

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA QUEIMA DE PELOTAS EM UM POT GRATE<sup>1</sup>

Bayard Beling Morales<sup>2</sup>

André Carlos Contin<sup>2</sup>

Leonardo Barboza Trindade<sup>3</sup>

Anderson Willian de Souza Baltazar<sup>4</sup>

Magno Rodrigues Ribeiro<sup>5</sup>

## Resumo

O processo de pelotização é utilizado para agregar valor aos finos de minério de ferro, permitindo seu emprego em altos-fornos e no processo de redução direta. Ele consiste na aglomeração e posterior tratamento térmico das pelotas, conferindo-lhes as propriedades químicas e mecânicas adequadas para uso final. Para simular a pelotização é possível utilizar o *pot grate*, que é um equipamento no qual uma carga de pelotas cruas é submetida a condições similares às encontradas no processo industrial. No presente trabalho, apresenta-se a simulação numérica do experimento que ocorre em um *pot grate*. O modelo matemático foi construído considerando as equações governantes da transferência de calor e da secagem das pelotas. Utilizou-se o método das diferenças finitas para solucionar numericamente o problema. A aferição do modelo foi realizada através da comparação entre a temperatura no interior do leito de pelotas calculada pelo modelo numérico com medidas experimentais disponíveis na literatura. O modelo numérico apresentou boa concordância com tais dados.

**Palavras-chave:** Pelotização; Simulação; *Pot grate*.

## NUMERICAL SIMULATION OF PELLET FIRING IN A POT GRATE

### Abstract

The pelletizing process is employed in order to raise the economical value of iron ore fines, allowing its use in blast furnaces and direct reduction process. It consists in agglomerating and treating thermally iron ore pellets, which gives them the desired chemical and mechanical properties for its final use. To simulate the pellet firing, it is possible to use the *pot grate*, an equipment in which the green pellets are submitted to conditions to present at the industrial process. In the present paper, the numerical simulation of pot grate procedure is shown. The mathematical model was built based in equations which describe heat transfer and pellet drying. Finite difference method was employed to solve numerically the equation system. The validation was made by comparing numerical results with available experimental data found in literature. The numerical model has shown good agreement with data.

**Key words:** Pelletizing; Simulation, Pot grate.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas – Internacional, 12 a 16 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Físico, Mestre em Engenharia Metalúrgica PPGEM/UFRGS – Equipe Técnica – STE

<sup>3</sup> Físico, Dr. Eng. Metalúrgica – Diretor Geral – STE.

<sup>4</sup> Eng. Químico, Dr. Eng. Metalúrgica - CTF – Vale S.A.

<sup>5</sup> Eng. Metalurgista, Mestre em Engenharia de Materiais - CTF – Vale S.A.

## 1 INTRODUÇÃO

A pelletização é um processo através do qual finos de minério com granulometria menor do que 0,15 mm (*pellet feed*) são aglomerados e tratados termicamente. Esse processo cria uma matéria-prima denominada pelota, que possui características químicas e mecânicas adequadas ao seu aproveitamento na fabricação de ferro gusa.

Dentre os diversos métodos para produção de pelotas, o forno de grelha móvel se destaca como o mais relevante no cenário mundial.<sup>(1)</sup> Nele, após o processo de pelletamento, as pelotas cruas (esferas compostas por minérios de ferro, água, carbono, aglomerantes e fundentes) são colocadas em uma esteira composta por carros (carro de grelha) que atravessam diversas zonas de um forno. Cada uma delas é ligada a caixas de vento com diferentes temperaturas. O ar soprado permeia o leito de pelotas, promovendo a secagem, a queima e o resfriamento sequencialmente. Na Figura 1 observa-se um desenho esquemático do forno de grelha móvel.

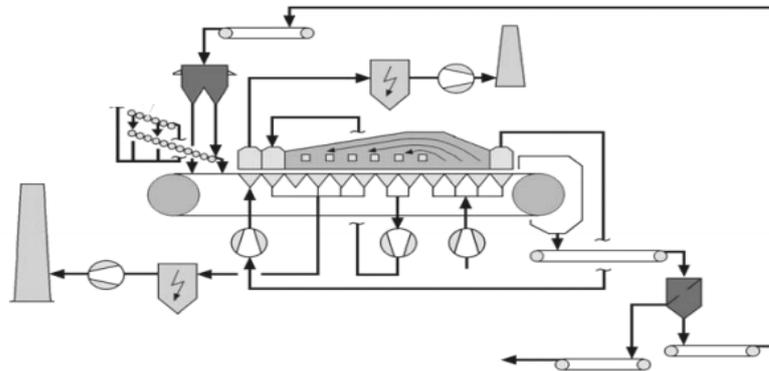


Figura 1. Esquema do forno de grelha móvel.<sup>(1)</sup>

Uma das principais ferramentas para o estudo dos fenômenos que ocorrem dentro do forno de grelha móvel é o *pot grate*, que consiste em uma planta piloto do forno. Nele, pequenas cargas de pelotas cruas são submetidas a condições similares às presentes no forno de grelha móvel. Isso permite avaliar a performance do tratamento e a qualidade da pelota antes de construir um novo forno, estudar novos ciclos térmicos e composições de pelotas, evitando ou reduzindo a necessidade de testes na planta real. A Figura 2 mostra um esquema representativo do *pot grate* da vale S.A. localizado no seu Centro de Tecnologia de Ferrosos, em Nova Lima – MG.

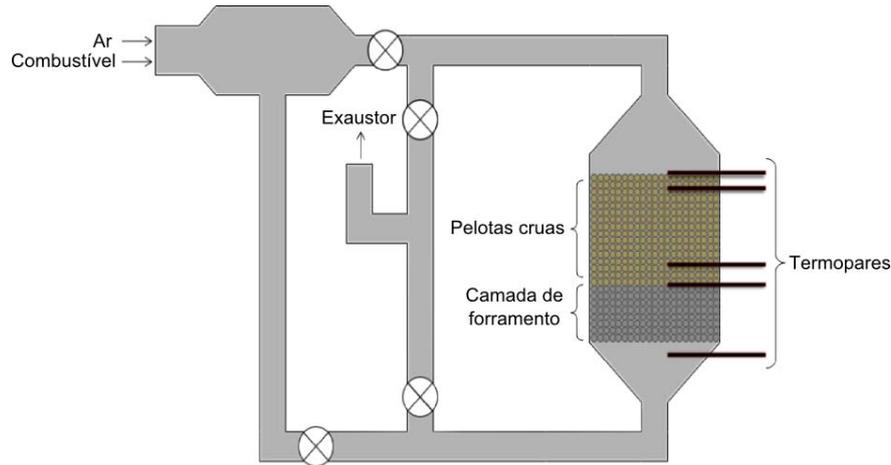


Figura 2. Esquema da planta piloto de pelotização (*pot grate*).<sup>(2)</sup>

Observa-se na Figura 2 que o *pot grate* consiste, basicamente, em um leito fixo de pelotas que é permeado por uma corrente de ar. O ar é aquecido por um queimador na câmara de combustão e bombeado para dentro do leito. Ao passar pelas pelotas, o ar cede calor às mesmas, levando à ocorrência de diversas reações químicas. Para simular a passagem do carro de grelha pelas diversas zonas do forno, o fluxo de ar no *pot grate* é alterado diversas vezes, utilizando as mesmas direções, temperaturas e quedas de pressão do forno industrial.

Ao término do ensaio, são realizadas análises da composição química e da qualidade da pelota (resistência à compressão, por exemplo), que permitem determinar se o ciclo adotado resultará em um produto final adequado.

A simulação numérica do *pot grate* tem sido realizada por diversos autores<sup>(2-4)</sup> e é considerada uma ferramenta que permite ampliar a utilidade da planta piloto, por permitir uma previsão dos resultados *design* prévio do *pot grate*, bem como melhorar o planejamento de experimentos. Ainda, a simulação numérica do *pot grate* pode servir de base para uma expansão do modelo para o cálculo de um forno de escala industrial.

No presente trabalho, é apresentado um modelo numérico do *pot grate*. A metodologia é discutida e seus resultados são comparados com dados experimentais coletados da literatura, apresentando boa concordância.

## 2 METODOLOGIA

A construção do modelo numérico baseou-se na literatura sobre a modelagem matemática do *pot grate*.<sup>(2-4)</sup> O modelo contempla a transferência de calor entre ar e pelotas, a mudança de propriedades físicas de ambas as fases com a temperatura e a secagem das pelotas.

Algumas hipóteses para simplificar a modelagem foram elaboradas:

- a transferência de calor ocorre somente na direção axial do *pot grate*: o modelo numérico é unidimensional;
- a condução de calor entre as pelotas é desprezível em comparação com a transferência de calor convectiva entre ar e pelotas;
- devido ao seu pequeno diâmetro, considera-se que cada pelota tem temperatura uniforme, ou seja, o interior das pelotas está a mesma temperatura da superfície;

- a densidade a granel do leito e a densidade da pelota são constantes: o encolhimento do leito é desprezado;
- o diâmetro e porosidade das pelotas é constante durante o processo;
- o ar flui através do leito uniformemente: não há formação de canais de escoamento;
- as perdas de calor do gás para as paredes do *pot grate* são desprezíveis; e
- o calor gerado nas reações afeta exclusivamente as pelotas.

Considerando as hipóteses acima, o sistema modelado compreende a convecção de calor unidimensional em um leito fixo de partículas sob regime transiente. As principais equações governantes do sistema são dadas pela conservação de energia (Equações 1 e 2) e pela equação de Ergun (Equação 3), que relaciona a perda de carga em um leito fixo às suas características. As equações para cálculo das propriedades físicas relevantes podem ser encontradas nas referências citadas anteriormente.<sup>(2,3)</sup>

$$\rho_p C_{p_p} \frac{\partial T_p}{\partial t} = h A_s (T_g - T_p) + Q_{reac}$$

Equação 1 – Transferência de calor – pelotas.

$$G C_{p_g} \frac{\partial T_g}{\partial z} = -h A_s (T_g - T_p)$$

Equação 2 – Transferência de calor – ar.

$$\frac{dP}{dz} = \frac{150 \mu_g (1 - \epsilon_b)^2}{(\phi d_p)^2 \epsilon_b^3 \rho_g} G + \frac{1,75 \mu_g (1 - \epsilon_b)}{\phi d_p \epsilon_b^3 \rho_g} G^2$$

Equação 3 – Equação de Ergun.

A Tabela 1 apresenta os símbolos utilizados neste trabalho.

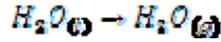
**Tabela 1** - Lista de símbolos

$A_s$	Área interfacial	$T_p$	Temperatura da pelota
$C_{p_p}$	Calor específico das pelotas	$\rho_p$	Densidade da pelota
$C_{p_g}$	Calor específico do gás	$\rho_g$	Densidade do gás
$d_p$	Diâmetro da pelota	$\mu_g$	Viscosidade do gás
$G$	Fluxo mássico de gás	$\epsilon_b$	Permeabilidade do leito
$h$	Coefficiente de transferência de calor	$\epsilon_p$	Porosidade da pelota
$dP$	Queda de pressão no leito	$\phi$	Esfericidade da pelota
$Q_{reac}$	Termo fonte de energia	$z$	Coordenada espacial
$T_g$	Temperatura do gás	$t$	Coordenada temporal

Em relação às reações químicas que ocorrem no processo, o modelo proposto adota uma abordagem bastante simplificada. Foram propostas as seguintes hipóteses:

- as pelotas consideradas no modelo não contêm magnetita;
- não há adição de coque ou carvão à pelota; e
- o efeito térmico das demais reações (ex: decomposição da dolomita) é desprezado.

Dessa forma, somente a remoção da umidade das pelotas (Equação 4) é considerada na simulação. O modelo para descrever a taxa da reação é o proposto por Seshadri e Da Silva Pereira, que contempla três fases distintas da secagem.<sup>(3)</sup>



Equação 4 – secagem das pelotas

O fluxograma apresentado na Figura 3 mostra o funcionamento do modelo.

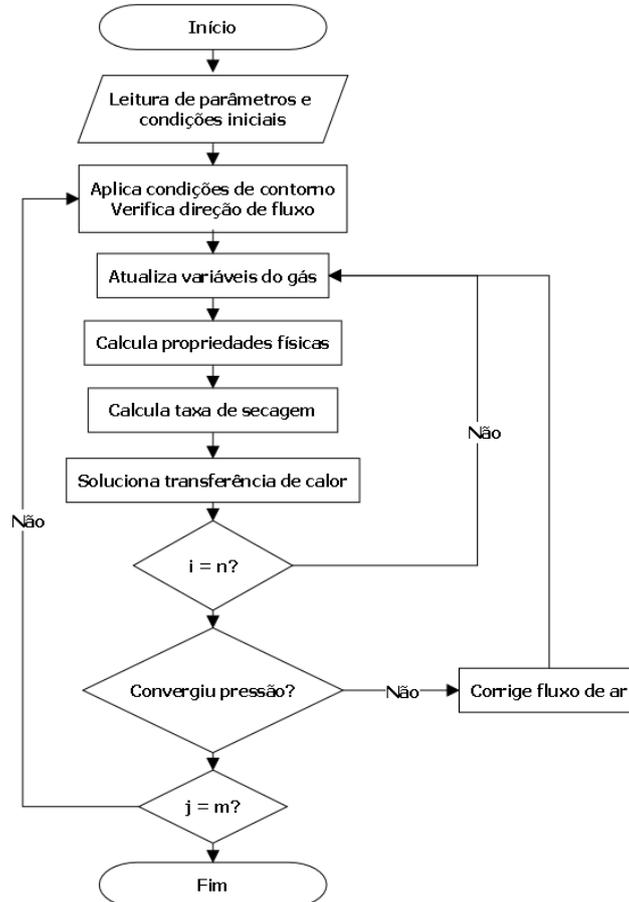
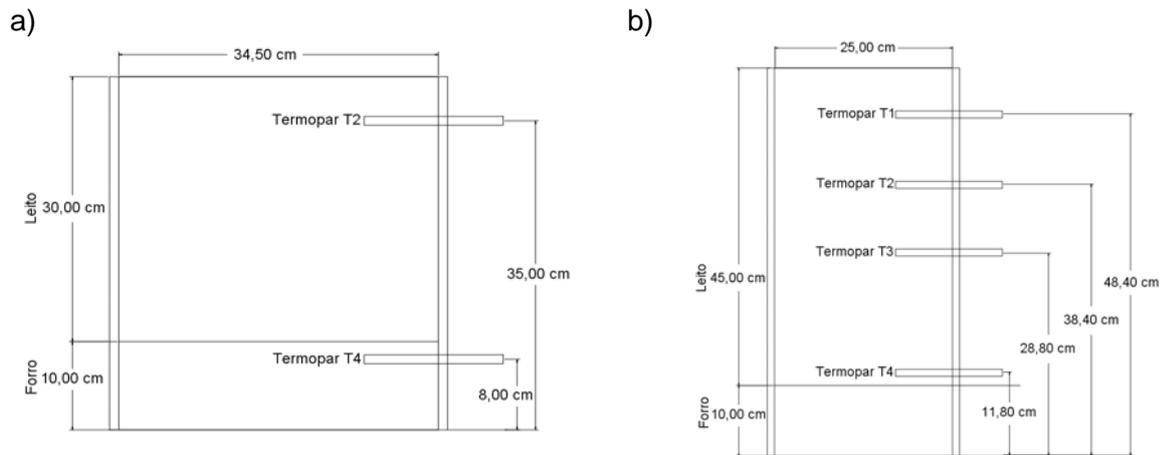


Figura 3. Fluxograma da simulação numérica da queima de pelotas no *pot grate*.

Utilizou-se o método das diferenças finitas explícito (empregando Runge-Kutta de 4ª ordem) para solucionar numericamente as equações diferenciais. Foi feita análise de independência de malha e verificou-se que utilizando uma discretização espacial de  $10^{-3}$  m e passo de tempo de 1 s a independência era atingida. A implementação computacional foi realizada através de um programa em Fortran 95.

A validação da simulação foi conduzida através da comparação de seus resultados com dados experimentais de dois artigos.<sup>(3,4)</sup> O parâmetro de comparação utilizado foi a temperatura de termopares inseridos dentro do leito de pelotas. Estes termopares mostram a temperatura das pelotas em diversas alturas no leito, permitindo verificar se as diversas camadas de pelotas atingiram as temperaturas desejadas no tratamento. A Figura 4 mostra desenhos esquemáticos dos referidos experimentos.



**Figura 4.** Visão esquemática das plantas pilotos da literatura utilizada para validação.<sup>(3,4)</sup>

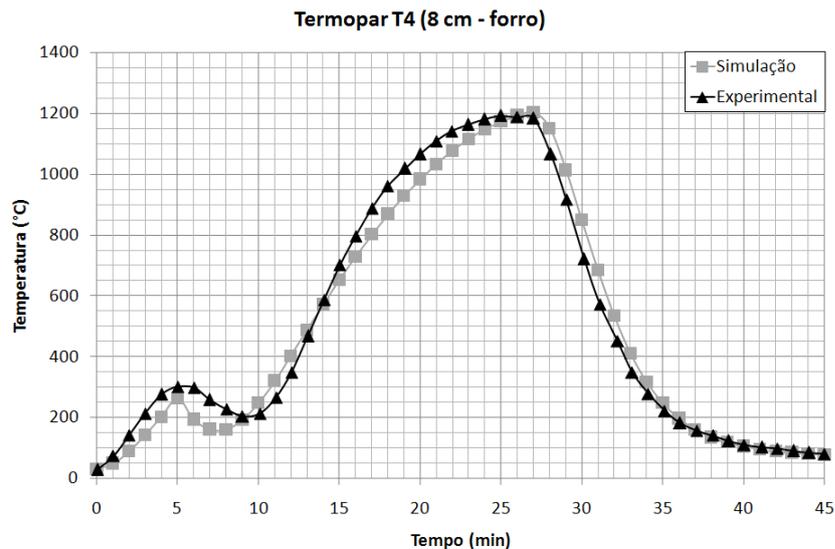
A Tabela 1 resume os dados de entrada para o modelo em cada uma das validações.

**Tabela 2.** Condições dos dados experimentais da literatura utilizada para validação

	Validação 1 – Seshadri e Pereira <sup>(3)</sup>	Validação 2 – Thurlby, Batterham e Turner <sup>(4)</sup>
Altura do leito	10 cm (forro) + 30 cm (cruas)	10 cm + 45 cm
Tempo de tratamento	48 min	40 min
Diâmetro da pelota	13 mm	12 mm
Densidade da pelota	3.600 kg/m <sup>3</sup>	3.600 kg/m <sup>3</sup>
Umidade inicial da pelota	7,66%	10,00%
Fração de vazios	0,36	0,41

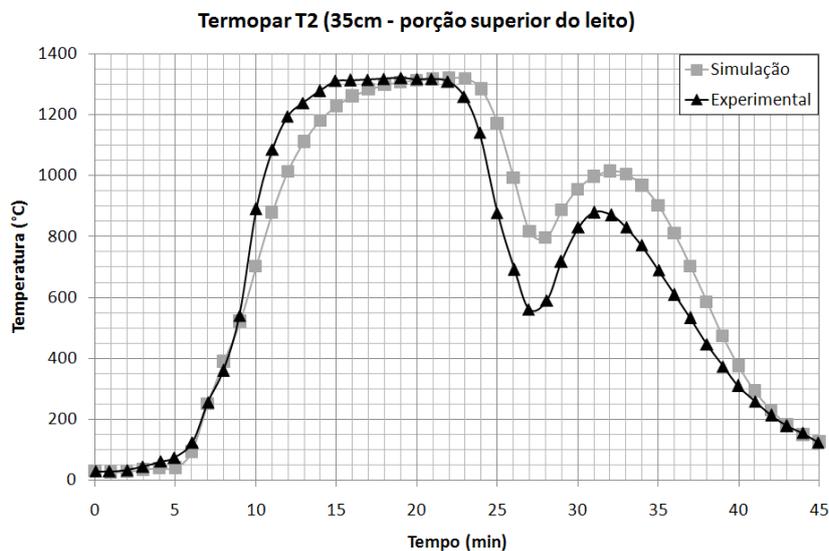
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A temperatura dos termopares T4 (camada de forramento) e T2 (próximo ao topo do leito) simulada é comparada com o experimento de Seshadri e Da Silva Pereira nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Verifica-se que a simulação reproduz os dados experimentais de forma satisfatória.



**Figura 5.** Comparação entre temperatura de termopar T4 simulada e experimental de Seshadri e Pereira.<sup>(3)</sup>

Na camada de forramento (Figura 5), existe uma diferença que se intensifica entre 5 minutos (momento do início da secagem descendente) até 10 minutos. Essa discrepância pode ser devido a diferenças no processo de secagem ou a forma de implementação das inversões de fluxo na simulação numérica. No restante do tempo, as curvas apresentam trajetórias similares.

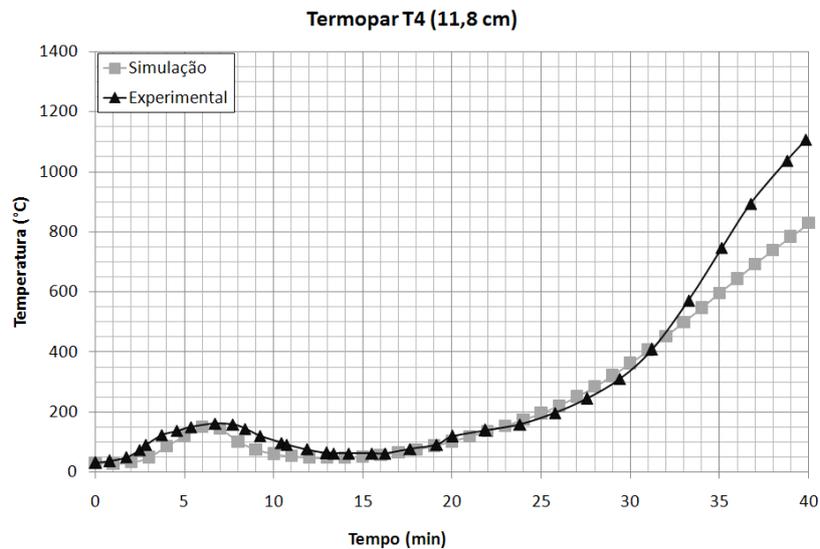


**Figura 6.** Comparação entre temperatura de termopar T2 simulada e experimental de Seshadri e Pereira.<sup>(3)</sup>

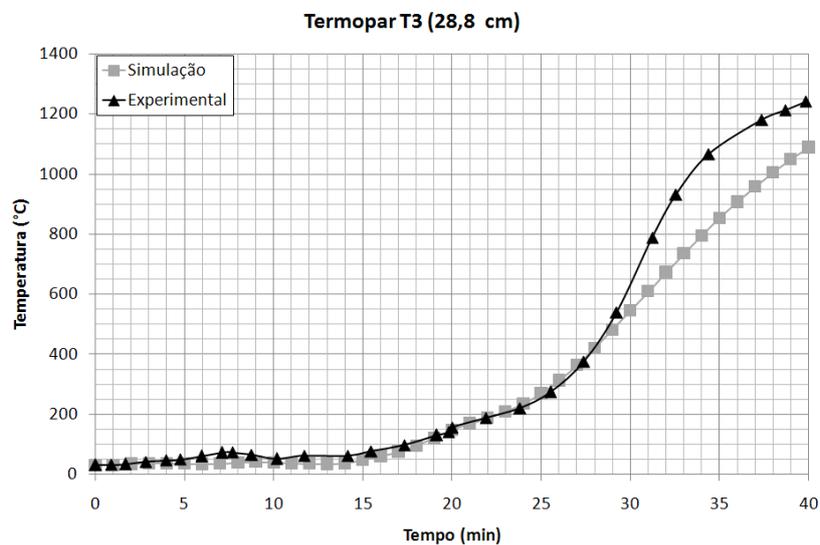
Na porção superior do leito (Figura 6), até 10 minutos de tratamento as curvas têm um comportamento próximo. Nesse instante, a curva experimental passa a apresentar temperaturas superiores à simulação. De forma geral, a Figura 6 mostra que os fenômenos no experimento ocorreram mais cedo do que na simulação (como se a curva experimental fosse a mesma da simulação, porém deslocada para a esquerda.) Ainda, após o minuto 22, a simulação passa a apresentar temperaturas

ligeiramente superiores – isso pode ser devido à diferenças na vazão de gás calculada pelo modelo através da equação de Ergun.

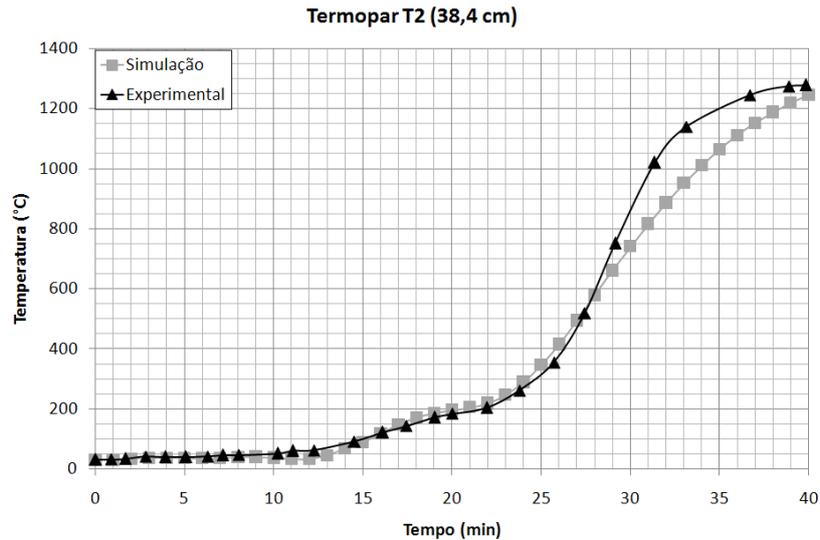
As Figuras 7 a 10 mostram a comparação entre temperaturas simuladas neste trabalho e obtidas experimentalmente por Thurlby, Batterham e Turner.<sup>(4)</sup> Ressalta-se que neste caso o ciclo térmico do *pot* grate é diferente do utilizado por Seshadri e Pereira,<sup>(3)</sup> não havendo a etapa de resfriamento. Como na validação anterior, a comparação entre simulação numérica e dados experimentais é favorável.



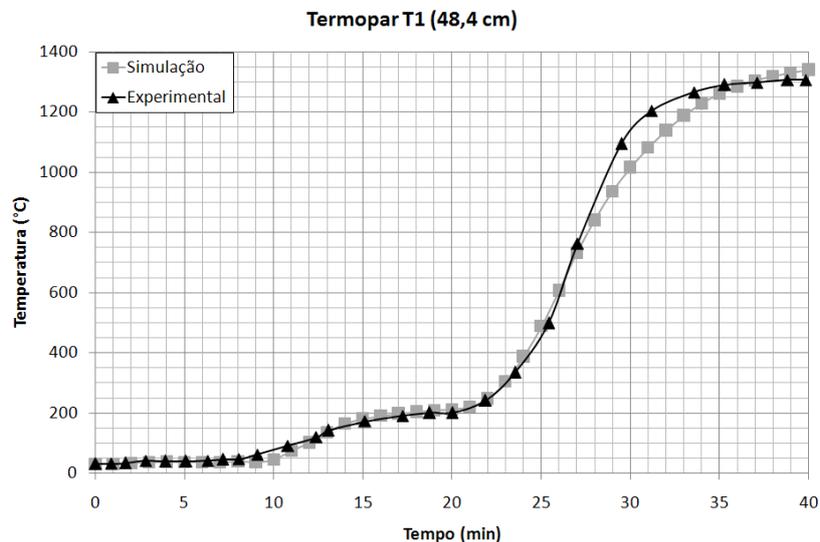
**Figura 3** - Comparação entre temperatura de termopar T4 simulada e experimental de Thurlby, Batterham e Turner.<sup>(4)</sup>



**Figura 4** - Comparação entre temperatura de termopar T3 simulada e experimental Thurlby, Batterham e Turner.<sup>(4)</sup>



**Figura 5** - Comparação entre temperatura de termopar T2 simulada e experimental de Thurlby, Batterham e Turner.<sup>(4)</sup>



**Figura 6** - Comparação entre temperatura de termopar T1 simulada e experimental de Thurlby, Batterham e Turner.<sup>(4)</sup>

Observa-se nas Figuras 7 a 10 que as temperaturas simuladas possuem um comportamento similar às experimentais até o minuto 28, na qual o termopar T2 experimental passa a apresentar temperaturas superiores. Essa tendência surge em todos os termopares.

Os resultados apontam, de forma geral, que o modelo numérico representa bem os fenômenos térmicos que ocorrem dentro do leito. Mesmo utilizando uma abordagem simplificada como a do presente artigo, é possível prever qual a temperatura que as pelotas são submetidas. Segundo Batterham,<sup>(5)</sup> ao conhecer o histórico de temperatura ao qual as pelotas são submetidas pode-se construir um modelo e prever a resistência das pelotas.

Diversas melhorias podem ser realizadas futuramente no modelo. Pelotas contendo magnetita e coque requerem a implementação da oxidação e combustão das mesmas. Pode ser feita a implementação de um submodelo para cálculo da qualidade das pelotas. Por fim, o desenvolvimento do modelo aqui apresentado pode culminar na obtenção de um *software* para a simulação do forno de grelha.

## 4 CONCLUSÕES

A simulação numérica do *pot grate* pode ampliar a utilidade deste tipo de planta piloto. Apresentou-se o desenvolvimento da simulação deste tipo de aparelho, baseado na literatura no assunto. O modelo foi validado através da comparação com dados experimentais de duas fontes da literatura, obtendo resultados positivos. O desenvolvimento futuro desta simulação levará a um modelo mais sofisticado, incluindo efeitos desprezados no presente trabalho e à construção de um *software* para simulação do forno de grelha móvel na íntegra.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a L.F.K Possani e R.R. Castro (STE) pelo auxílio na elaboração do artigo e ao Laboratório de Siderurgia (LASID) pela colaboração no desenvolvimento do modelo.

## REFERÊNCIAS

- 1 MOURÃO, J. M. The growing importance of pelletizing for iron ore mining and iron production. 3rd International Meeting on Ironmaking and 2nd International Symposium on Iron Ore. Sao Luis City, Brazil: 428-439 p. 2008.
- 2 BARATI, M. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system. International Journal of Mineral Processing, v. 89, n. 1-4, p. 30-39, Dec 2008. ISSN 0301-7516.
- 3 SESHADRI, V.; PEREIRA, R. O.S. Mathematical simulation of induration of iron ore pellets in pot grate. 4th International Symposium on Agglomeration. Toronto, Canada, 1985. 729-744 p.
- 4 THURLBY, J. A.; BATTERHAM, R. J.; TURNER, R. E. DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A MATHEMATICAL-MODEL FOR THE MOVING GRATE INDURATION OF IRON-ORE PELLETS. International Journal of Mineral Processing, v. 6, n. 1, p. 43-64, 1979. ISSN 0301-7516.
- 5 BATTERHAM, R. J. MODELING THE DEVELOPMENT OF STRENGTH IN PELLETS. Metallurgical Transactions B-Process Metallurgy, v. 17, n. 3, p. 479-485, Sep 1986. ISSN 0360-2141.