

AVALIAÇÃO DE TIJOLOS SEM CARBONO EM PANEIAS DE AÇO*

Haysler Apolinário Amoroso Lima¹
Mônica Marcela Thomaz²
Matheus Felipe dos Santos³
Vladnilson Peter de Souza Ramos⁴
Douglas Fernando Galesi⁵

Resumo

Aços IF (*Interstitial Free*), são definidos como ultra-baixo-carbono, o que confere propriedades mecânicas específicas para uma série de aplicações, principalmente durante a conformação mecânica, essencial para a indústria automotiva. Os principais materiais refratários utilizados em painéis de aço são baseados em Magnésia-Carbono e Alumina-Magnésia-Carbono, ou seja, apresentam carbono em sua composição. O carbono confere propriedades importantes para os refratários quanto a resistência a corrosão química e melhoria das propriedades termo-mecânicas. Entretanto, o carbono ao ser incorporado ao aço, no que se define como fenômeno de *pick up* de carbono, prejudica suas propriedades mecânicas. Além disso, a presença do carbono no revestimento refratário aumenta a perda térmica da painél de aço, desfavorecendo o balanço energético da Aciaria. Este trabalho desenvolveu um modelo químico do *pick up* de carbono, compreendendo todos os fenômenos envolvidos, bem como obteve-se um modelo térmico transiente avaliando as perdas térmicas de uma painél com e sem carbono.

Palavras-chave: Aços IF; Refratários Isentos de Carbono; *Pick-up* de Carbono e Perda Térmica.

EVALUATION OF CARBON-FREE BRICKS IN STEEL LADLE

Abstract

IF steels have ultra-low carbon content, which results in specific mechanical properties suitable for a wide range of applications, especially the ones that requires mechanical forming, highly demanded by the automotive industry. The refractory materials applied in steel ladles usually contain carbon and they consist mainly of magnesia-carbon and alumina-magnesia-carbon bricks. The presence of carbon gives important properties to the refractories as chemical corrosion and thermal shock resistance. Although, the molten steel can remove carbon from the lining, in a phenomenon called carbon pick-up, downgrading the steel mechanical properties. Furthermore, the presence of carbon increases the thermal losses in the steel ladle cycling, reducing the steelmaking process control and saving energy scenarios. Herein, the study developed a complete chemical model for the carbon pick up comparisons and considered a transient heat transfer model for the energy losses estimation, for both carbon-containing and carbon-free refractories.

Keywords: IF Steel; Carbon-Free Refractories; Carbon Pick-up and Thermal Loss.

¹ Sócio da ABM, Mestre e Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Aplicação, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

² Engenheira Química, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

³ Mestre em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.

⁴ Doutor em Engenharia Química, Coordenador de Aplicação, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

⁵ Engenheiro de Materiais, Gerente de Aplicação e Desenvolvimento, Saint-Gobain, Vinhedo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A panela de aço é um importante reator para o processo de fabricação de aço na siderurgia. Sua estrutura é composta basicamente por uma carcaça metálica, que é revestida com materiais refratários. Dentre os mais utilizados destaca-se a linha Magnésia-Carbono e Alumina-Magnésia-Carbono. A escolha destes materiais foi o resultado de muita pesquisa e desenvolvimento para atingir altas performances, garantindo segurança, estabilidade do processo, aumento de produtividade e custos menores. A Figura 1 mostra o esquema de uma panela de aço.

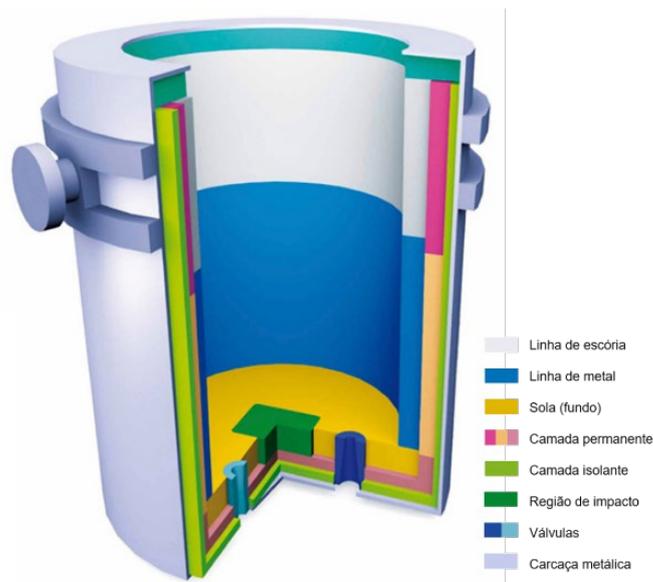


Figura 1 - Representação esquemática de uma panela de aço. Cada zona e região do revestimento refratário assim como a carcaça metálica são identificados [4].

Após o vazamento do aço do convertedor para a panela, o aço líquido é submetido a sucessivas rotas de tratamento para o ajuste da composição química e térmica. Os objetivos são garantir a composição química final e uma temperatura estável durante o lingotamento. Logo, o material do revestimento não poderá interferir de forma negativa neste processo, ou seja, não afetar na composição química e garantir a conservação da energia térmica do aço líquido.

O aumento na demanda de aços com requisitos de qualidade mais rigorosos tem exigido teores de carbono cada vez menores. Dentre esses aços destacam-se os aços IF (*Interstitial Free*) que tem como característica principal ultra baixos teores de carbono. Teores máximos de carbono de 0,002% podem ser exigidos no produto final.

Dependendo da aplicação pode-se exigir aços com teores de carbono em faixas extremamente estreitas, como por exemplo os aços “Bake Hardening” para a indústria automobilística que podem exigir faixas de carbono variando de 0,0015% a 0,0025%. Ressalta-se a especial atenção que tem sido dada ao controle da composição química destes aços. Para esses aços o controle do *pick up* de carbono torna-se extremamente rigoroso.

Para o processo de fabricação do aço o controle das perdas térmicas é de vital importância para a melhoria do processo. Desde a redução do número de retornos de aço do lingotamento contínuo à redução do elevado consumo de eletrodos e energia elétrica no forno panela. Sendo que cerca de 80% das perdas térmicas do aço dentro da panela ocorrem pela superfície da parede refratária (3). Portanto, a definição do tipo de revestimento é fundamental evitar tais perdas, principalmente do revestimento de trabalho.

Neste trabalho será feito a análise da influência de uma panela isenta de carbono (*carbon free*) em relação a materiais com carbono, elaborando um modelo químico dos fenômenos de difusão química pelo refratário e a avaliação em um modelo transiente de transferência das perdas térmicas do aço pelo refratário.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a influência de tijolos com carbono no *pick up* do aço, elaborou-se uma metodologia específica. A ideia é montar um corpo de prova, no formato de um cadinho refratário com o próprio material da panela, em seguida colocar neste cadinho amostras de aço IF cuja composição é determinada anteriormente. Através de um forno de indução pretende-se fundir o metal inserido no cadinho. A Figura 2 mostra o esquema proposto para medir o efeito do *pick up* de carbono no aço IF.

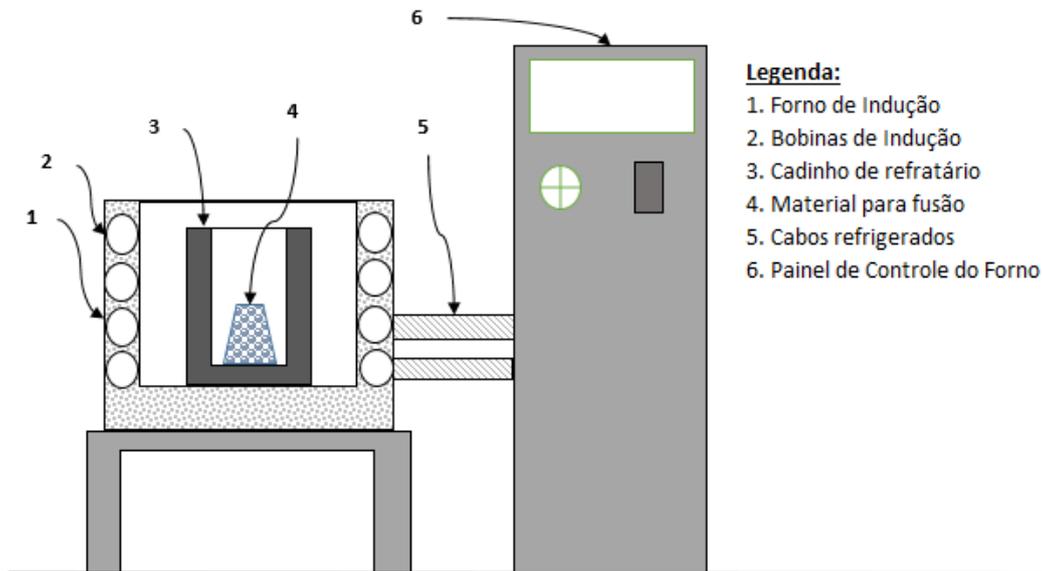


Figura 2 – Esquema proposto para avaliar o *pick up* de carbono

Em seguida foram separados corpos de prova (CP) dos materiais de panelas com carbono para determinar suas características físicas para a montagem de um modelo químico de difusão do carbono. Neste sentido será feito a medição da porosidade interna e tamanho do poro, através do porosímetro de mercúrio.

As perdas térmicas foram investigadas a partir de um modelo em elementos finitos descrito na seção 2.1.4, o qual considera o estado transiente do processo das panelas e a dependência das propriedades dos materiais com a temperatura.

2.1.1 DETERMINAÇÃO DO POROSIDADE DO TIJOLO COM CARBONO

Para determinar a porosidade e o tamanho de poro dos tijolos refratário foi realizado o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, em que o mercúrio, que é um líquido que não molha o sólido, é injetado na amostra à uma pressão acima de sua tensão superficial. Mede-se o volume de líquido instruído e a pressão do sistema para relacionar com o tamanho dos poros. A partir do diâmetro do poro corrige-se o coeficiente de difusão de carbono dentro do tijolo refratário.

O coeficiente de difusão D_{ef} é uma grandeza que está diretamente relacionada com a interação soluto/meio, e para o caso em que a difusão do soluto ocorre através de um líquido permeado dentro de uma matriz porosa, esse coeficiente deve ser corrigido pela equação 4: (Welty, et al., 2000)

$$D_{ef} = D_{AB}F_1(\varphi)F_2(\varphi) \quad (1)$$

Em que:

$$F_1(\varphi) = (1 - \varphi)^2 \quad (2)$$

$$F_2(\varphi) = 1 - 2,104\varphi + 2,09\varphi^2 - 0,95^5 \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{ds}{dp} \quad (4)$$

φ é o diâmetro do poro reduzido, $F_1(\varphi)$ e $F_2(\varphi)$ são fatores de correção, ds é o diâmetro molecular do soluto e dp é o diâmetro do poro da matriz porosa.

2.1.2 AVALIAÇÃO DO PICK UP DE CARBONO EM FORNO DE INDUÇÃO

Para avaliar o efeito do carbono do tijolo refratário no aço foi montado um cadinho de refratário com 3,0% de carbono em sua constituição. A Tabela 1 mostra as propriedades do tijolo.

Tabela 1 – Propriedades do tijolo com carbono e sem carbono.

Propriedades	Material A	Material B
<i>Composição química (%)</i>		
Al ₂ O ₃ (%)	90,5	85,5
MgO (%)	2,5	6,5
Carbono (%)	3,00	0,0
Outros (%)	4,00	5,0
<i>Propriedade após cura</i>		
Porosidade Aparente (%)	5,5	13,0
Densidade Aparente (g/cm ³)	3,32	3,28
Resistência à compressão (MPa)	34	50

Através da fusão da carga metálica devido aos efeitos da corrente induzida, o metal líquido irá interagir com as paredes refratárias do cadinho. Parte do carbono do refratário oxida e sai na forma de gases (CO/CO₂), já outra parte poderá incorporar no refratário na forma atômica (*pick-up*).

Como forma de avaliar a taxa de incorporação do carbono no aço, pretende-se medir o teor inicial (20 ppm) e em seguida medir o teor final de carbono após o teste. Para efeito de similaridade com a prática operacional, pretende-se medir em paralelo

a taxa de desgaste do cadinho em contato com o metal. Essa taxa será medida em gramas/minuto. Ou seja, sabendo quanto de carbono do refratário foi extraído no teste, pode-se fazer o balanço de massa e determinar quanto foi por difusão química no aço e quanto foi por saída na forma de gases.

2.1.3 ANÁLISE QUÍMICA DOS MATERIAIS UTILIZADOS

A medição do teor de carbono no aço foi realizada através do equipamento LECO (modelo SC-144DR). Colocaram-se amostras dentro de um cadinho cerâmico (combustion boat) em que a amostra é submetida à uma atmosfera de oxigênio puro à 1350°C até combustão completa, o gás CO₂ formado escoa então até o detector de infravermelho após passar pelo controlador de fluxo (LECO, 2008).

2.1.4 AVALIAÇÃO DAS PERDAS TÉRMICAS

Neste estudo, as simulações computacionais foram desenvolvidas utilizando-se o método dos elementos finitos (Abaqus/CAE 6.14-1 © Dassault Systèmes Simulia Corp., 2014). O ciclo da panela de aço é simplificado em quatro etapas principais (pré-aquecimento/reaquecimento; espera 1; refino secundário; e espera 2), que representam uma visão geral do processo e possibilitam comparar as diferentes configurações.

O pré-aquecimento é a etapa na qual a panela com revestimento novo é aquecida por meio de uma chama localizada na parte superior central deste vaso, transferindo assim calor por radiação para as paredes internas do revestimento. Já nas etapas de espera (1 e 2), a panela perde calor por mecanismos de convecção e radiação em todas as superfícies (internas e externas). E, quando a panela está cheia (refino secundário), o metal líquido transfere calor para o refratário por convecção natural assumindo-se superfícies verticais e horizontais planas. Na figura 3, mostra os detalhes do revestimento e detalhes do modelo.

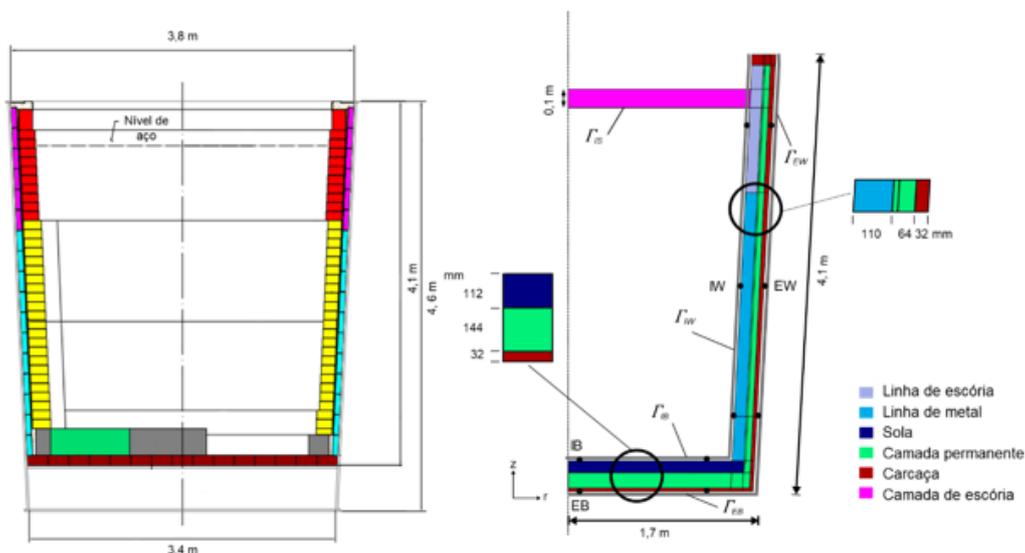


Figura 3: Dimensões da panela de aço simulada, com detalhes do refratário e do modelo.

Tabela 2: Condições de contorno para cada etapa do ciclo da panela.

Etapas do processo	Superfície Interna (S ₁ e S ₂)	Superfície externa (S ₃ e S ₄)
Aquecimento	$\sigma f \varepsilon (T_{int}^4 - T^4) + h_{ar}(T)(T_{int} - T)$	
Espera 1 e Espera 2	$\sigma f \varepsilon (T_{int}^4 - T^4) + h_{ar}(T)(T_{int} - T)$	$\sigma \varepsilon f (T_{meio}^4 - T^4) + h_{ar}(T)(T_{meio} - T)$
Refino Secundário	$h_{aço}(T)(T_{aço} - T)$	

Obs: σ coeficiente de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5,6697 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$); f view factor da superfície; ε emissividade; T_{int} temperatura interna da panela; T_{meio} temperatura do meio externo; $T_{aço}$ temperatura do metal líquido; h_{ar} coeficiente de transferência de calor por convecção entre a carcaça e o meio ambiente ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

A partir da simulação é possível estimar o comportamento térmico do sistema, obtendo-se informações sobre a distribuição de temperatura, o fluxo de calor e as quantidades de energia transferida. Dessa forma, é de interesse a resolução de um problema de transferência de calor em regime transiente, o qual é descrito matematicamente por:

$$\rho c \dot{T} - \text{div}(-K \nabla T) = 0 \quad (5)$$

Sendo c é o calor específico (J/kg K), K o tensor de condutividade térmica do material (W/(m K)) [12] (sendo estes dependentes da temperatura), ρ a densidade do material (kg/m^3) e t o tempo. As condições de contorno são descritas na Tabela 2 a partir dos mecanismos de convecção e radiação de acordo com a etapa do ciclo. A temperatura inicial do revestimento foi de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, assim como temperatura do ambiente distante da panela (T_{meio}), já a temperatura do ar foi considerada $600 \text{ }^\circ\text{C}$ para o interior da panela (T_{int}). Na etapa de panela cheia, a temperatura inicial do aço foi de $1680 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_{aço}$).

Além disso, a temperatura média do aço ($T_{aço}$) em cada instante é determinada pela quantidade de energia que foi transferida para o refratário subtraída da quantidade de energia armazenada no metal líquido. Tal queda de temperatura é dada por:

$$\frac{dT_{aço}}{dt} = - \frac{1}{\rho_{aço} c_{aço} V} \int_{\Gamma_{PI} \cup \Gamma_{FI}} q(r, z, t) d\Gamma \quad (6)$$

onde $\rho_{aço}$ é a densidade do metal líquido (7000 kg m^{-3}), $c_{aço}$ é o calor específico (627 J kg^{-1}), V é o volume do metal líquido e $q(r, z, t)$ é o fluxo de calor das superfícies interna da panela.

Por fim, os cálculos de energia são realizados a partir da integral do fluxo de calor em relação à área da superfície e ao tempo de análise (t), segundo metodologia abordada por Santos et al [5]. Assim, a quantidade de energia é dada por:

$$E(t) = \int_0^t \int_{\Gamma} q(r, t, z) d\Gamma dt \quad (7)$$

Sendo Γ as superfícies (Γ_{IW} , Γ_{IB} , Γ_{EW} , Γ_{EB}) que transferem calor durante o processo e a modelagem da panela em um intervalo de tempo t e $q(r, z, t)$ o fluxo de calor nessa superfície em coordenada cilíndrica. As perdas pela borda da panela no topo são desconsideradas do balanço energético.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Correção dos coeficientes de difusão

A difusividade em cm^2/s do gás CO e do carbono sólido no aço foi calculado por Solar e Guthrie (1971), e corrigida para a difusividade efetiva considerando a porosidade do meio refratário. A figura 4, mostra a distribuição de poros do tijolo com carbono.

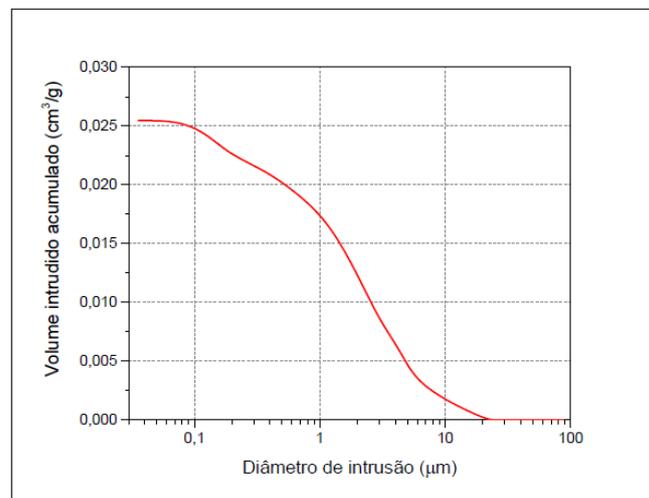


Figura 4 – Distribuição do Tamanho do Poro do Tijolo com Carbono

A tabela 3, mostra o tamanho médio do poro, e a tabela 4 o cálculo da difusividade.

Tabela 3 – Avaliação do tamanho médio do poro

Identificação	Diâmetro médio de intrusão (μm)	80% dos poros entre (μm)
Alfrac a 1sg5	1,89	6,78 e 0,18

Tabela 4 – Coeficientes de difusão

Componente	CO	C
Difusividade (cm^2/s)	$7,61 \times 10^{-5}$	$36,3 \times 10^{-5}$
Difusividade efetiva (cm^2/s)	$7,0 \times 10^{-5}$	$3,58 \times 10^{-4}$

3.2 Balanço de massa de carbono no tijolo

O transporte de massa que acontece do interior do sólido para o fluido é governado pela difusão molecular, a medida em que o fluido está estagnado dentro dos poros.

Considerou-se que todo o tijolo está impregnado com o aço, formando um meio homogêneo.

Em processos difusivos em meios porosos, o transporte no meio 1 pode ser afetado pela resistência no meio 2, sendo necessário calcular-se o número adimensional de Biot.

$$Bi = \frac{Lkm}{D_{ef}} = \frac{10,9,6 \times 10^{-6}}{3,58 \times 10^{-4}} = 0,268 \quad (8)$$

Como $Bi \rightarrow 0$, existe resistência externa à difusão.

O coeficiente de transferência de massa convectivo km foi calculado através da analogia de Reynolds, primeiro calculou-se o número de Schmidt

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{ef}} = 0,002$$

Como $Sc \neq 0$, o número de Sherwood é calculado pela equação 25:

$$Sh_x = 0,332 \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3}$$

Como:

$$\frac{km \cdot X}{D_{ef}} = Sh_x$$

Rearranjando os termos, determinou-se km :

$$km = \frac{Sh_x \cdot D_{ef}}{X} = 9,6 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

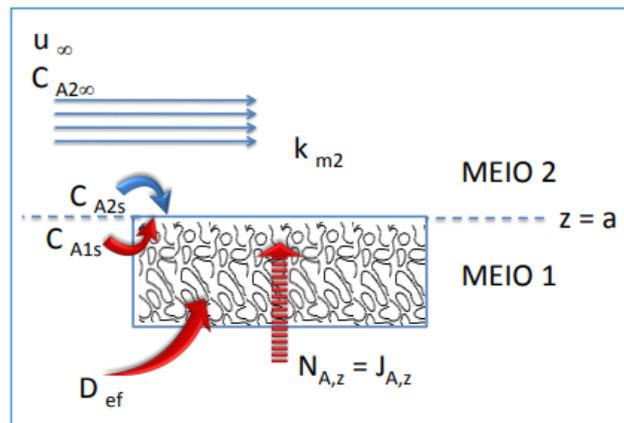


Figura 5 – Representação do fluxo mássico, em que o meio 1 corresponde ao tijolo e o meio 2, o aço líquido (8).

$$\left(\begin{array}{c} \text{Acúmulo de} \\ \text{massa de C} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Massa de C} \\ \text{que entra} \\ \text{por difusão} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Massa de C} \\ \text{que sai por} \\ \text{difusão} \end{array} \right)$$

Considerações:

- O sistema é isotérmico e isobárico;
- O fluido é incompressível;
- Não há variação do volume do sólido;
- O líquido no interior do sólido está estagnado;

- Fluxo mássico unidirecional em Z;
- Coordenadas retangulares;
- O sólido poroso é considerado homogêneo (isotrópico);
- O coeficiente de difusão efetivo D_{ef} é constante contempla todos os fenômenos de transferência de massa por difusão;
- Os poros são ideais e idênticos;
- Com resistência externa;
- Sem reação química

A equação do balanço para o carbono no sólido fica:

$$\frac{d(C_C)}{dt} = D_{ef} \frac{\partial^2 C_C}{\partial z^2}$$

Em que as condições de contorno em relação ao tempo e posição são:

$$C_C(0, z) = C_{C0} = 0,3$$

$$C_C(t, \infty) = C_{C\infty} = 0,02$$

$$\text{Em } z=L=10 \text{ cm} \rightarrow -D_{ef} \frac{\partial C_C}{\partial z} \Big|_{z=L} = Km(C_{CS} - C_{C\infty})$$

O conjunto de equações discretizadas pelo métodos das diferenças finitas centradas explicitamente para um $\nabla z=2$ em $t=0$, são:

$$\frac{d(C_C)}{dt} \Big|_{0,2} = D_{ef} \frac{C_{C0,0} - 2C_{C0,2} + C_{C0,4}}{\nabla z^2}$$

$$\frac{d(C_C)}{dt} \Big|_{0,4} = D_{ef} \frac{C_{C0,2} - 2C_{C0,4} + C_{C0,6}}{\nabla z^2}$$

$$\frac{d(C_C)}{dt} \Big|_{0,6} = D_{ef} \frac{C_{C0,4} - 2C_{C0,6} + C_{C0,8}}{\nabla z^2}$$

$$\frac{d(C_C)}{dt} \Big|_{0,8} = D_{ef} \frac{C_{C0,6} - 2C_{C0,8} + C_{C0,10}}{\nabla z^2}$$

Esse o sistema de equações foi resolvida com um $\nabla t = 5$ resultando nos perfis de concentração mostrados na Figura 6, sendo 0,03 a fração mássica do tijolo inicial (3% de Carbono).

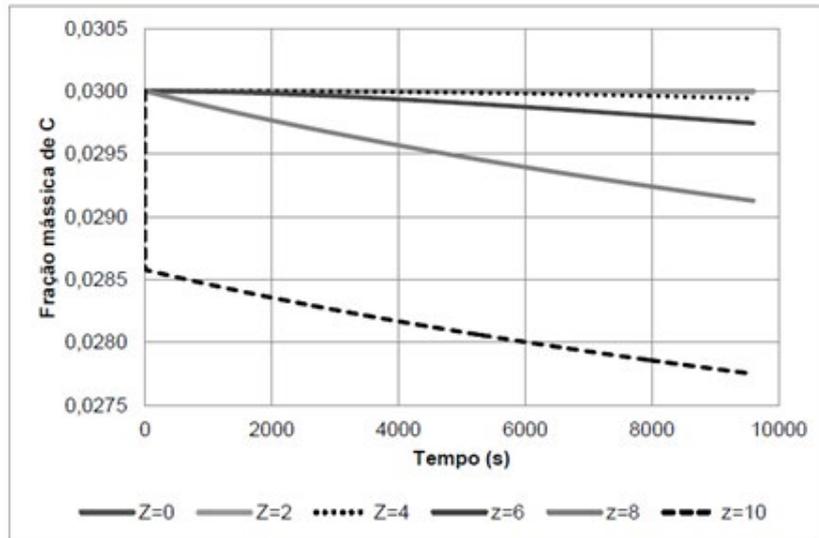


Figura 6 – Perfil de concentração de carbono em diferentes alturas

A análise da figura 6 mostra como a fração de carbono cai para diferentes valores de Z ao longo do tempo. Ainda que a variação de concentração seja pequena, a presença do gradiente de concentração causa transporte de massa do interior do tijolo para superfície. Num tempo de 300 segundos, que corresponde ao tempo de drenagem da panela, a concentração na superfície no tijolo é de 0,02825, ou seja, ouve um decréscimo de apenas 6% na concentração inicial.

Para encontrarmos o fluxo mássico através de um único tijolo no tempo fazemos o fluxo N_c na superfície multiplicado pela área transversal do tijolo A.

$$N_c(t) \Big|_{z=L} = km(C_c(t) - C_{c\infty})$$

Balço de massa no banho de aço

Já para o balanço de massa de carbono no banho metálico, precisamos considerar o fluxo que entra por difusão por cada tijolo e o que sai devido ao escoamento do aço pelo fundo da panela, considerando que não há variações ao longo do raio da panela.

$$\frac{d(C_c V)}{dt} = V C_c + km(C_c(t) - C_{c\infty}) \cdot A - \frac{d(C_c V)}{dt}$$

Aplicando a regra da cadeia:

$$\frac{V \cdot d(C_c)}{dt} + \frac{C_c \cdot d(V)}{dt} = km(C_c(t) - C_{c\infty}) \cdot A$$

Como não há variação ao longo do raio da panela:

$$\frac{V \cdot d(C_c)}{dt} = km(C_c(t) - C_{c\infty}) \cdot A - \frac{C_c \cdot d(V)}{dt}$$

$$V \frac{d(C_c)}{dt} = km(C_c(t) - C_{c\infty}) \cdot A - C_c \cdot \pi \cdot R^2 \frac{d(Z)}{dt}$$

A partir da resolução da equação acima obtém-se a expressão da concentração no tempo dentro da panela de aço

A figura 7 mostra o perfil obtido para a concentração de carbono ao longo tempo durante o esgotamento da panela. Ao longo do tempo, é possível observar que a concentração no seio do fluido praticamente não se altera até os últimos segundos do escoamento.

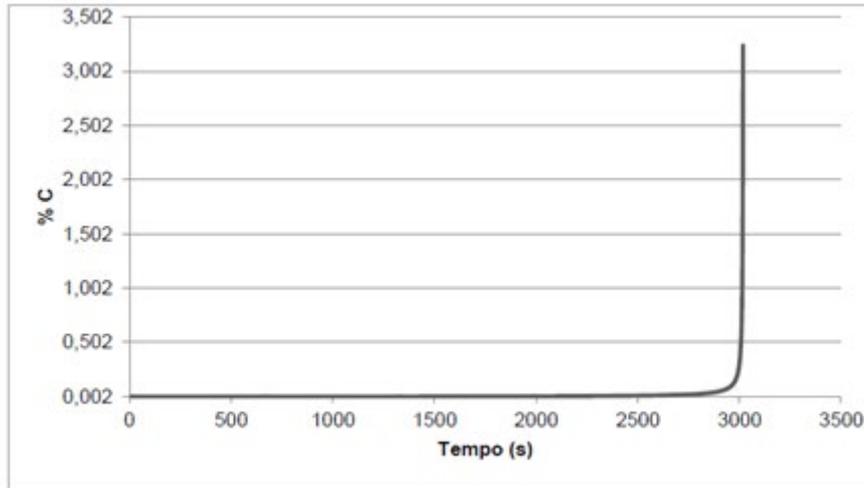


Figura 7 - Perfil de concentração de carbono com tempo no aço líquido para 1 tijolo

A concentração de carbono no aço líquido ultrapassa os limites desejados (0,003 %) muito próximo ao esvaziamento da panela. Isso acontece porque o fluxo que entra através do tijolo se difunde na pouca massa que ainda resta na panela, aumentando a concentração no aço residual.

3.3 Avaliação dos testes de fusão com aço IF em refratário com carbono

Os resultados obtidos após o teste no forno de Indução foram condizentes com a prática, ou seja, houve sim contaminação de carbono no aço IF, entretanto, a taxa de incorporação é maior na camada próxima a parede do refratário. Na figura 8, mostra o resultado de *pick up* de carbono para amostra coletada próximo a parede do refratário (5 mm de profundidade).

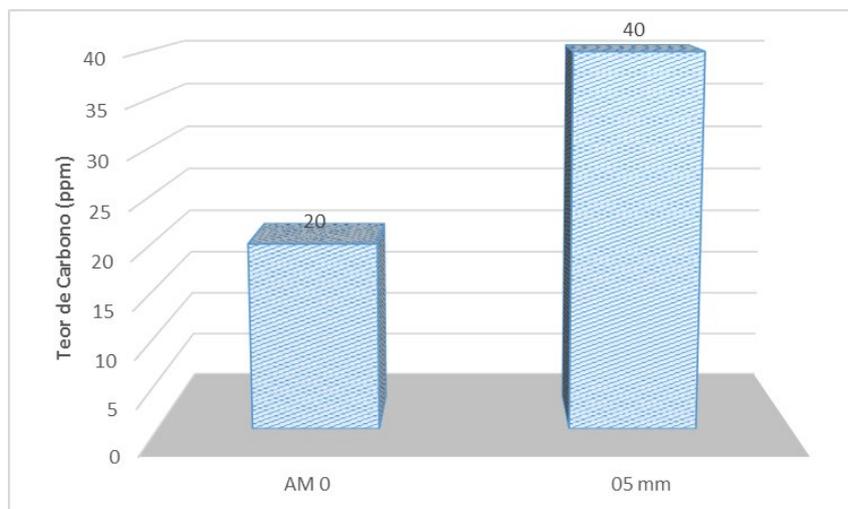


Figura 8 – Teor de Carbono na amostra fundida

A figura 9, mostra o cadinho após ensaio de fusão. A amostra de aço IF interna foi removida e retirada via broca 1 grama de material para teste via LECO.



Figura 9 – Fusão do aço IF no cadinho refratário com carbono

O resultado de *pick up* de carbono no forno de indução foi condizente com o modelo teórico, entretanto as dificuldades do teste em garantir a acuidade dos valores, exige mais experimentos e em diferentes proporções de carbono inicial do aço. Como trabalhos futuros, recomenda-se avaliar a variação do carbono em diferentes profundidades da amostra de aço, e com isso determinar a taxa de incorporação ao longo da amostra.

3.4 Avaliação do modelo numérico da perda térmica

Os resultados do modelo térmico de transferência de calor permitiram computar e comparar as temperaturas da face quente e da carcaça com as medições feitas in situ, por meio de uma câmera térmica FLIR, modelo T620 considerando o caso em que o revestimento da panela considera a aplicação do material AM, sem carbono. Tais resultados podem ser vistos na Figura 10 abaixo.

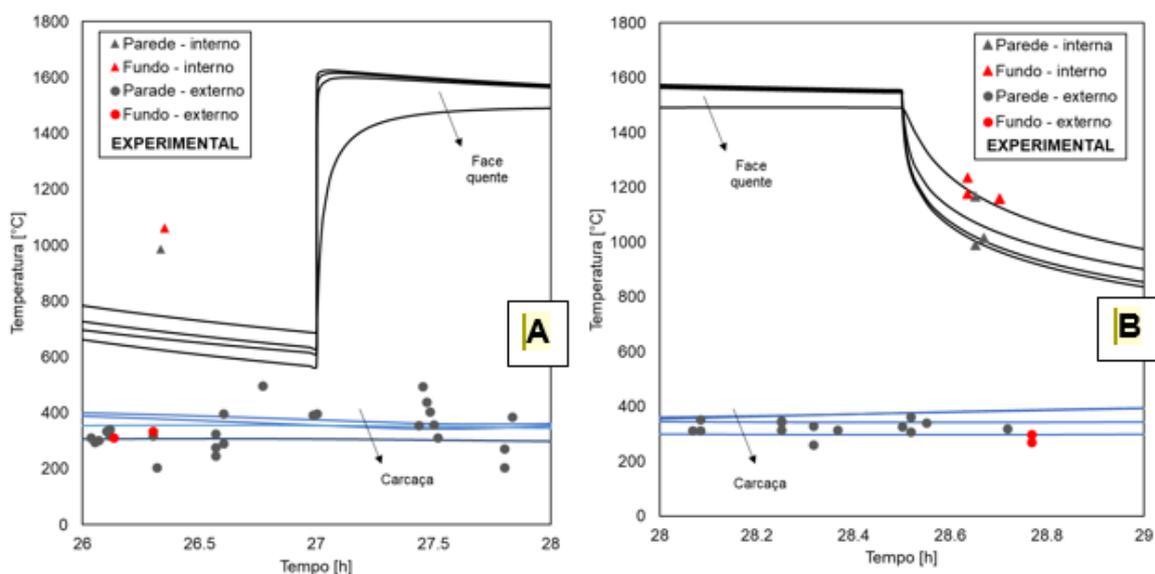


Figura 10 - Comparação dos resultados simulados com os coletados experimentalmente para a Panela A e B

Nessa figura, têm-se a análise para duas panelas de mesmo revestimento, das quais a coleta de dados foi possível, porém operando em momento distintos do processo. As comparações foram feitas com os resultados para o último ciclo simulado (sexto ciclo), onde há maior representatividade do estado térmico da panela, visto que regiões do revestimento já encontram-se na condição estacionária. Para a panela A as imagens termográficas foram obtidas do final da espera até o começo do refino secundário e para a panela B do refino secundário até o esvaziamento e a etapa de espera. As temperaturas de carcaça (linhas azuis) foram extraídas para alguns pontos do fundo e da parede e dessa mesma região avaliou-se as temperaturas da face quente (linhas pretas). O valor médio de temperatura de carcaça estimada pelo modelo foi de 353 °C, sendo tal valor maior para as paredes em relação ao fundo. Os dados experimentais apresentam em média 321 °C para a panela A e 342 °C para a panela B, pouco abaixo dos valores estimados no modelo (as alças metálicas não consideradas no modelo aumentam a extração de calor pela carcaça). As temperaturas de face apresentaram boa proximidade para a panela B, porém significativamente distante para a panela A. Isso deve-se a incerteza de quanto tempo a panela estava esperando antes de receber o metal, visto que as termografias apenas mostravam que a panela esperava por 25 minutos antes de receber o aço e não quanto tempo ela já estava esperando. Algumas das imagens termográficas usadas na comparação pode ser vista na Figura 11.

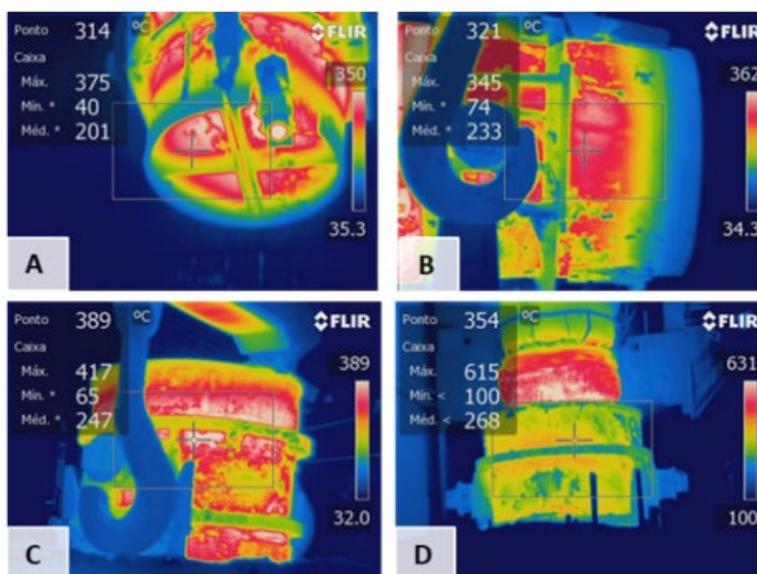


Figura 11 – Termografias obtidas nas panelas A e B

Dada a boa proximidade entre o modelo e os dados experimentais, utilizou-se a ferramenta de simulação para estimar outras vantagens dos revestimentos sem carbono (AM), como por exemplo, a perda de energia do banho durante o refino secundário. Essa quantidade energética está diretamente ligada ao desempenho térmico, consumo de energia e custo do processo. A panela sem carbono mostrou uma redução de 10% nas perdas de energia do banho (Figura 12), fazendo com que no mesmo tempo de processo essa configuração mantivesse a temperatura do banho em média 12 °C superior.

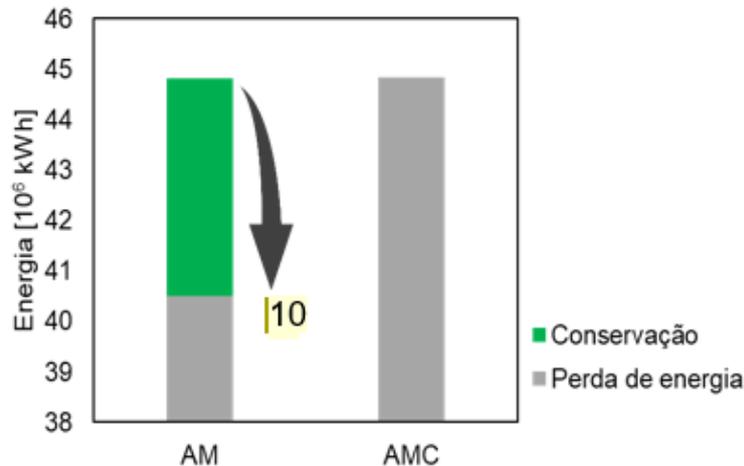


Figura 12 - Perdas de energia durante o refino secundário para a produção de 2.000.000 de toneladas de aço. A configuração AM evita tais perdas, que é mostrado pela quantidade em verde.

Tais resultados podem indicar reduções no consumo de energia elétrica e eletrodos para o reaquecimento do banho ou reduzir as temperaturas iniciais de vazamento. Consequência direta do tipo de revestimento utilizado, cujas propriedades térmicas são favoráveis à conservação de energia.

3 CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho foram:

Os resultados dos experimentos de fusão do aço, foram condizentes com o modelo teórico, entretanto mais experimentos serão necessários para calibrar melhor o modelo. Com um modelo confiável é possível estimar o impacto de tijolos com carbono do fenômeno do *pick up*, permitindo usar uma ferramenta para otimizar o projeto refratário. Ou seja, reforçar locais que necessitam de tijolos com carbono (linha de escória e impacto) para aumento de desempenho do equipamento sem comprometer a qualidade do aço.

Outro ganho previsto através do modelo numérico transiente de transferência de calor e validado na prática operacional foi a redução das perdas térmicas em até 10% pelo uso de tijolos isentos de carbono. Este ganho térmico reduz o consumo de energia elétrica e de eletrodos do forno panela, bem como redução da temperatura de carcaça evitando a deformação mecânica.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Saint-Gobain por incentivar a pesquisa e por ter proporcionando todos os recursos para a conclusão deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 KARABELCHTCHKOVA, O., SISSON, R.D., *Carbon Diffusion in Steel: a Numerical Analysis Based on Direct Integration of the Flux*. Journal of Phase Equilibria and Diffusion. 2006, 27(6), 598-604.
- 2 RUAN, G., LI, N., ZHANG, Z., *Carbon and Silicon Pickup of Interstitial-Free Steel from Al₂O₃-SiC Refractories*. American Ceramic Society Bulletin. 2005, vol. 85, No. 10.
- 3 LIMA, H.A.A., FILHO, G.A.F., HELENO, N.S., SANTOS, H.A., TEIXEIRA, M.G., SOUZA, E.N., *Redução do Retorno de Aço do Lingotamento Contínuo por Perda Térmica das Painéis de Aço*. XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, 2006.
- 4 “Calderys.”[Online].Available: http://www.calderys.com/images/Steel_Ladle_biq.jpg. [Accessed: 20-Jun-2017].
- 5 SANTOS, M.F., MOREIRA, M.H., CAMPOS, M.G.G., PELISSARI, P.I.B.G.B., SAKO, E.Y., ANGELICO, R.A., SINNEMA, S., PANDOLFELLI, *Enhanced Numerical Tool to Evaluate the Steel Ladle Thermal Losses*, Ceramics International (2018), 1-10, 10.1016/j.ceramint.2018.04.092.
- 6 LI, G., LIU, J., JIANG, G., LIU, H., *Numerical Simulation of Temperature Field and Thermal Stress Field in the New Type of Ladle with the Nanometer Adiabatic Material*, Adv. Mech. Eng (2015).
- 7 **Welty James R. [et al.]** Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer [Livro]. - Oregon : Willey, 2000. - Vol. 5ª Ed.
- 8 **Castilho Guilherme José de** Notas de Aula EQ741. - Campinas : [s.n.], 2017.
- 9 **LECO** Folha de especificação de equipamento [Online] // Usbioecuador. - Usbioecuador, 2008. - 01 de 06 de 2018. - <http://www.usbioecuador.com/descargas/SC144DR-ht.pdf>.