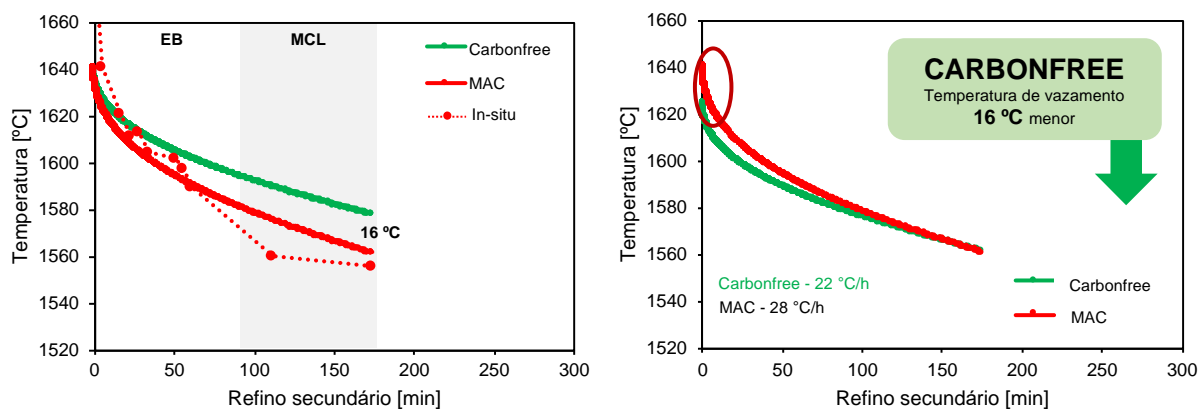


Figura 5. Solução investigada para os refratários Carbonfree aplicados na camada de trabalho de panelas de aço. A redução na queda de temperatura do aço consiste em uma redução de 21% no consumo de energia para aquecimento, seja no convertedor ou na própria panela.

3.3 Verificação da solução in-situ

Algumas considerações precisam ser apresentadas para a comparação entre os benefícios obtidos de análises dos dados operacionais e do modelo. Devido a alta variabilidade de processo são raras as corridas que apresentariam condições muito semelhantes para os dois tipos de revestimento. Com isso, identificou-se qual momento do processo seria ideal para a comparação e este consiste do fim do borbulhamento após o vazamento até o início do refino secundário. Durante o

intervalo são medidas a temperatura e o tempo (para cálculo da taxa de queda de temperatura) e os efeitos das perdas térmicas são predominantemente através do revestimento refratário.

Logo, estimando-se a queda ou a taxa média de queda de temperatura para cada configuração, compara-se os valores obtidos pelo modelo e pelos dados reais. As mesmas regiões são analisadas para os modelos e os resultados são apresentados na Tabela 1 abaixo. Para a panela com revestimento Carbonfree avaliou-se uma campanha completa (93 corridas) e para a panela MAC duas campanhas completas (180 corridas).

Tabela 1. Comparação entre as taxas de queda de temperatura para as configurações MAC e Carbonfree, nas condições reais e do modelo.

	Taxa de queda de temperatura [°C/min]		
	MAC	Carbonfree	%
Modelo	-0.73	-0.59	19%
Real	-1.5	-1.3	14%

A comparação mostrou que o modelo estima taxas menores de queda de temperatura para o intervalo de interesse, mas relativamente os ganhos são similares. O benefício do uso do revestimento sem carbono foi próximo, tanto para as condições de processo reais, 14%, quanto para as condições simuladas, 19%, comparando-se a redução na taxa média de queda de temperatura do aço.

Vale destacar a necessidade de uma avaliação mais ampla dos efeitos do revestimento Carbonfree, como a realização de imagens termográficas, de uma coleta de dados operacionais contínua, ou seja, testar e acompanhar diversas campanhas, entre outras. Assim, os benefícios da aplicação desses materiais no revestimento refratário de panelas de aço seriam melhor investigados.

4 CONCLUSÃO

As simulações numéricas são ferramentas poderosas para a investigação de benefícios associados a cenários de novas soluções de revestimento refratário. A ferramenta ainda permite ampliar práticas de gestão térmica em aciarias principalmente para as panelas de aço, onde são feitos os últimos ajustes do aço produzido. Nesse estudo, a ferramenta é validada e uma solução refratária é apresentada considerando a aplicação de refratários Carbonfree na camada de trabalho. As simulações mostraram uma redução de 16 °C na queda de temperatura do banho, um ganho de 21% em relação a configuração padrão. Quando comparada as taxas de queda de temperatura entre o modelo e as condições reais, nota-se uma diferença de 5% no ganho obtido, para essas mesmas duas configurações.

A modernização dos processos siderúrgicos deve estar acompanhada de soluções que sejam ambientalmente favoráveis e os refratários se mostram com uma alternativa eficaz nessa direção.

Agradecimentos

Os autores são gratos a Saint-Gobain Cerâmicas, ao CNPq, CAPES e FIPAI pelos diversos suportes ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 NIST, U.S. Department of Commerce. Report by the CIVS, Purdue University Northwest, 2018.
- 2 Luz AP, Braulio MAL, Pandolfelli VC, Refractory Castable Engineering, FIRE, 2015.
- 3 Calderys, Online, available: www.calderys.com/images/Steel_Ladle_big.jpg, accessed: 20-Jun-2017.
- 4 Santos MF, Moreira MH, Campos MGG, Pelissari PIBGB, Sako EY, Angelico RA, Sinnema S, Pandolfelli VC., Ceram Int. 44 (2018) 12831-12840.