

MODELO MATEMÁTICO DE AVALIAÇÃO DO DESGASTE DO REFROTÁRIO DO CADINHO DO ALTO-FORNO ¹

Rodrigo Rangel Porcaro²
Gregor Hubert³
Eliana Ferreira Rodrigues⁴

Resumo

Uma análise térmica e fluidodinâmica do ferro gusa, contido no cadinho de um Alto-Forno é considerada neste trabalho. O modelo envolve solução de equações de Navier-Stokes para escoamento bidimensional turbulento (utilizando o modelo κ - ϵ), em conjunto com as equações de energia correspondentes, abrangendo energia térmica, variáveis de escoamento em regime permanente. As equações diferenciais são discretizadas, utilizando-se uma resolução numérica através de técnicas de elementos finitos, com auxílio dos softwares ANSYS/FLOTRAN. Os resultados permitem prever a localização da isotérmica de 1150°C que é de suma importância para o processo de fabricação, conseqüentemente pode-se desenvolver estratégias para minimizar o desgaste dos refratários do cadinho, prevenindo interrupções indesejáveis durante sua operação.

Palavras-Chave: Desgaste de refratário; Cadinho de alto-forno; Modelagem matemática; Simulação numérica.

MATHEMATICAL MODEL FOR THE EVALUATION OF REFRACTORY WEAR IN THE OPEN HEARTH BLAST FURNACE

Abstract

A dynamic analysis of the fluid flow and thermal behaviour of iron inside blast furnace hearth is considered. The model employs Navier Stokes two-dimensional turbulent κ - ϵ formulation, together with corresponding energy equations, the latter considering thermal energy and permanent fluid flow equations. The differential equations are solved by means of finite element tools, with the help of ANSYS/FLOTRAN software. The obtained results allow the determination of the 1150°C isothermal, which is a crucial element for pig iron production. The results is an analysis of potential importance to the iron making industry, evolving strategies for optimising energy consumption observing the quality of the final product, refractory wear, by means of control of the process parameters.

Key words: Refractory wear; Blast furnace hearth; Computation simulation.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Graduando do Curso de Engenharia de Metalurgia da Escola de Minas/UFOP - Brasil.*

³ *Graduando do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Técnica de Munique-Alemanha.*

⁴ *Dra, Professora Associada do Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais da Escola de Minas da UFOP - Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O prolongamento da vida útil de um alto-forno depende principalmente do conhecimento e controle do desgaste da parede refratária do seu cadinho. A interrupção indesejável devido ao desgaste dos refratários pode acarretar em perdas de produção de toneladas de ferro gusa.

O cadinho é um vaso metalúrgico composto por refratários de carbono posicionado na base do alto-forno, cuja função é armazenar gusa líquido e escória. Por conter líquido em altas temperaturas, podem chegar a 1.500°C , os refratários do cadinho sofrem intenso desgaste.

A parede pode sofrer erosão por penetração de metal líquido nos poros dos refratários, desgaste mecânico devido às tensões superficiais devido a escoamento e reações químicas entre refratários e escória /metal.⁽¹⁾

A fim de minimizar os processos de desgaste, a indústria vem adotando a estratégia de monitorar a posição da isoterma de 1.150°C na parede refratária, e tenta mantê-la o mais próximo o possível da interface refratário/líquido. A isoterma de 1.150°C representa a temperatura de solidificação do gusa saturado em carbono, por isso sua posição determina a máxima penetração de metal nos poros do revestimento e sua localização na interface gera uma camada de metal sólido sobre o revestimento, promovendo sua proteção contra danos mecânicos.⁽¹⁾

Diversos fatores influenciam a posição da isoterma de 1.150°C e o desgaste da parede do cadinho, como diferentes temperaturas de metal, padrões de escoamento e sistemas de refrigeração. A posição do “homem-morto”, sua profundidade no banho de metal, interfere no perfil de velocidade e no desgaste.

A medição direta da posição da isoterma de 1.150°C e da espessura real do revestimento, infelizmente, não é possível durante a operação de um alto-forno. Por isso torna-se imprescindível estimar a posição da isoterma de 1.150°C que representa um limite potencial do desgaste dos refratários.^(2,3)

Neste trabalho realizou-se uma simulação numérica para conhecer os processos de transferência de calor e fluido dinâmica do ferro gusa contido no cadinho do alto-forno com intuito de estimar a posição da isoterma de 1.150°C , o modelo estudado baseou-se no modelo do alto-forno nº 5 da Port Klemba, Austrália,⁽²⁾ conforme Figura 1, e foi implementado com o auxílio do software ANSYS.⁽⁴⁾

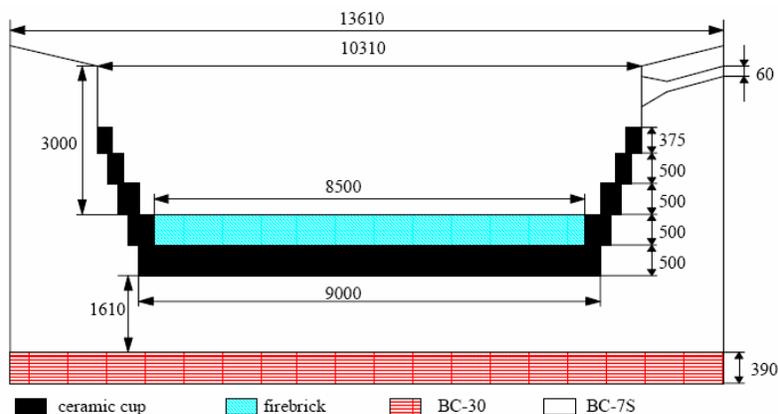


Figura 1. Dimensões físicas em mm, do modelo de cadinho do alto-forno nº5 Port Klemba.⁽²⁾

Com objetivo de conhecer o perfil térmico no refratário de um cadinho de alto-forno utilizando-se das técnicas de elementos finitos com o auxílio do software ANSYS⁽⁴⁾. A fim de determinar o perfil crítico para evitar o desgaste excessivo no revestimento, cinco simulações foram executadas com variação de diversos parâmetros operacionais, como sistemas de refrigeração, temperatura do metal, posição do homem morto, a fim de mensurar sua influencia no desgaste dos refratários. O modelo utilizado nas simulações I, II e III está representado na Figura 2 a, onde considerou apenas a parede refratária com várias condições de contorno mostrada na Tabela 2, a simulação IV e V utilizou o modelo ilustrado na Figura 2b, onde foi incluído a região de gusa líquido (propriedades fornecidas na Tabela 1) e a camada de leito de coque respectivamente.

Tabela 1. Propriedades físicas do ferro gusa⁽²⁾

Viscosidade laminar, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	0,00715
Condutividade térmica, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	16,5
Densidade, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7.000
Calor específico, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	850
Coefficiente de expansão volumétrica, K^{-1}	$1,4 \times 10^{-4}$
Vazão mássica, kgs^{-1}	80

2 FORMULAÇÃO DO MODELO

As seguintes considerações foram feitas para simular o modelo do cadinho proposto: o processo é permanente, e a superfície livre do metal líquido é plana e horizontal, é negligenciada a presença da camada de escória, as reações químicas e a solidificação são ignoradas e não considera a presença do leito de coque na simulação IV (somente o escoamento do gusa líquido), na simulação V considera-se todo espaço preenchido completamente como leito de coque (escoamento do gusa líquido através do leito de coque), as demais simulações I, II e III o modelo é constituído apenas pela parede refratária.

O modelo é bidimensional em coordenadas cartesianas. O modelo de vazamento foi considerado bidimensional com orifício de vazamento circular, com uma vazão constante durante o tempo de vazamento. A temperatura inicial do banho líquido foi considerada 1.500°C . As propriedades físicas dos revestimentos são tomadas dependentes da temperatura e considera-se ainda, contato térmico perfeito entre as várias camadas de refratários.⁽²⁾ A temperatura do meio ambiente externo é constante e todos os corpos são cinzentos emitindo radiação difusa. Apresentam-se as equações de Navier-Stokes, para continuidade, escoamento e energia para o ferro gusa:

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho u \times u) - \nabla \cdot (\mu_{ef} \nabla u) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{ef} (\nabla u)^T) + S_u + \beta \rho g (T - T_{ref}) \quad (2)$$

onde, ρ é a densidade do fluido (kg/m^3), e μ_{ef} , a viscosidade efetiva, calculada pelo modelo de turbulência k- ϵ , e definida como,

$$\mu_{ef} = \mu_L + \mu_T \quad (3)$$

onde, μ_L é a viscosidade laminar e μ_t , a viscosidade turbulenta, definida como,

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

sendo, k a energia cinética turbulenta e ε a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, e a resistência para o escoamento quando se considera a presença de leito de coque pode ser calculada pela equação de Ergun,

$$S_u = 150\mu_L \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^2 d^2} u + 1,75\rho \frac{(1-\gamma)}{\gamma d} |u|u \quad (5)$$

onde, γ é a porosidade (=0,35) e d é o diâmetro da partícula do leito de coque em metros (=0,03).

A equação da energia para o ferro-gusa

$$\nabla \cdot \left(\rho u H - \left(\frac{K}{C_p} + \frac{\mu_T}{0,9} \right) \nabla H \right) = 0 \quad (6)$$

onde, H = entalpia específica, $J \text{ kg}^{-1}$
 K = condutividade térmica, $W \text{ m}^{-1}K^{-1}$
 C_p = calor específico, $J \text{ kg}^{-1}K^{-1}$

Para as camadas dos revestimentos refratários utilizou a equação de condução de calor bidimensional e estacionário, em coordenadas cartesianas descrita pela lei de Fourier.

A solução para o problema requer a solução das equações diferenciais acima, utilizando as técnicas de elementos finitos. Entretanto a solução numérica dependerá dos valores escolhidos para as constantes que envolvem a equação de conservação para k e ε . Launder e Spalding⁽⁵⁾ recomendam os seguintes valores das constantes do modelo de turbulência: $C_\mu=0,09$; $C_1=1,44$; $C_2=1,92$; $C_3= 1,0$; $C_4= 1,0$; $\sigma_k=1,0$ e $\sigma_\varepsilon=1,3$, onde k e ε são energia cinética turbulenta e taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, respectivamente.

2.1 Condições de Contorno

Como foi simulado o regime permanente, considera-se o nível de ferro gusa constante e a superfície livre do ferro gusa como uma condição de entrada com pressão, temperatura e velocidade constante. Para as interfaces ferro gusa e revestimento refratário foram assumidos as condições de não deslizamento, resultando nulo os valores de k e ε , e das componentes da velocidade u_x e u_z . As componentes da velocidade paralelas à parede e os parâmetros turbulentos dos nós próximos à parede foram calculados utilizando modelo padrão função logarítmica.⁽⁵⁾ Kumar⁽¹⁾ e Panjkovic e Truelove⁽²⁾ sugeriram as condições de contorno térmicas externas, conforme ilustra a Tabela 2. Para a superfície do refratário no topo considera-se que o gradiente normal de temperatura é nulo. Para o furo de corrida a componente de velocidade em y é nula e a componente em x é igual a velocidade fornecida pelo balanço de massa e os valores empíricos utilizados por Yeh, Hwang e Chou⁽⁶⁾ e Joo, Han e Guthrie⁽⁷⁾ são os valores assumidos para k e ε no orifício. No

topo, o fluxo de calor e os valores de k e ξ e a componente da velocidade radial foram considerados nulos. Na simulação V, com a presença do leito de coque, considerou-se o escoamento laminar e os valores de k e ξ não foram considerados.

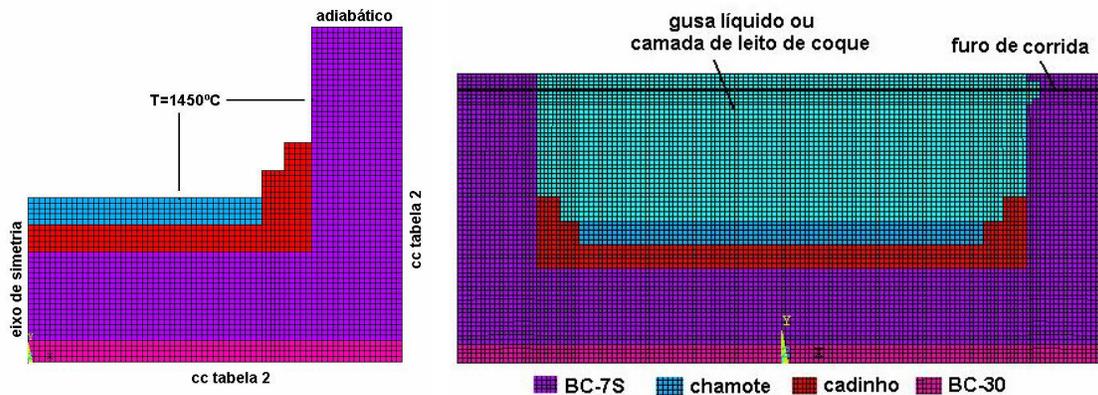
Tabela 2 - Condições de contorno térmicas utilizadas nas simulações.

	Alto-forno	T_{banho} ($^{\circ}\text{C}$)	$h_{\text{água}}$ (lateral) $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	h_{ar} (fundo) $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	$T_{\text{água}}$ $^{\circ}\text{C}$	T_{ar} $^{\circ}\text{C}$
CASO I	BF-A1	1.450	300	10	30	35
CASO II	BF-A2	1.450	300	100	15	20
CASO III	BF-B	1.450	300	$=h_{\text{água lateral}}$	32	-----
CASO IV e V	BF-C	1.500	300	$=h_{\text{água lateral}}$	32	-----

3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A análise numérica consiste em simular as condições operacionais durante o processo de fabricação, através do método dos elementos finitos (FEM), o qual é empregado pelo software ANSYS/FLOTRAN.⁽⁴⁾ Este software permite uma análise integrada da área fluida com a térmica no metal líquido e uma análise térmica nos revestimentos refratários. As malhas do modelo utilizados nas simulações são ilustradas na Figura 2, verificam-se diversos tipos de materiais refratários constituintes do revestimento do cadinho e para as simulações IV e V foram incluídos a região que representa o gusa líquido e o leito de coque, respectivamente.

O modelo b da Figura 2 é bidimensional em coordenadas cartesianas, e é composto de 9504 elementos (elemento da biblioteca do ANSYS - fluido 141) e 9715 nós, com as seguintes variáveis para o gusa líquido: temperatura, componente da velocidade axial, componente da velocidade radial, pressão e energia cinética e taxa de dissipação da energia cinética turbulenta e para o revestimento refratário apenas a temperatura. O critério de convergência estabelecido foi quando a variável temperatura atingia um valor pré-estabelecido de E^{-05} o que se equivale a 300 interações para o equilíbrio.



a)

b)

Figura 2 - Representação da malha utilizada no modelo do cadinho para as simulações a) caso I,II,III e b) caso IV e V.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

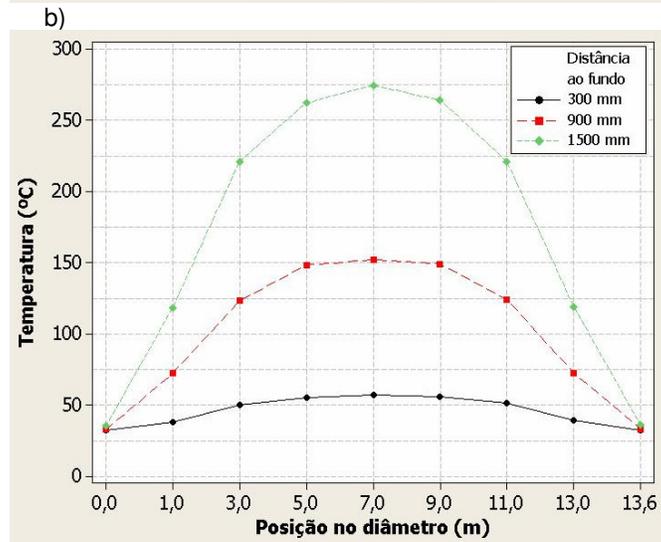
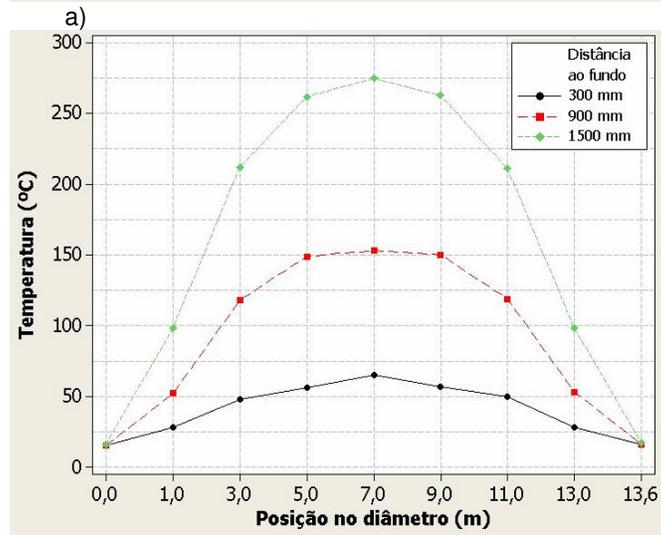
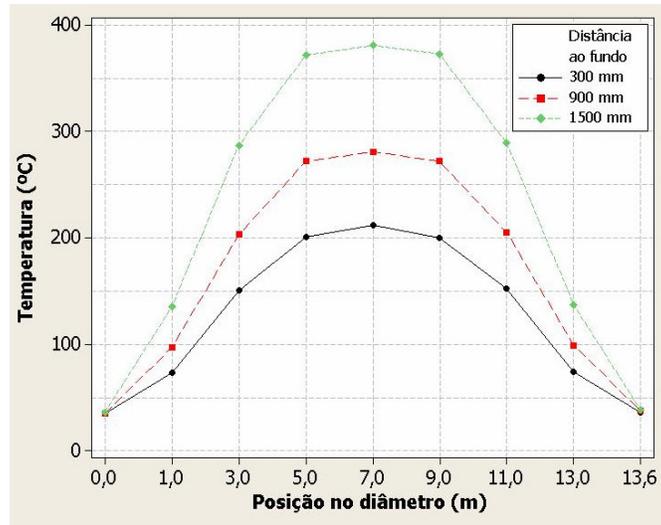
As figuras apresentadas a seguir ilustram os resultados das simulações realizadas utilizando programa ANSYS/FLOTRAN. A Figura 3, ilustra o perfil de temperatura na parede refratária do fundo do cadinho, para o posicionamento de termopares situados a 300 m, 900 m e 1.500m da superfície da base, para os casos I, II e III analisados, sem a presença do gusa líquido. O posicionamento exato da isoterma de 1.150°C na parede refratária, para estas simulações, pode ser confirmado pela Figura 4, nela observa-se a isoterma em toda a parede refratária e o posicionamento exato da isoterma de 1.150°C se dá entre as cores amarela e vermelha.

A Figura 5 ilustra o posicionamento em milímetros, da isoterma de 1.150°C até a face quente do metal, para os três pontos mostrados, observa-se que na simulação I a distância é maior no nó 1 (fundo do cadinho), chega a 320 mm da face intacta do refratário e para o nó 2 (no canto) as menores distâncias são observadas entre as três primeiras simulações, isto é, I, II e III.

Os resultados das simulações do caso IV e V são mostrados nas Figuras 6 e 7. A Figura 6 ilustra os perfis de velocidade no ferro gusa contido no cadinho, resultados das simulações IV e V, observa-se um comportamento semelhante no campo de velocidade embora a magnitude do vetor velocidade seja diferente para as duas simulações realizadas em relação ao posicionamento de um mesmo nó.

Na Figura 7, os perfis de temperatura no ferro gusa e na parede refratária do cadinho são ilustrados. Observa-se o que a isoterma de 1.150°C, na parede refratária, está mais próxima da face interna do refratário intacto, principalmente no canto esquerdo, o que pode ser confirmado para nó 2 da Figura 5, a curva está posicionada a 100 mm da superfície da parede intacta para o caso IV e a 92 mm para o caso V, e para o nó 3 esta distancia corresponde 393 mm e 289 mm respectivamente.

Uma comparação entre os resultados da simulação IV e os dados numéricos e medidos com os termopares, obtidos por Panjkovic e Truelove,⁽²⁾ para os posicionamentos de 300, 900 e 1500 mm da base do fundo da parede refratária é ilustrada na Figura 9. Pode-se observar uma boa concordância entre os perfis de temperaturas da simulação e os obtidos pelos termopares tanto para o posicionamento de 300 mm e 900 mm e uma concordância razoável para os resultados da simulação realizada com os dados da simulação,⁽²⁾ sendo que os resultados desta simulação estão bem mais próximos com os dados do termopares de 1.500 mm.



c)

Figura 3 – Perfil de temperatura (°C) no refratário do fundo do cadinho, a) caso I, b) caso II e caso III.

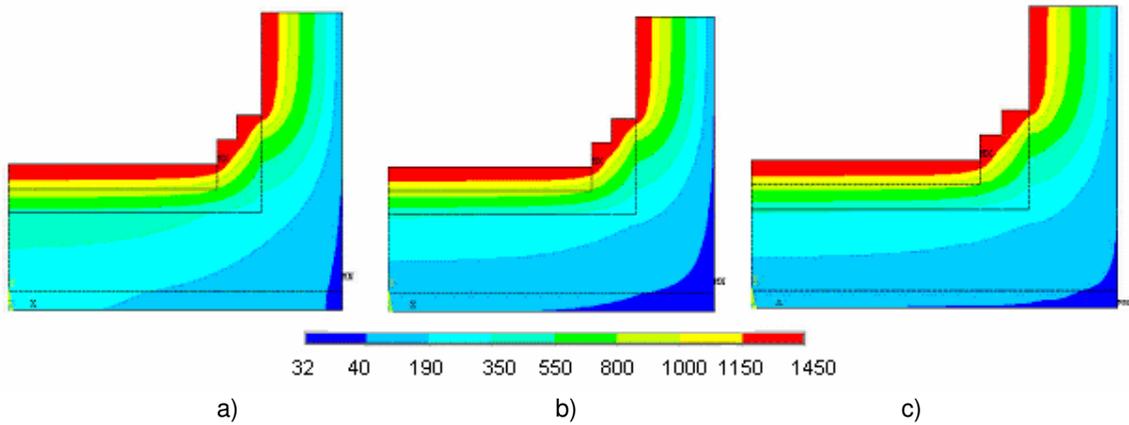


Figura 4. Perfil de Temperatura (°C) na parede refratária do cadinho, resultados das simulações do a) caso I, caso II e c) caso III.

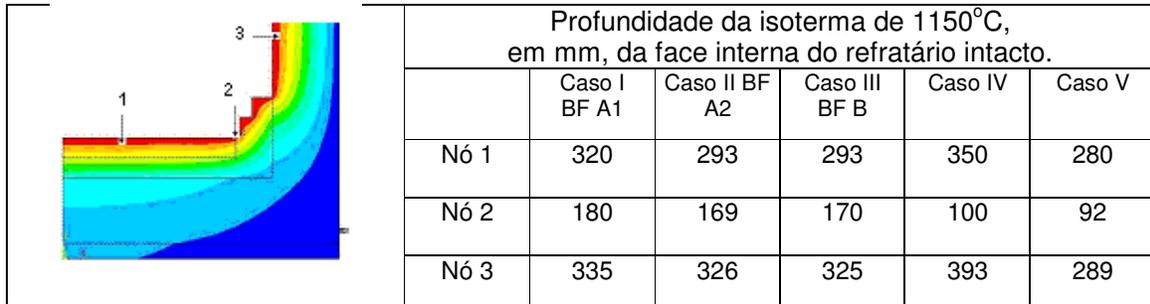


Figura 5. Posicionamento da isoterma de 1150 °C na parede refratária do cadinho.

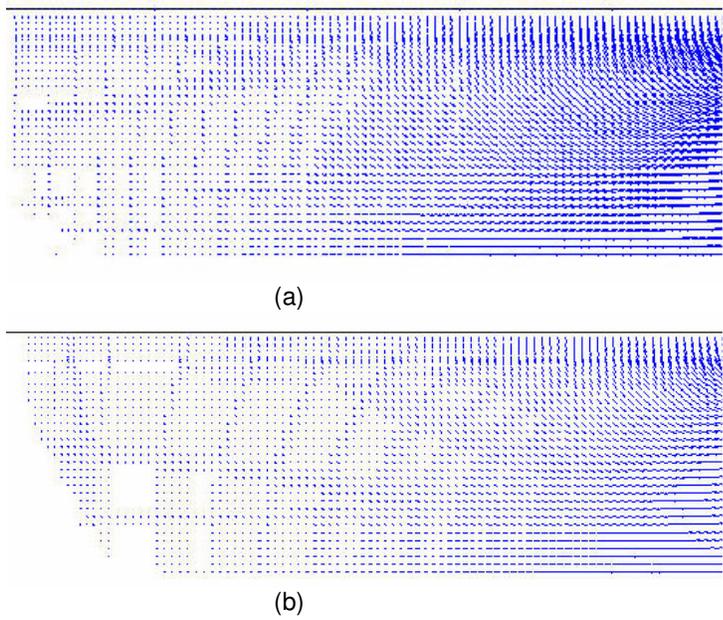


Figura 6. Campo de velocidade do gusa a) caso IV e b) caso V.

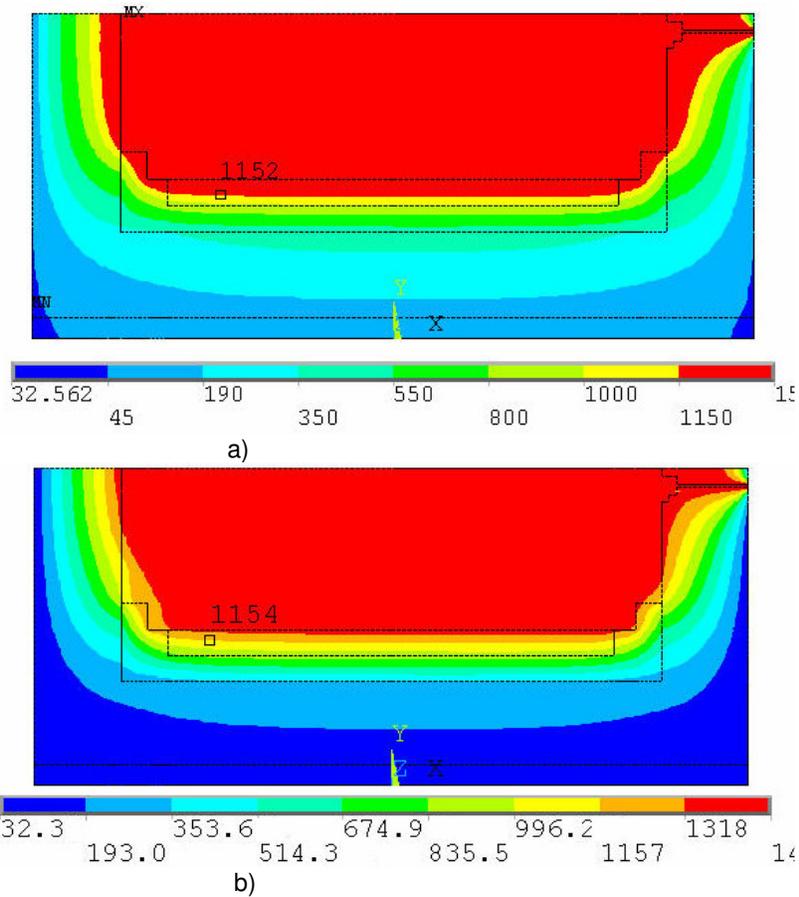


Figura 7. Perfil de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) no cadinho a) caso IV, b) caso V.

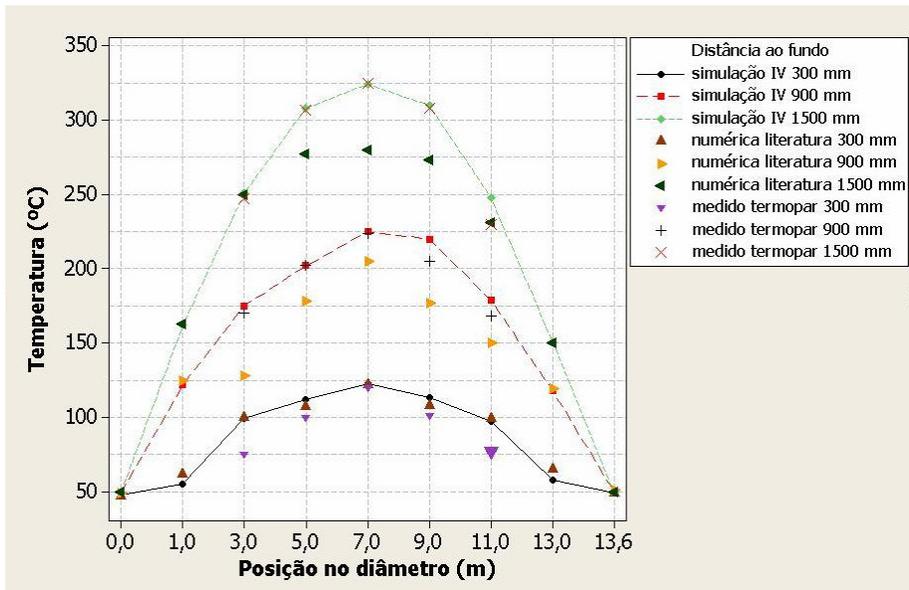


Figura 8 – Comparação dos Perfis de temperatura na parede refratária do cadinho, resultados da simulação IV e da literatura.⁽²⁾

5 CONCLUSÕES

Um modelo numérico é mostrado como uma ferramenta eficaz e precisa para estabelecer a posição da isoterma 1.150°C no cadinho de um alto-forno.

Embora não tenha considerado o efeito do posicionamento da camada de leito de coque no escoamento do ferro gusa, proposta a ser analisada em trabalhos futuros, os resultados obtidos das simulações do caso IV e caso V demonstra uma boa aproximação do material da literatura, o que permite o desenvolvimento de estratégias de minimização do desgaste dos refratários.

REFERÊNCIAS

- 1 KUMAR, S. *Heat Transfer Analysis and Estimation of Refractory Wear in an Iron Blast Furnace Hearth Using Finite Element Method*. ISIJ International, vol.45, no. 8, 2005, pp.1122-1128.
- 2 PANJKOVIC, V. e TRUELOVE, J. Computation Fluid Dynamics Modelling of Iron Flow and Heat Transfer in the Iron Blast Furnace Hearth, *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO, Melbourne, Australia, 6-8, December, 1999, pp. 399-404.
- 3 WRIGHT B., ZULLI P., BIERBRAUER F., PANJKOVIC V. Assessment of Refractory Condition in a Blast Furnace Hearth Using Computational Fluid Dynamics. Third Conference International in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12-December, 2003, pp. 645-650.
- 4 ANSYS User's manual, version 10.0, 2006, SAS Inc.
- 5 LAUNDER, B.E. and SPALDING, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, 1974, pp. 269-289.
- 6 YEH, J.L., HWANG, W.S., CHOU, C.L., "Physical modelling validation of computational fluid dynamics code for tundish design", *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 19, nº 6, 1992, pp. 501-504.
- 7 JOO, S., HAN, J.W. and GUTHRIE, R.I.L., Inclusion Behavior and Heat-Transfer Phenomena in Steelmaking Tundish Operations: Part II. Mathematical Model for Liquid Steel in Tundishes, *Metallurgical Transactions B*, vol. 24B, October, 1993, pp.767-778.