Asociación Argentina de Mecánica Computacional

Mecánica Computacional Vol XXIX, págs. 5627-5637 (artículo completo)
Eduardo Dvorkin, Marcela Goldschmit, Mario Storti (Eds.)
Buenos Aires, Argentina, 15-18 Noviembre 2010

ESTUDO EMPÍRICO DO DESGASTE NOS CADINHOS DOS ALTO-FORNOS DA ARCELOR MITTAL TUBARÃO

Luiz Claudio Silva Magnago[a], Lucia Catabriga[a] e Akira Yoshida[b]

[a]*Laboratório de Computação de Alto Desempenho - LCAD, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Departamento de Informática, Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras - 29075-910 - Vitória - ES - Brasil, http://www.lcad.inf.ufes.br - luizclaudiosm@lcad.inf.ufes.br, luciac@inf.ufes.br*

[b]*Arcelor Mittal Tubarão, Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 930 - Jardim Limoeiro - 29163-970 - Serra - ES - Brasil, http://www.arcelormittal.com/br/tubarao/ - akira.yoshida@arcelormittal.com.br*

Palavras Chave: Alto-Forno, Cadinho, Desgaste, Método dos elementos finitos.

Resumo. O cadinho é uma das regiões mais críticas na vida útil de um Alto-Forno, pois está sujeito a um desgaste contínuo devido ao contato constante com o ferro-gusa a elevadas temperaturas. A manutenção completa do cadinho só pode ser feita atualmente com o esvaziamento completo do Alto-Forno. Portanto, a campanha de um Alto-Forno é limitada principalmente pelo desgaste ocorrido no cadinho, sendo importante acompanhar a evolução dessa linha de desgaste a fim de estender a campanha ao máximo possível. A temperatura de solidificação do ferro-gusa nas paredes refratárias do cadinho é de $1150\,^{o}C$, sendo assim, a localização da linha de desgaste é dada pela isoterma nesse valor. Neste trabalho, a distribuição de temperatura no interior do cadinho é calculado utilizando o Método dos Elementos Finitos e uma aproximação linear é usada como investigação inicial para resolver o problema inverso, possibilitando a previsão da linha de desgaste a partir de um valor de temperatura conhecido no domínio. O problema é tratado em duas dimensões dada a simetria radial do cadinho. A não-linearidade no problema devido as constantes de condutividade térmica serem dependentes da temperatura é aproximada pelo Método Iterativo de Picard. Os experimentos numéricos utilizando as dimensões reais dos cadinhos dos Alto-Fornos 1, 2 e 3 da empresa Arcelor Mittal Tubarão demonstram que as estratégias adotadas representaram bem a linha de desgaste do cadinho.

1 INTRODUÇÃO

O processo de produção de ferro gusa, também conhecido como redução, é compreendido por alguns setores básicos como pátios de estocagem e manuseio de matérias-primas, processos de aglomeração de finos de minério (sinterização ou pelotização), coqueria (no caso do uso de carvão mineral) e fornos de obtenção de ferro primário (alto-forno, fornos de redução direta e fornos de fusão redutora). É no alto-forno onde são reunidos os produtos gerados pelos outros setores do processo de redução com o intuito de se obter o ferro gusa. O alto-forno é divido em cinco regiões que recebem os nomes de cadinho, rampa, ventre, cuba e topo (Rizzo, 2009), ver Fig. 1.

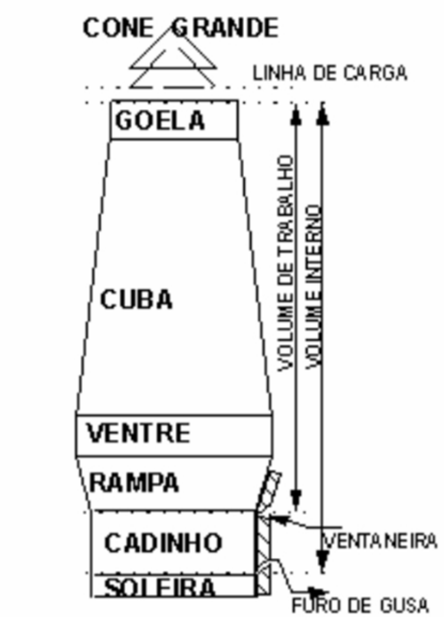


Figura 1: Divisões de um alto-forno.

O cadinho, que é a parte inferior do alto-forno, está sujeito a um desgaste contínuo devido ao contato constante com o ferro-gusa a elevadas temperaturas. A manutenção completa do cadinho só pode ser feita atualmente com o esvaziamento completo do alto-forno, procedimento denominado *blowout*. Portanto, a campanha de um alto-forno é limitada principalmente pelo desgaste ocorrido no cadinho, sendo importante acompanhar a evolução dessa linha de desgaste a fim de estender a campanha o máximo possível. Hoje, o cadinho é a região mais crítica na vida útil de um Alto-Forno (Gonzalez e Goldschmit, 2006). A temperatura de solidificação do ferro-gusa nas paredes refratárias do cadinho é de $1150\,^oC$, portanto, a localização da linha de desgaste é dada pela isoterma de $1150\,^oC$ (Torrkulla e Saxén, 2000).

Neste trabalho o perfil da distribuição de temperatura no cadinho é calculado utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) e uma aproximação linear (Vitorino e Bastos, 2007) é usada como investigação inicial para resolver o problema inverso, possibilitando a previsão da linha de desgaste a partir de valores de temperatura, medidos por termopares, conhecidos no domínio. As constantes de condutividade térmica dos blocos que compõem o cadinho variam com a temperatura, o que caracteriza o problema como não-linear. Neste trabalho a não-linearidade é aproximada utilizando o Método Iterativo de Picard.

Experimentos numéricos foram realizados utilizando domínios aproximados dos alto-fornos

1, 2 e 3 da Arcelor Mittal Tubarão. Esses experimentos incluem o cálculo da distribuição de temperatura para os três alto-fornos considerando as constantes de condutividade térmica invariantes com a temperatura. Para o alto-forno 3 foram realizados experimentos mais completos, considerando as constantes de condutividade térmica variando com a temperatura. No alto-forno 3 foram realizados também os experimentos de previsão de desgaste a partir de um valor de temperatura conhecido no domínio.

Recentemente, alguns autores trataram o desgaste ocorrido no cadinho utilizando o método dos elementos finitos considerando um domínio bidimensional, apresentando algumas particularidades. (Gonzalez e Goldschmit, 2006) tratou o problema inverso utilizando o método de Gauss-Newton iterativamente regularizado e utilizou funções de base radiais para representar a geometria do domínio do problema. (Zhao et al., 2007) compara os perfis de desgaste entre cadinhos construídos em bloco de carbono e em cerâmica. (Brännbacka e Saxén, 2008) focou em melhorias na formulação do problema visando um modelo genérico otimizado para obter soluções mais rápidas e também utilizou um método iterativo para resolver o problema inverso. (Zagaria et al., 2010), apresenta um modelo de previsão de desgaste chamado MUSA que utiliza um método regularizado para resolver o problema inverso.

Sai o parentes is

Trataram

Este trabalho está organizado como a seguir. Na Seção 2 é apresentada a formulação de elementos finitos utilizada para resolver o problema direto e na Seção 3, a metodologia utilizada para resolver o problema inverso. A Seção 4 descreve o tratamento da não-lineridade através do método iterativo de Picard e na Seção 5 são apresentados os experimentos realizados. Por fim, na Seção 6 são descritas as principais conclusões do trabalho.

2 FORMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS

O problema direto, que consiste no cálculo da distribuição de temperatura ao longo do cadinho a partir das condições de contorno, é calculado utilizando a formulação de Galerkin para o método dos elementos Finitos (Hughes, 1987). Como na direção angular do cadinho existem poucas irregularidades na geometria, nas propriedades dos materiais e nas condições de contorno, o problema pode ser representado em duas dimensões (Kumar, 2005). Além disso, o problema possui características de um problema de equilíbrio térmico, podendo portanto ser tratado como um problema estacionário. O problema de transferência de calor no interior do cadinho é regido pela equação de Poisson com a fonte geradora de calor igual a zero, pois não é gerado calor no interior do domínio considerado, Eq. (1). As condições de contorno do problema podem ser vistas nas Eqs.(2, 3 e 4).

$$
\begin{aligned}
-\nabla \cdot (k\nabla T) &= 0 &(1)\\
T &= T_{isoterma} &(2)\\
-k\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} &= 0 &(3)\\
-k\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} &= h(T - T_\infty) &(4)
\end{aligned}
$$

onde T_∞ é a temperatura do meio externo, h é a constante de troca de calor por convecção e k é a constante de condutividade térmica.

As condições de contorno apresentadas estão relacionadas com o domínio Ω representado na Fig. 2. O contorno 1 representa a condição de contorno de valor prescrito ou de Dirichlet (Eq. (2)), onde a temperatura $T_{isoterma}$ é o valor sugerido para essa região. Os contornos 2 e 5 representam a condição de contorno de fluxo prescrito ou de Neumann (Eq. (3)), que

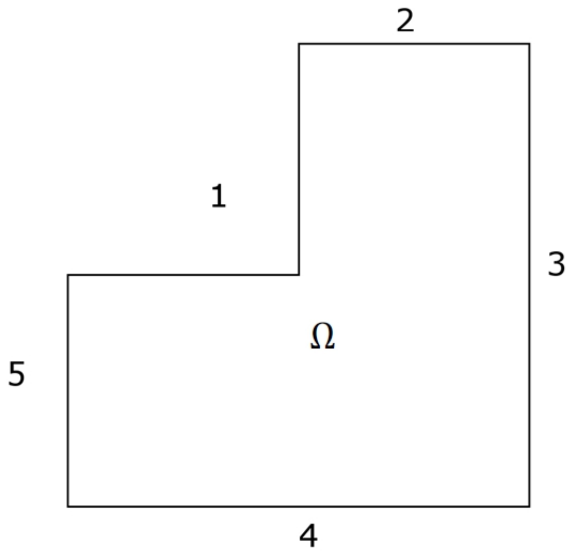


Figura 2: Domínio simplificado

acontece devido a continuidade do corpo nessas duas direções. Os contornos 3 e 4 representam a condição de contorno mista ou de Robin (Eq. (4)), que ocorre devido ao resfriamento externo existente nessas duas regiões.

Considerando uma discretização de Ω em subdomínios Ω^e, onde $e = 1, ..., n_{el}$, sendo n_{el} o número de elementos. Denota-se por Γ_e o contorno de Ω^e e $\Omega^e = \bar{\Omega}^e \cup \Gamma_e$, assumindo que $\cup_e \bar{\Omega}^e = \Omega$ e $\cap_e \Omega^e = \emptyset$. Feitas as devidas considerações e adotando um elemento triangular linear, obtém-se a partir da formulação de Galerkin o sistema linear visto na Eq. (5), que neste trabalho foi resolvido utilizando o método direto de eliminação de Gauss.

$$Ku = F \tag{5}$$

onde,

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega^e} k \nabla N_i \cdot \nabla N_j d\Omega - \int_{\Gamma_h^e} h N_i N_j d\Gamma \tag{6}$$

$$F_i^e = -\int_{\Gamma_h^e} h T_\infty N_i d\Gamma - \sum_{j=1}^{n_{bc}^e} (\int_{\Omega^e} k \nabla N_i \cdot \nabla N_j d\Omega) g_j \tag{7}$$

onde u é o vetor de temperaturas nodais, N é a função de interpolação escolhida para cada nó do elemento triangular linear, n_{bc}^e é o número de nós que apresentam condição de contorno de valor prescrito e g_j é valor prescrito para cada nó j.

3 PROBLEMA INVERSO

O problema inverso é resolvido utilizando uma aproximação linear assim como em (Vitorino e Bastos, 2007). Essa aproximação apresenta duas funcionalidades: (i) a primeira, calcula novos perfis de distribuição de temperatura ao longo do cadinho eliminando o custo computacional de resolver um sistema linear, (ii) a segunda, que é a mais interessante, possibilita resolver o problema inverso, passando a ter como dado de entrada um valor de temperatura conhecido (medido por um termopar instalado no cadinho) e calcular, a partir desse valor, a $T_{isoterma}$ que faz com que essa temperatura medida, ocorra nesse termopar.

A partir de duas isotermas ($T_{isoterma1}$ e $T_{isoterma2}$), consideramos uma aproximação linear gerada a partir das distribuições de temperatura calculadas pelo método dos elementos finitos. Sendo T_{n1} cada temperatura nodal do resultado relativo a $T_{isoterma1}$ e T_{n2} cada temperatura nodal do resultado relativo a $T_{isoterma2}$, a aproximação linear em cada ponto n da malha pode ser representada por:

$$\begin{aligned} T_{n1} &= T_{isoterma1} * A_n + B_n \\ T_{n2} &= T_{isoterma2} * A_n + B_n \end{aligned} \tag{8}$$

de forma que para cada nó n tem-se um valor de A_n e B_n diferentes. Após calculados os valores de A_n e B_n para cada nó, pode-se resolver o problema inverso utilizando a Eq. (9). A Fig. 3 mostra os passos principais do algoritmo implementado.

$$T_{isoterma} = \frac{(T_n - B_n)}{A_n} \tag{9}$$

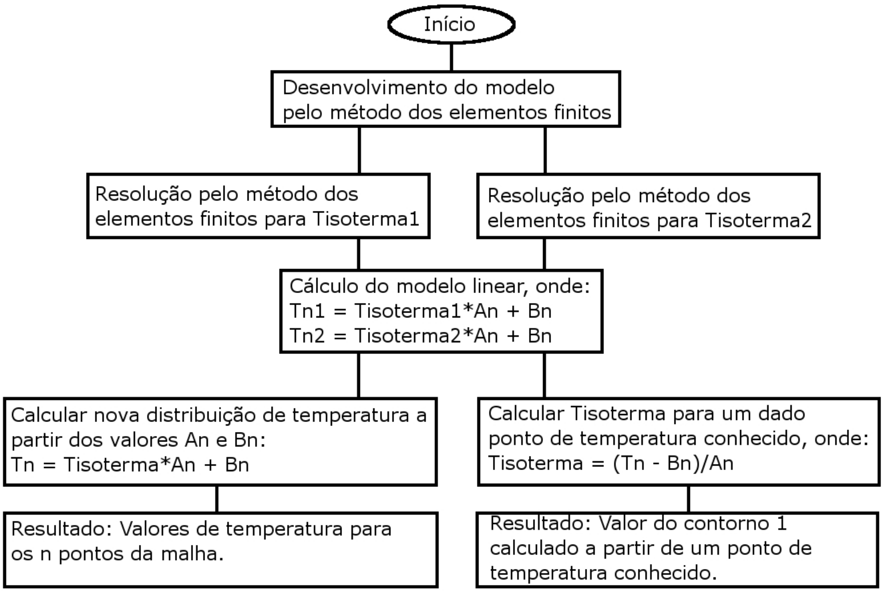


Figura 3: Principais passos do algoritmo para a aproximação linear.

4 MÉTODO ITERATIVO DE PICARD

As constantes de condutividade térmica dos blocos que compõem o cadinho variam de acordo com a temperatura, portanto a Eq. (1) pode ser reescrita por:

$$-\nabla \cdot (k(T)\nabla T) = 0 \tag{10}$$

Para tratar a não-linearidade escolhemos o método das iterações sucessivas, ou método iterativo de Picard (Kelley, 1995). A Eq.(11) considera um processo iterativo não-linear onde a condutividade térmica a ser utilizada na iteração $iter + 1$ é aquela obtida na iteração $iter$.

$$-\nabla \cdot (k(T^{iter})\nabla T^{iter+1}) = 0 \tag{11}$$

A condutividade térmica dos materiais que geralmente compõem um alto-forno possuem variação linear com relação a temperatura. Portanto, neste trabalho consideramos:

$$k_e(T_b^{iter}) = \alpha T_b^{iter} + \beta \quad (12)$$

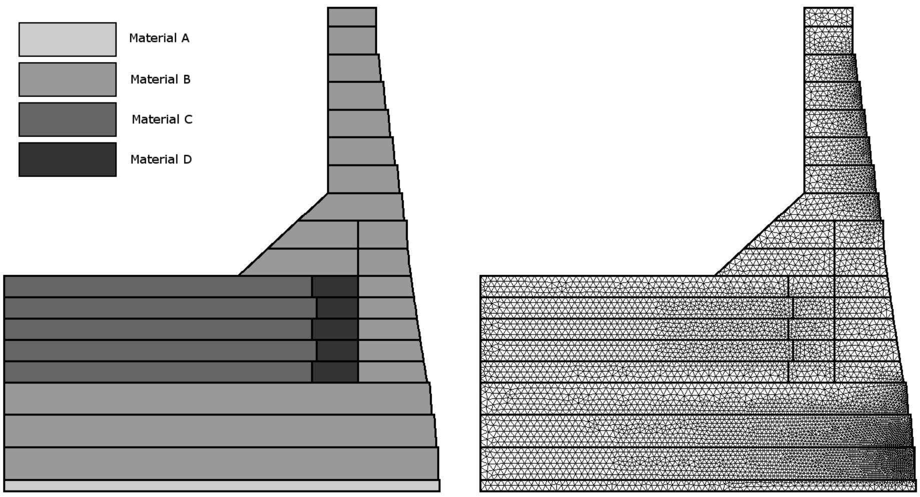
onde T_b^{iter} é a temperatura no baricentro do elemento e, obtida a partir das temperaturas nodais do elemento, k_e é a condutividade térmica com comportamento linear no elemento e, e α e β são constantes previamente calculadas a partir de dados obtidos da Arcelor Mittal Tubarão. Uma condição inicial T^0 é considerada utilizando condutividades térmicas iguais a média das variações para cada material. A condição de parada para o método iterativo de Picard adotada foi a norma euclidiana da diferença entre a solução atual e a solução anterior, sendo utilizada uma tolerância de 10^{-5}.

5 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

Foram realizados experimentos utilizando modelos aproximados dos alto-fornos 1, 2 e 3 da Arcelor Mittal Tubarão. A Seção 5.1 apresenta as distribuições de temperatura pelo método dos elementos finitos considerando $T_{isoterma} = 1350\,^oC$ para os 3 alto-fornos. A Seção 5.2 apresenta a previsão da linha de desgaste e o cálculo da distribuição de temperatura incluindo o tratamento da não-linearidade para o alto-forno 3, já que os dados fornecidos pela Arcelor Mittal Tubarão incluem medições de termopares e constantes de condutividade térmica somente para esse alto-forno. Todas as malhas utilizadas foram geradas com o Easymesh e visualizadas com o Showmesh [1].

5.1 Distribuição de Temperatura nos alto-fornos 1, 2 e 3

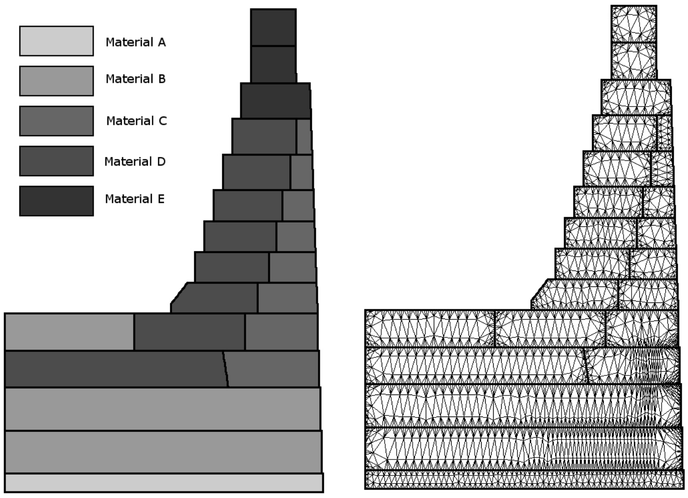
As Figs. 4, 5 e 6 mostram, respectivamente, a descrição do domínio e as malhas consideradas para os alto-fornos 1, 2 e 3. Na descrição dos domínios podemos observar que os alto-fornos são constituídos por blocos de diferentes materiais representados nos esquemas por Material A, Material B, Material C, Material D, Material E.



(a) Descrição do domínio. (b) Malha: 11205 elementos e 5791 nós.

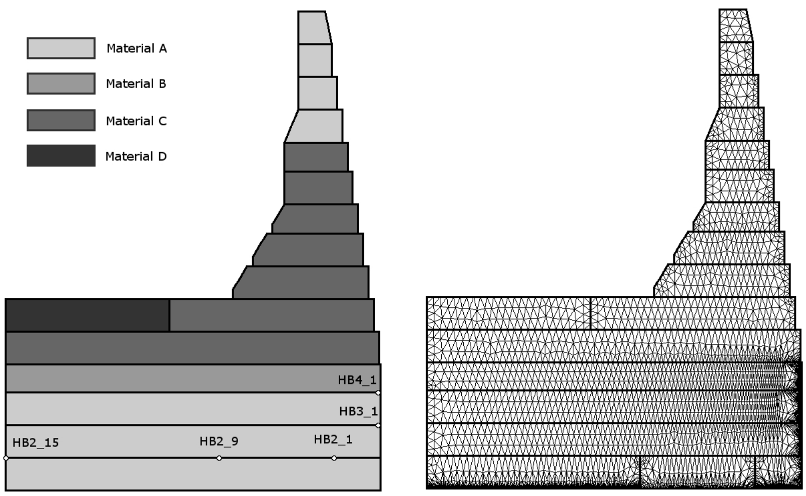
Figura 4: Malha e materiais do alto-forno 1

[1]Disponível em:http://www-dinma.univ.trieste.it/nirftc/research/easymesh/



(a) Descrição do domínio. (b) Malha: 4592 elementos e 2615 nós.

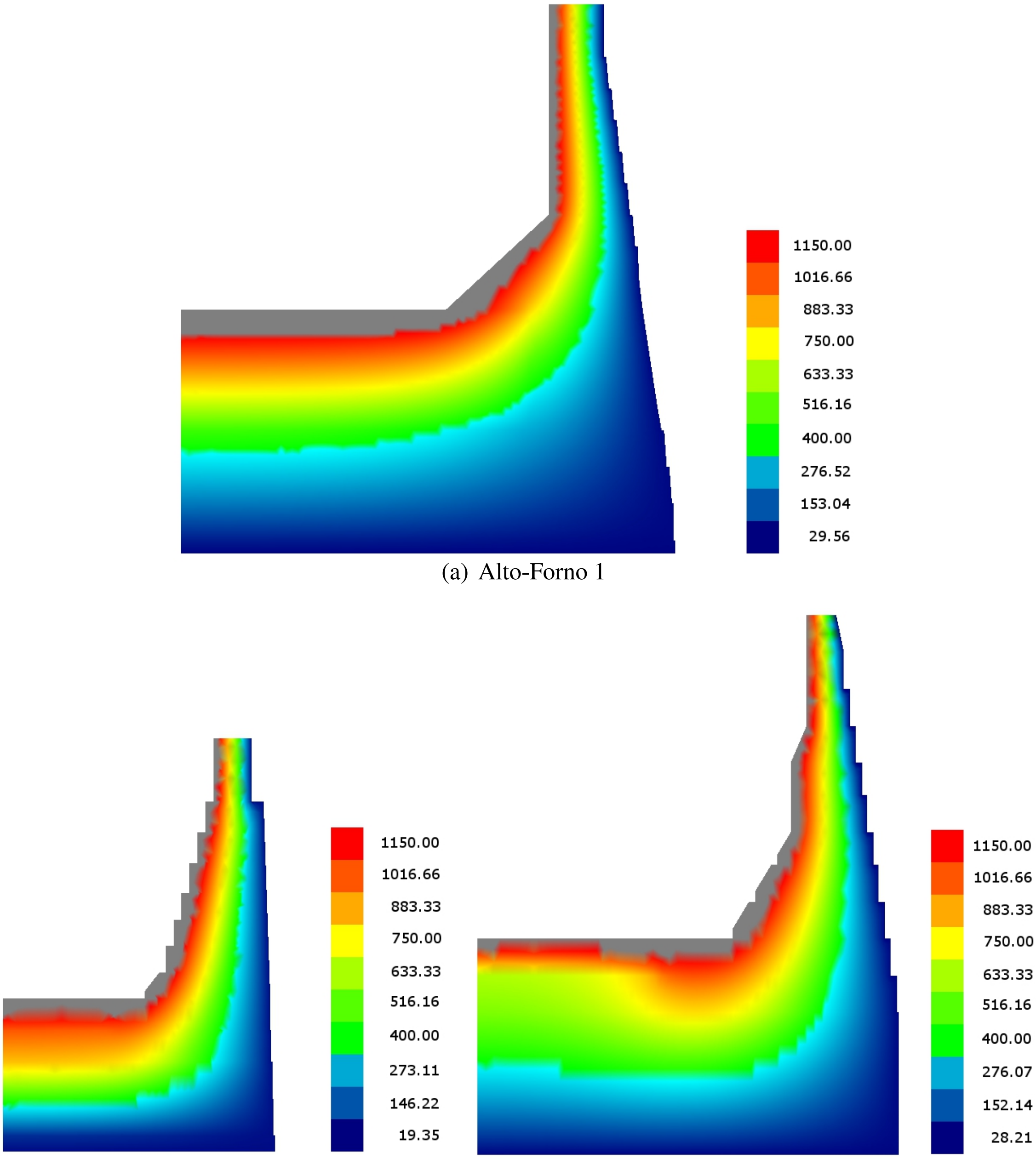
Figura 5: Malha e materiais do alto-forno 2



(a) Descrição do domínio. (b) Malha: 7634 elementos e 4231 nós.

Figura 6: Malha e materiais do alto-forno 3

Nas Figs. 7(a), 7(b) e 7(c) podemos observar as distribuições de temperatura calculadas para os alto-fornos 1, 2 e 3, respectivamente, assumindo $T_{isoterma} = 1350\,^oC$. A parte pintada em cor cinza, representa temperaturas superiores a $1150\,^oC$, indicando o local onde ocorreu desgaste. Os valores das condutividades térmicas para os 3 alto-fornos foram considerados invariantes com a temperatura. Os valores para os experimentos realizados nos alto-fornos 1 e 2 foram empiricamente considerados, pois esses dados exatos não foram disponibilizados.



(a) Alto-Forno 1

(b) Alto-Forno 2 (c) Alto-Forno 3

Figura 7: Distribuição de temperatura para isoterma de $1350\,^oC$

5.2 Previsão da linha de desgaste - Alto-Forno 3

Nesta seção, os cálculos da distribuição de temperatura consideram a não-linearidade existente devido a variação das constantes de condutividade térmica com a temperatura, descrita na Seção 4. A Tab. 1 apresenta um conjunto de dados relativos ao alto-forno 3. A primeira coluna relaciona os termopares que podem ser observados na Fig. 6(a). As temperaturas T_n são dados lidos através desses termopares. Esta tabela mostra valores calculados para $T_{isoterma}$ (contorno 1 da Fig. 2) a partir da aproximação do problema inverso apresentada na Seção 3.

Tabela 1: Previsão de $T_{isoterma}$.

	Data: 11/10/2007		Data: 12/10/2007		Data: 26/10/2007	
Termopar	$T_n(^oC)$	$T_{isoterma}(^oC)$	$T_n(^oC)$	$T_{isoterma}(^oC)$	$T_n(^oC)$	$T_{isoterma}(^oC)$
HB2_1	67	649.10	68	665.91	63	581.83
HB2_9	137	763.13	138	769.35	118	644.97
HB2_15	181	1128.21	179	1114.80	158	974.07
HB3_1	44	1164.11	45	1412.08	44	1164.11
HB4_1	49	1203.26	51	1439.82	48	1084.97

Os valores previstos estão condizentes, visto que o *startup* do alto-forno 3 foi dado em 20/07/2007, portanto o desgaste esperado para as datas calculadas era mínimo. Na Fig. 8 podemos observar o desgaste calculado a partir da temperatura $T_n = 44\,^oC$ medido no termopar HB3_1, que resultou num valor de $T_{isoterma} = 1164.11\,^oC$. Podemos observar que a localização dos termopares influenciam bastante no valor calculado para a $T_{isoterma}$. Por exemplo, o termopar **HB3_1** é muito mais sensível a variação de temperatura que o termopar **HB2_1**.

A Fig. 9 compara o perfil de temperatura obtido considerando as condutividades térmicas

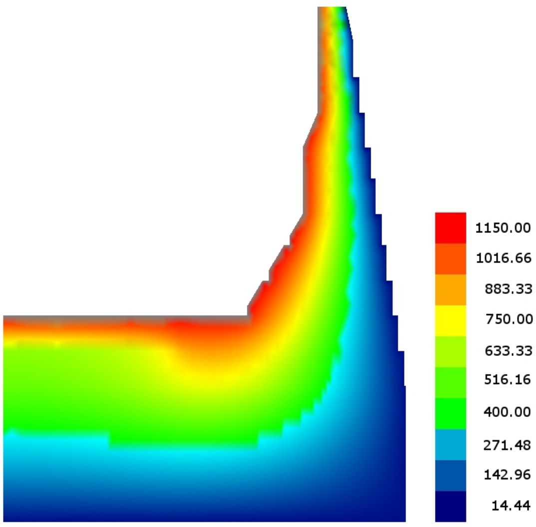
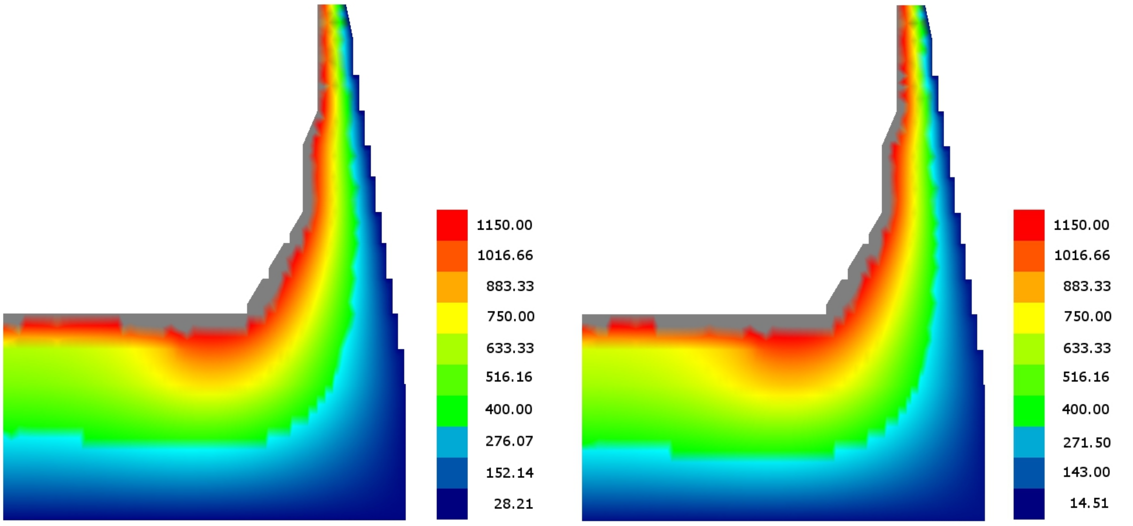


Figura 8: Desgaste previsto para $T_{isoterma} = 1164.11\,^oC$.

constantes com relação a temperatura (Seção 5.1) com o perfil de temperatura considerando o método iterativo de Picard. Observamos que a não-linearidade modifica o perfil de distribuição de temperatura assim como a linha de desgaste.



(a) Constantes de condutividade invariantes com a temperatura.

(b) Constantes de condutividade dependentes da temperatura.

Figura 9: Comparação entre resultados para $T_{isoterma} = 1350\,^oC$.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas soluções do problema direto e do problema inverso de transferência de calor no cadinho de um alto-forno. Foi utilizado o método dos elementos finitos para resolver o problema direto, que possibilita o cálculo da distribuição de temperatura no domínio do cadinho. Para a resolução do problema inverso, foi utilizada uma aproximação linear, a partir da qual é possível calcular o valor de $T_{isoterma}$ e portanto, prever o desgaste ocorrido no cadinho. A não-linearidade do problema, devido a variação das constantes de condutividade térmicas com a temperatura, foi tratada pelo método iterativo de Picard.

Os experimentos de distribuição de temperatura nos alto-fornos 1, 2 e 3 demonstram sucesso na solução do problema direto pelo método dos elementos finitos. O Método Iterativo de Picard mostrou ser uma interessante forma de tratar a não-linearidade do problema, sendo visíveis as alterações no perfil de desgaste e de distribuição de temperatura quando comparado com a solução que não considera a variação das constantes de condutividade térmica com a temperatura.

Como não é possível fazer medições reais do desgaste que ocorre no cadinho, é difícil fazer uma boa avaliação do método de previsão de desgaste. Porém, os experimentos mostraram que o desgaste calculado foi compatível com o esperado, já que o alto-forno 3 havia iniciado sua campanha a pouco tempo e o desgaste calculado foi muito pequeno.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Arcelor Mittal Tubarão pelos dados fornecidos e ao CNPq pelo apoio recebido dentro do escopo dos Projetos CNPq 620185/2008-2 e 309172/2009-8.

REFERÊNCIAS

Brännbacka J. e Saxén H. Model for fast computation of blast furnace hearth erosion and buildup profiles. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(20):7793–7801, 2008.

Gonzalez M. e Goldschmit M.B. Inverse geometry heat transfer problem based on a radial basis functions geometry representation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 65(8):1243–1268, 2006.

Hughes T.J.R. *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.

Kelley C.T. *Iterative Methods for Linear and Nonlinear Equations*. SIAM, Philadelphia, 1995.

Kumar S. Heat transfer analysis and estimation of refractory wear in an iron blast furnace hearth using finite element method. *ISIJ International*, 45(8):2223–2241, 2005.

Rizzo E.M.S. *Introdução ao Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno. Série: Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos. Área: Redução*. ABM: Associação Brasileira De Metalurgia e Materiais, 2009.

Torrkulla J. e Saxén H. Model of the state of the blast furnace hearth. *ISIJ International*, 40(5):438–447, 2000.

Vitorino T.A.S. e Bastos H.G.L. Sistema de visualização gráfica tridimensional de avaliação do desgaste do refratário de cadinho do alto-forno. In *XI Seminário de Automação de Processos, ABM*, páginas 471–483. 2007.

Zagaria M., Dimastromatteo V., e Colla V. Monitoring erosion and skull profile in blast furnace hearth. *Ironmaking and Steelmaking*, 37(3):229–234, 2010.

Zhao H., Cheng S., e Zhao M. Analysis of all-carbon brick bottom and ceramic cup synthetic hearth bottom. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 14(2):6 – 12, 2007.