

SISTEMA DE VISUALIZAÇÃO GRÁFICA TRIDIMENSIONAL DE AVALIAÇÃO DO DESGASTE DO REFRAATÁRIO DE CADINHO DO ALTO-FORNO¹

Thiago Arreguy Silva Vitorino²
Henrique Guilherme Lucas Bastos³

Resumo

A integridade do refratário do cadinho de alto-forno é primordial para a continuidade de sua campanha, ou seja, sem interrupções de longo prazo, como por exemplo, a troca de refratário do cadinho. Neste trabalho, relata-se o desenvolvimento e a implementação de um software de visualização gráfica tridimensional baseado em um modelo computacional de elementos finitos. Software este, que avalie e monitore o desgaste do refratário do cadinho e possibilite tomada de decisão a respeito da programação da reforma do mesmo, de forma a evitar a interrupção prematura da sua campanha ou estendê-la até um limite seguro de sua operação. Utilizou-se de técnicas de elementos finitos para construir um modelo computacional que representa o modelo matemático de transferência de calor do cadinho, que por sua vez é baseado na avaliação da isoterma de 1150°C, que é a temperatura de solidificação do ferro gusa. Para a implementação do sistema utilizou-se o software Borland C++ Builder 6.0 como plataforma de desenvolvimento e, para os desenhos tridimensionais, fez-se uso da biblioteca gráfica OpenGL. O grande diferencial deste projeto é a visualização gráfica tridimensional on-line da avaliação do desgaste do refratário do cadinho, assim como consultas de dados históricos.

Palavras-chave: Desgaste do cadinho; Transferência de calor; Modelo computacional; Método de elementos finitos.

SYSTEM OF TRIDIMENSIONAL GRAPHICAL VISUALIZATION OF ASSESSMENT OF EROSION OF THE BLAST FURNACE HEARTH REFRACTORY

Abstract

The integrity of blast furnace hearth refractory is primordial for the continuity of its campaign, it means, without long time interruptions, for example, the changing of the refractory. In this work, the development and the implementation of software with three-dimensional graphic visualization it's reported. That software based on a computational model of finite elements evaluates and monitors the erosion of the refractory. Also, it makes possible taking decision as to the planning of its own reform, in order to avoid the premature interruption of its life campaign or spread it out up to a safe limit in its operation. Techniques of finite elements were used to make a computational model that represents the mathematical model of heat transfer from the hearth refractory. In its turn, the model is based on evaluating the 1150°C isotherm, which is the temperature of solidification for the pig iron. For the implementation of the system, the software Borland C++ Builder 6.0 was used as platform of development and, as the three-dimensional drawer, the graphic library OpenGL was. The three-dimensional graphic visualization on-line of the evaluation of the hearth refractory erosion, as well consults of historical data, is a great differential of this project.

Key words: Hearth erosion; Heat transfer; Computer model; Finite element method.

¹ *Contribuição técnica ao XI Seminário de Automação de Processos, 3 a 5 de outubro, Porto Alegre-RS*

² *Analista de Sistemas Industriais - Gerdau Açominas – Área de Sistemas Industriais.*

³ *Engenheiro de Processo de Produção – Gerdau Açominas – Gerencia de Alto-Forno.*

1 INTRODUÇÃO

A integridade do refratário do cadinho de alto-forno é primordial para a continuidade de sua campanha, ou seja, sem interrupções de longo prazo. Vários mecanismos que causam desgaste do refratário do cadinho são identificados em Laar,⁽¹⁾ por exemplo, ataque termomecânico pela penetração de ferro-gusa nos poros do tijolo refratário.

Adotou-se um modelo de desgaste do cadinho, que tem como objetivo identificar o perfil de erosão baseado na posição da isoterma de solidificação do ferro-gusa (temperatura de 1.150°C), obtido a partir da transferência de calor nos refratários do cadinho, utilizado por Parreira.⁽²⁾ A isoterma de 1.150°C representa um limite potencial da penetração do ferro-gusa dentro da parede do cadinho pela porosidade dos refratários. Este modelo supõe uma boa resistência do refratário, ou seja, materiais de pouca porosidade e boa resistência à penetração do ferro-gusa, e considera que as propriedades do refratário não são significativamente modificadas. Desta forma o modelo a ser desenvolvido permite não somente ter a informação da posição atual da isoterma 1.150°C, mas também saber a situação histórica do desgaste do cadinho, identificando assim qual período de maior desgaste do mesmo.

Assim para permitir a monitoração do desgaste do refratário do cadinho, e desta forma evitar a interrupção prematura da sua campanha ou estendê-la até um limite seguro de sua operação, propõe-se, neste trabalho, o desenvolvimento e a implementação de um software de visualização gráfica tridimensional (3D), baseado em um modelo computacional bidimensional (2D) de elementos finitos. Software este que realize a avaliação do desgaste do refratário do cadinho a partir do modelo de desgaste proposto acima, e possibilite tomada de decisões, como por exemplo, a programação da reforma do refratário do cadinho.

1.1 Modelo Matemático

O modelo matemático 2D, a ser utilizado para resolver o problema de desgaste do refratário do cadinho, é baseado na equação diferencial parcial de transferência de calor de uma secção do cadinho, Radmoser⁽³⁾ - veja a Equação 1, onde r e z são os eixos de referencia (raio e altura, respectivamente), T é a variável, temperatura neste caso, e k é a condutividade térmica para pontos pertencentes ao domínio Ω , ilustrado na Figura 1, que no caso se refere ao material refratário. Este modelo assume estado estacionário, ou seja, não há variação no tempo da grandeza T , e simetria rotacional, ou seja, o sólido 3D, que é o cadinho, é gerado por uma revolução completa do domínio Ω em torno do eixo z .

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{Equação 1}$$

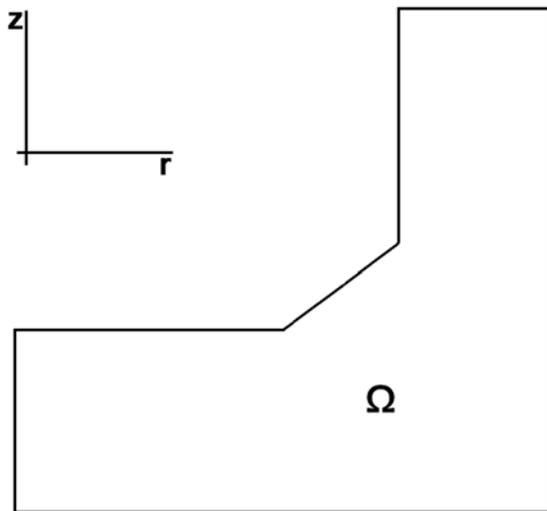


Figura 1. Domínio do problema.

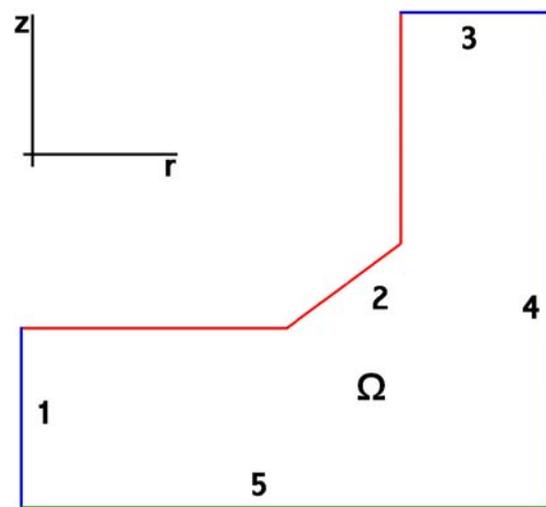


Figura 2. Domínio e condição de contorno para o problema inverso.

A solução deste modelo pode ser obtida, atacando o problema de duas formas distintas, direta e inversa. Na primeira, calcula-se a distribuição de temperatura do domínio do problema a partir das condições de contorno impostas. Na segunda, o cálculo é realizado assim como na primeira, só que diversas vezes, pois dispositivos de medida de temperatura irregularmente distribuídos sobre a base e parede do cadinho são utilizados para minimizar o erro correspondente à diferença entre o valor de temperatura calculado e o valor medido, enquanto a temperatura da condição de contorno $T_{isoterma}$ é variada. A Figura 2 ilustra o domínio do problema e as condições de contorno para o problema inverso, cujo detalhamento segue abaixo:

- i. No contorno **1**, considera-se que não há trocas de calor, pelo fato do mesmo surgir da simetria do problema, ou seja, a variação de T em relação à r é nula (Equação 2);
- ii. No contorno **2**, a temperatura é imposta, portanto conhecida (Equação 3);
- iii. No contorno **3**, considera-se que não há trocas de calor, pois a superfície é totalmente isolada, ou seja, a variação de T em relação à z é nula (Equação 4);
- iv. No contorno **4**, considera-se que há trocas de calor por convecção (Equação 5) na qual h é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o contorno 4 e o meio externo, que se encontra a uma temperatura T_{∞} ;
- v. No contorno **5**, considera-se que há trocas de calor por convecção, Equação 6, na qual h é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o contorno 4 e o meio externo, que se encontra a uma temperatura T_{∞} ;

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{Equação 2}$$

$$T = T_{isoterma} \quad \text{Equação 3}$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{Equação 4}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_{\infty}) \quad \text{Equação 5}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_{\infty}) \quad \text{Equação 6}$$

1.2 Modelo Computacional

Métodos numéricos como Métodos de Elementos Finitos (FEM), Método de Volumes Finitos (FVM) e o Método dos Elementos Contorno (BEM), são utilizados para modelar diferentes fenômenos tais como deformação mecânica, transferência de calor, vazão de fluidos, propagação de ondas eletromagnéticas, e mecânica quântica. Estes métodos aproximam numericamente a solução de uma Equação Diferencial Parcial (PDE) linear ou não-linear, substituindo um sistema contínuo por um número finito de equações algébricas, lineares ou não-lineares, acopladas. Este problema de discretização associa cada variável a um dos pontos no domínio do problema. Por exemplo, para simular a condução do calor através de um componente elétrico, a temperatura é determinada em um número de pontos, chamados nós, na superfície e no interior do componente.

Liu⁽⁴⁾ utiliza técnicas de FVM para resolver o problema de desgaste do cadinho, descrito anteriormente, e assim implementar um sistema de monitoramento do desgaste do refratário do cadinho. Neste trabalho pretende-se construir um sistema de monitoramento similar, mas utilizando a técnica de FEM.

Na técnica FEM, o domínio do problema deve ser particionado em pedaços pequenos de forma simples, normalmente triângulos ou quadriláteros (em 2D), ou tetraedros (em 3D), que são chamados elementos. Um nó é atribuído para cada vértice do elemento e cada nó é tipicamente comum a vários outros elementos. Uma coleção de elementos é chamada de malha de elementos finitos.

Uma das principais dificuldades no uso de FEM está na geração de malhas. O refinamento de Delaunay é uma técnica de geração de malha, baseada na Triangulação de Delaunay, Shewchuk.⁽⁵⁾ Malhas de elementos finitos de duas e três dimensões são ilustradas na Figura 3. Se os elementos têm forma simples é fácil aproximar o comportamento de uma PDE, tal como a equação de calor, em cada elemento. Por acumulação destes efeitos em todos os elementos, chega-se a um sistema de equações cuja solução aproxima um conjunto de grandezas físicas como a temperatura em cada nó.

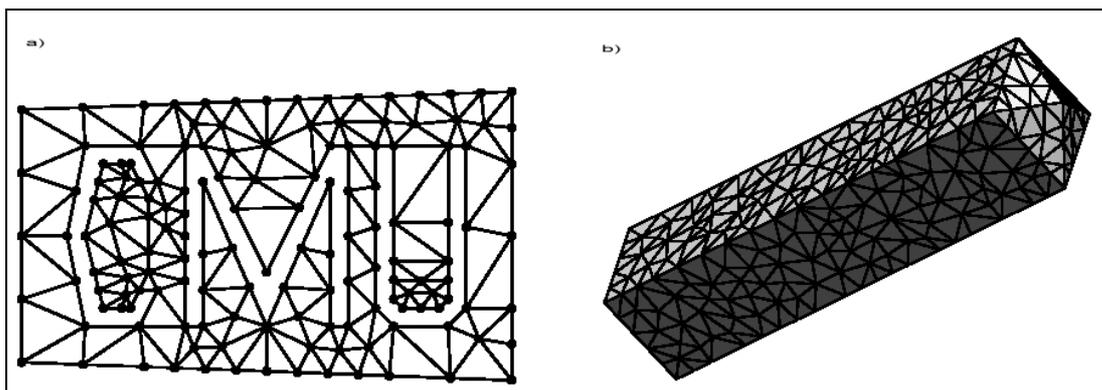


Figura 3. Malha de elementos finitos, bidimensional e tridimensional. Fonte: Shewchuk.

Em duas dimensões, a triangulação de um conjunto V de vértices é um conjunto C de triângulos cujos vértices coletivamente estão em V , cujo interior não tem interseção um com o outro, e cuja união é a casca convexa de V . A vantagem advinda do uso desta técnica, é que ela maximiza o ângulo mínimo em relação a todas as outras triangulações possíveis deste mesmo conjunto de vértices. Elementos com ângulos pequenos ou grandes podem degradar a qualidade da solução numérica, pois o erro derivado da solução aparece como produto da interpolação em malhas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A solução do modelo de avaliação do desgaste para uma secção do cadinho será obtida através do método numérico FEM, atacando o problema pela forma indireta, como mostrado em Radmoser.⁽³⁾ O fluxograma da Figura 4 ilustra, de forma simples, as etapas envolvidas para resolver o problema pela forma indireta, cujo detalhamento, segue abaixo:

- (1) Para o desenvolvimento do modelo de FEM são necessárias informações da geometria do cadinho, para se poder gerar a malha de elementos finitos da condutividade térmica de todos os materiais que formam o refratário e das informações sobre as condições de contorno;
- (2) Obtenção dos valores de temperaturas dos nós que possuem medida de temperatura;
- (3) Atribui-se $T_{isoterma} = 1.150^{\circ}\text{C}$ para todos os pontos pertencentes ao contorno 2 da Figura 2;
- (4) Resolve-se o sistema de equações do modelo FEM, obtido no passo 1, para se obter o valor de temperatura para os n nós do domínio. Esta etapa é a que requer maior custo computacional, pois necessita-se resolver um sistema de equações de ordem $n \times n$;
- (5) Verifica-se para cada nó que possui medida de temperatura, se o erro da solução obtida pelo modelo que corresponde à diferença entre a temperatura calculada pelo modelo e a temperatura medida pelo termopar (obtida no passo 2), está dentro de um limite aceitável;
- (6) Ajusta-se o valor de $T_{isoterma}$ para todos os pontos pertencente ao contorno 2 da Figura 2, se o erro não é aceitável. O ajuste de $T_{isoterma}$ pode ser feito utilizando-se o método do gradiente descendente, Luenberger;⁽⁶⁾ e
- (7) Gera-se a visualização do perfil de distribuição de temperatura do cadinho e do desgaste (se houver), se o erro é aceitável, segundo uma legenda de cores previamente definida.

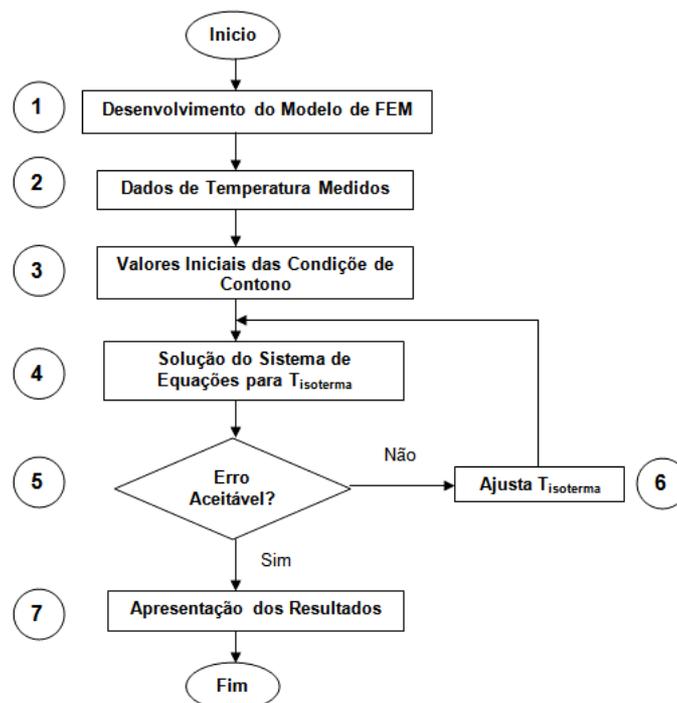


Figura 4. Fluxograma com as etapas da avaliação do desgaste.

A metodologia representada pelo fluxograma da Figura 4 considera que a condutibilidade térmica k e o coeficiente de transferência de calor por convecção h são não-lineares, ou seja, variam com a temperatura. Mas segundo Bejan,⁽⁷⁾ a condutividade térmica k dos tijolos refratários variam muito pouco com a temperatura, podendo ser considerado constante para simplificar os cálculos. O valor de h , é exclusivamente dependente da forma como é feita a troca de calor por convecção (externa, interna, forçada, natural ...), desta forma pode-se calibrar um valor de h constante, que seja condizente a realidade do processo.

Considerando então que k e h são constantes, a Equação 1 se reduz a Equação 7 e o fluxograma da Figura 4 se reduz ao fluxograma da Figura 5, cujo detalhamento segue abaixo.

$$\frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Equação 7}$$

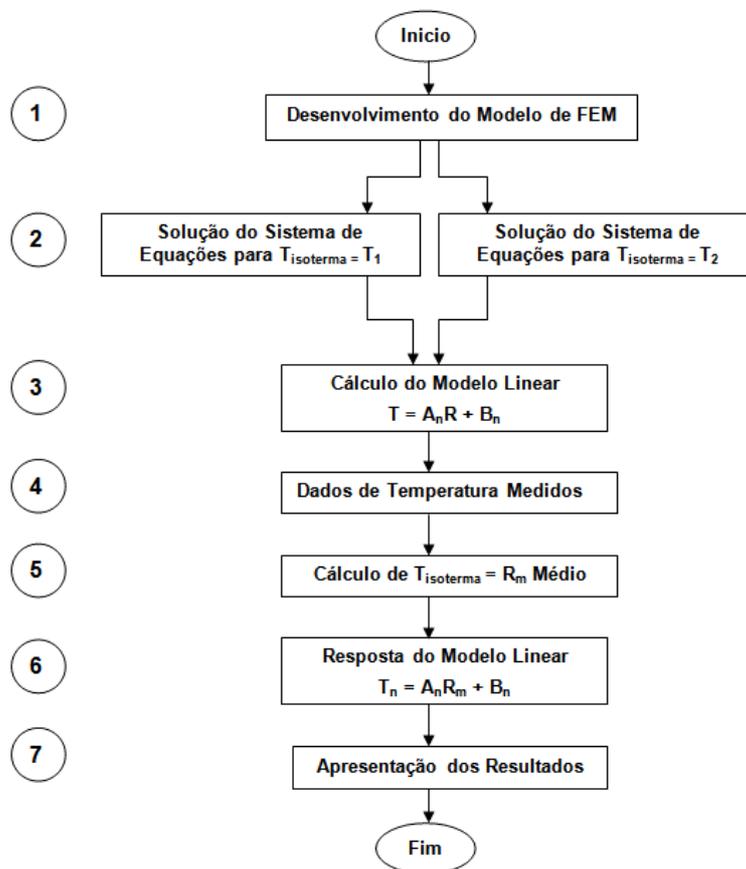


Figura 5. Fluxograma com as etapas da avaliação do desgaste.

- (1) Para o desenvolvimento do modelo FEM são necessárias informações da geometria do cadinho, para se poder gerar a malha de elementos finitos da condutividade térmica de todos os materiais que formam o refratário das informações sobre as condições de contorno;
Resolve-se o sistema de equações do modelo FEM, obtido no passo 1, duas vezes, para se obter o valor de temperatura para os n nós do domínio, uma para $T_{isoterma} = R_1$ e outra para $T_{isoterma} = R_2$. Esta etapa é a que requer maior custo computacional, pois precisa resolver um sistema de equações de ordem nxn ;

- (2) Com os dados de temperatura de todos os n nós do domínio, para $T_{\text{isoterma}} = R_1$ e para $T_{\text{isoterma}} = R_2$, aproxima-se o valor de temperatura para cada um dos n nós, pela reta da Equação 3, ou seja, o modelo de FEM é substituído por um modelo linear, na qual T_n é a temperatura do enésimo ponto que se deseja obter, R é a temperatura de referência T_{isoterma} da condição de contorno 2, A_n e B_n são os coeficientes de primeira e zero ordem, respectivamente, para este ponto;

$$T_n = A_n R + B_n \quad \text{Equação 8}$$

- (3) Obtenção dos valores de temperaturas dos nós que possuem medida de temperatura;
- (4) Para os pontos que possuem medida de temperatura, calcula-se a função inversa da Equação 3, ou seja, obtém-se para cada ponto o valor R , dado o valor de T_n . Desta forma um R_m médio é calculado
- (5) Atribui-se $T_{\text{isoterma}} = R_m$ para todos os pontos pertencentes ao contorno 2 da Figura 2, e através da Equação 3, calcula-se o valor da temperatura T_n para os n pontos do domínio Ω ;
- (6) Gera-se a visualização do perfil de distribuição de temperatura do cadinho e do desgaste (se houver), segundo uma legenda de cores previamente definida;

Os passos do fluxograma da Figura 5 referem-se ao cálculo da distribuição de temperatura do domínio do problema, para uma seção do cadinho em 2D, ou seja, para um ângulo θ específico. A proposta deste trabalho é desenvolver um sistema de visualização gráfica 3D. Para tanto será necessário seguir os passos do fluxograma da Figura 5 para vários ângulos diferentes, de acordo com um $\Delta\theta$ (incremento angular) escolhido.

É importante ressaltar que as simplificações consideradas para transformar a metodologia do fluxograma da Figura 4 para a metodologia encontrada no fluxograma da Figura 5, em termos de custo computacional, possui uma diferença bastante significativa. Na primeira metodologia, tem-se um laço iterativo envolvendo os passos 4, 5 e 6, que depende do erro calculado (método do gradiente descendente, por exemplo). Observe-se que a cada iteração será necessário resolver o sistema de equações $n \times n$ do modelo de FEM, onde n é o número de nós do domínio. Já na segunda metodologia, é necessário resolver o sistema de equações apenas duas vezes (passo 2) para obter os dados que serão utilizados para o cálculo da reta que irá modelar uma reta para cada ponto do domínio em função de T_{isoterma} , passo 3.

3 RESULTADOS

A partir dos dados da geometria do cadinho, definiu-se uma resolução alta para gerar a malha a ser utilizada na pela técnica de FEM (passo 1 do fluxograma da Figura 5). É importante ressaltar que a resolução da malha está diretamente ligada ao número de nós e conseqüentemente ao tamanho dos elementos utilizados, e influencia diretamente no custo computacional envolvido e na precisão da resposta obtida. A malha para o domínio do problema (Figura 1), que foi gerada pelo refinamento de Delaunay, pode ser visualizada na Figura 6.

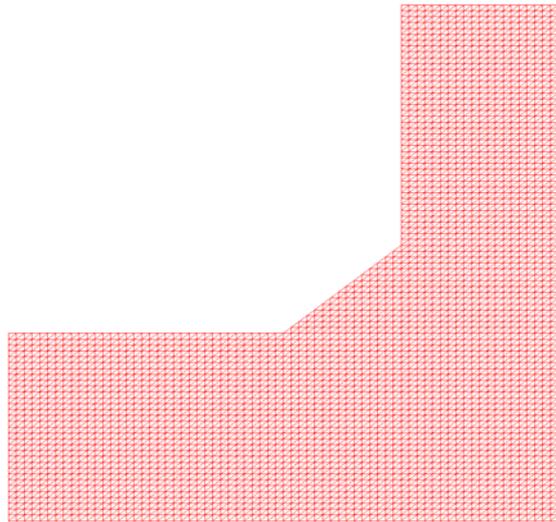


Figura 6. Malha de elementos finitos para o domínio do problema.

Com o domínio do problema modelado e discretizado, realizou-se o cálculo de elementos finitos duas vezes, uma para $T_{isoterma} = 1.100^{\circ}\text{C}$ e outra para $T_{isoterma} = 1600^{\circ}\text{C}$ (passo 2 do fluxograma da Figura 5) gerando os dados necessários para calcular o modelo linear (passo 3 do fluxograma da Figura 5) obtendo assim um modelo linear que mapeia, para cada ponto domínio, o cálculo equivalente do FEM. Para o cálculo de FEM adotou-se $k = 1,0 \text{ W/mK}$ e $h = 5000,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ (valores tabelados em Bejan⁽⁷⁾).

Através do modelo linear obtido, realizou-se uma simulação para $T_{isoterma} = 1500^{\circ}\text{C}$, obtendo a resposta do modelo linear (passo 6 do fluxograma da Figura 5), ou seja, a distribuição de temperatura para o domínio do problema (para cada nó do domínio em questão).

De posse dos valores de temperatura em cada nó do domínio, gerou-se uma imagem do perfil de temperatura em cores, conforme ilustrado na Figura 8. Para gerar esta imagem, foi feito um mapeamento térmico em cores, de forma similar à feita em Vitorino,⁽⁸⁾ definindo uma escala de conversão que depende de quatro cores bases, conforme a Tabela 1, resultando na escala de mapeamento ou legenda, ilustrada na Figura 7. Ressalta-se que as temperaturas fora do intervalo desta escala de mapeamento foram mapeadas para a cor cinza.

Analisando a Figura 7, infere-se que a posição da isoterma de 1.150°C , região de solidificação do ferro-gusa, corresponde ao contorno vermelho e a região cinza corresponde a região desgastada do refratário do cadinho. A Figura 9 ilustra a curva (formada pelos pontos pretos) da isoterma de 1.150°C mapeada na malha de elementos finitos, que é a região de interface entre o ferro-gusa e o refratário correspondente ao perfil de temperatura da Figura 8.

Tabela 1. Temperaturas das cores de referência para as cores bases do mapeamento.

Cor	Temperatura °C
Azul	30
Verde	400
Amarelo	800
Vermelho	1.150

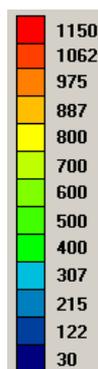


Figura 7. Escala de mapeamento.

Gerada a imagem para uma secção do cadinho, definiu-se um $\Delta\theta = 10^\circ$, para gerar a imagem 3D correspondente a todo cadinho, o que implica em gerar 36 imagens correspondentes as Figura 8 e mapear seus contornos para um objeto 3D que representa o cadinho, conforme a Figura 10. Os pontos desta figura foram gerados pela rotação dos pontos pertencentes ao contorno da Figura 9 de acordo com o $\Delta\theta$ definido, e nestes pontos aplicou-se o refinamento de Dalaunay, para se obter a malha que forma a superfície do objeto 3D, conforme ilustrado também na Figura 10.

Com o objeto 3D construído e o perfil calculado para as 36 secções 2D do cadinho, foi necessário fazer um mapeamento de cada ponto do contorno da secção 2D para os correspondentes pontos do objeto 3D, para que a informação da temperatura calculada no primeiro pudesse ser repassada para o segundo. A Figura 11 ilustra este mapeamento para $T_{\text{isoterma}} = 1500^\circ\text{C}$.

Uma dificuldade encontrada durante o desenvolvimento, reside na visualização 3D da região do refratário desgastado, ou seja, a capacidade de visualizar a região na qual realmente se encontra a interseção do refratário com o ferro-gusa, que é correspondente a isoterma de 1150°C . Verifique que esta região não aparece na Figura 11, pois os pontos pertencentes as curvas da isoterma de 1150°C não existem no objeto 3D, e se existissem seriam internos ao objeto 3D, não podendo ser visualizados a princípio. Estes pontos não existem porque não foram criados e nem mapeados, já que os pontos mapeados de 2D para o 3D foram os pontos do contorno do domínio, e também só podem ser calculados dinamicamente, pois dependem do valor da condição de contorno T_{isoterma} .

Para contornar a dificuldade da inexistência dos pontos, os pontos pertencentes à isoterma de cada secção foram criados e mapeados dinamicamente, ou seja, conforme o cálculo de cada secção, cada um com seu respectivo ângulo, resultando no objeto 3D correspondente à isoterma de 1150°C , conforme a Figura 12. Para contornar a dificuldade de visualização, utilizou-se o recurso de transparência da OpenGL⁽⁹⁾ (biblioteca gráfica utilizada para a visualização 3D), possibilitando a integração dos objetos das Figuras 11 e 12, conforme ilustrado na Figura 13.

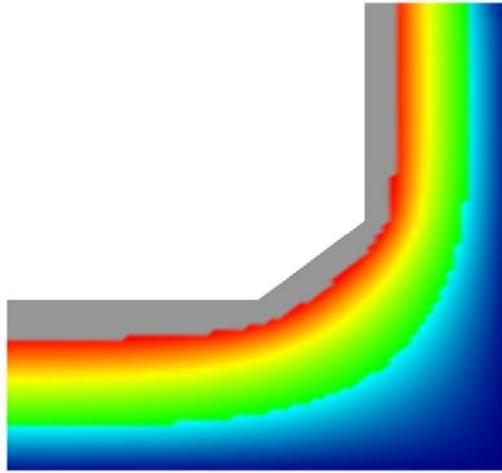


Figura 8. Perfil de temperatura do domínio do problema para $T_{\text{isoterma}} = 1500^{\circ}\text{C}$.

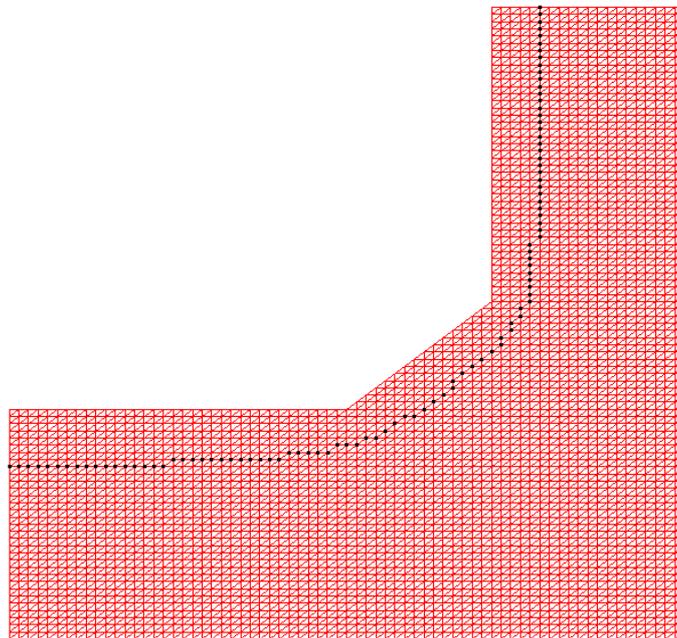


Figura 9. Isotherma de 1150°C correspondente a $T_{\text{isoterma}} = 1500^{\circ}\text{C}$.

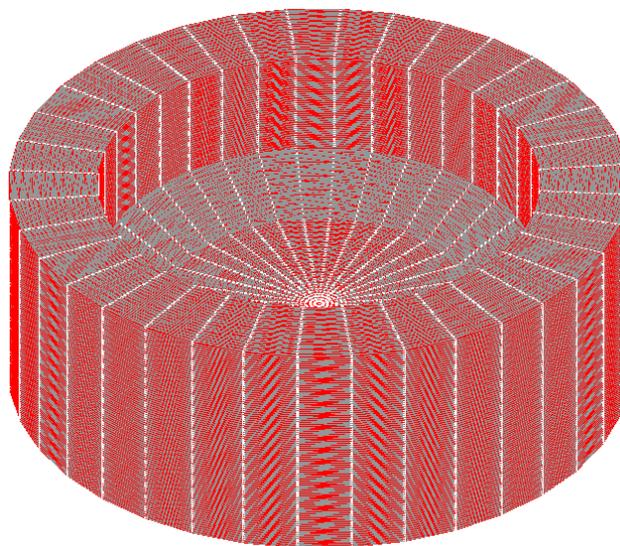


Figura 10. Objeto 3D que representa o cadinho.

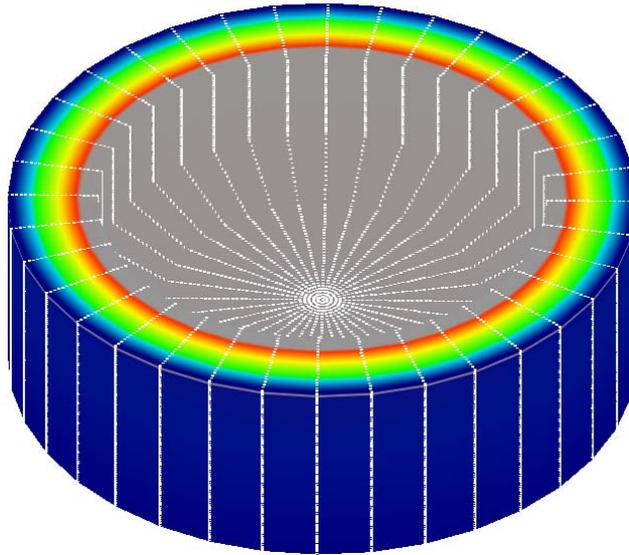


Figura 11. Objeto 3D mapeado para $T_{\text{isoterma}} = 1500^{\circ}\text{C}$.

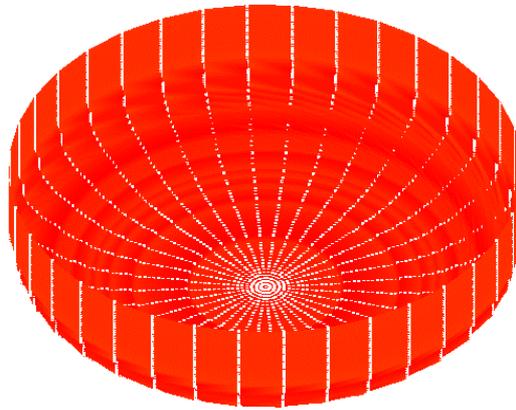


Figura 12. Objeto 3D mapeado, referente à isoterma 1150°C .

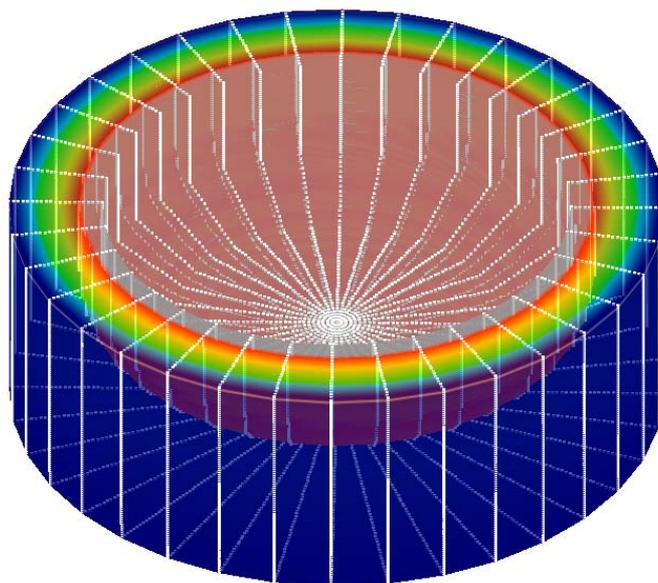


Figura 13. Objeto 3D mapeado para $T_{\text{isoterma}} = 1500^{\circ}\text{C}$, com a visualização da isoterma de 1150°C .

4 DISCUSSÃO

Apesar do modelo desgaste do cadinho utilizado neste trabalho - baseado na posição da isoterma de 1150°C - ter sido o mesmo utilizado por Liu⁽⁴⁾ e Parreira,⁽²⁾ a metodologia para a resolução do problema foi diferente – métodos de elementos finitos (FEM), seguida por uma linearização do problema. Liu⁽⁴⁾ utilizou o método de volumes finitos (FVM) e Parreira⁽²⁾ utilizou equações de conservação da energia térmica. Os resultados gráficos obtidos neste trabalho são o seu principal diferencial, pois a visualização tridimensional oferece uma visão mais realística para o acompanhamento do processo.

5 CONCLUSÃO

Após análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que o sistema implementado através da técnica de FEM se mostrou capaz de avaliar o desgaste do refratário do cadinho, tanto para dados on-line como para dados históricos máximos de temperatura, pois ambos são dados de temperatura, que é o requisito de entrada do sistema.

Um ponto crucial para que a informação fornecida pelo sistema seja válida é a calibração do sistema, ou seja, o ajuste dos valores de k (condutividade térmica do refratário) e h (constante de troca de calor por convecção), de forma que as temperaturas estimadas nos pontos que possuem medidas e o desgaste calculado, sejam os mais próximos da real condição de operação do cadinho. Por este motivo, atualmente o sistema encontra-se em fase de implantação e testes para sua validação.

Pelos testes realizados até então, o sistema demonstrou ser de grande utilidade para a equipe de operação do AF1 da Gerdau Açominas, permitindo à tomada de decisões, como por exemplo, a programação da reforma do refratário do cadinho, de forma a evitar a interrupção prematura do forno, tornando possível estendê-la até um limite seguro de operação.

Agradecimentos

Agradeço a todos os colegas da Gerdau Açominas que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho e aos professores e colegas do Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, pelo apoio e ensinamentos.

REFERÊNCIAS

- 1 LAAR , R. V., CALLENFELS, E. S. V., GEERDS, M. **Blast Furnace Hearth Management for Safe and Long Campaigns**. ISSTech 2003 Conference Proceedings, pp 1079-1090
- 2 PARREIRA, G. C., Santos, R. J., **Sistema de monitoramento do desgaste do cadinho do Alto-Forno "A" da Belgo**, VIII Seminário de Automação de Processos da ABM, Belo Horizonte, 2004.
- 3 RADMOSER, Esther. **Security-Related Parts of a Blast Furnace Model**. ECMI 1998 Newsletter 23 pp. 12–15 [Disponível: <http://www.it.lut.fi/mat/EcmiNL/ecmi23/node5.html>]
- 4 LIU, Kekian Ken. **New Blast Furnace Hearth Erosion Model Development and Application at U. S. Steel**, AISTech 2007 Conference
- 5 SHEWCHUK, J. R., **Lecture Notes on Delaunay Mesh Generation**, 1999, p.1-

- 10, 109 p [Disponível em <http://www.cs.berkeley.edu/~jrs/mesh/>]
- 6 LUENBERGER, David G. **Linear and nonlinear programming**. 2. ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, c1984. 491p.
 - 7 BEJAN, Adrian. **Transferência de calor**. São Paulo: E. Blucher, c1996 540p,
 - 8 VITORINO, T. A. S., FIGUEIREDO, E. S., ROCHA, D. M., MESQUITA, R. C., CAMINHAS, W. M., **Sistema de visualização gráfica tridimensional da temperatura dos Staves do alto-forno da Gerdau Açominas**. In: Seminário de Automação de Processos, 2006, Belo Horizonte/MG. Anais do X Seminário de Automação de Processos, 2006. v. 1. p. 1-6.
 - 9 OPENGL ARB. **OpenGL - The Industry Standard for High Performance Graphics**. [Disponível em <http://www.opengl.org>]

BIBLIOGRAFIA

- 1 ARAUJO, L. A., **Manual de siderurgia**. São Paulo: Arte & Ciência, c.1997. 2v.
- 2 BASTOS, João P. A. **Eletromagnetismo e cálculo de campos**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1989. 452p.
- 3 HUGHES, Thomas J. R. **The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, c1987. 803p.
- 4 JIN, Jianming. **The Finite element method in electromagnetics**. J. Wiley & Sons, New York, 1993, 464 p.
- 5 LEWIS, R. W. **The finite element method in heat transfer analysis**. Chichester: John Wiley, c.1996. 279p.