

# AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE GASES EM FORNO DE PELOTIZAÇÃO DA SAMARCO MINERAÇÃO ATRAVÉS DE CFD E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL<sup>1</sup>

Maycon Athayde<sup>2</sup>  
Roberto Parreiras Tavares<sup>3</sup>  
Sergio Fernando Nunes<sup>4</sup>  
Maurício Cota Fonseca<sup>4</sup>

## Resumo

A Samarco Mineração produz pelotas de minério de ferro processadas termicamente em fornos de grelha móvel. Este processo é fundamental para que se obtenha a adequada resistência mecânica das dos aglomerados para o transporte e operação dos reatores de redução. Todas as propriedades mecânicas dos aglomerados são obtidas durante a etapa de queima, sendo etapa decisiva, para a qualidade da pelota. Portanto, a distribuição de velocidade do fluxo gasoso no interior desta zona deve apresentar homogênea distribuição. Para tanto, foi desenvolvido um modelo matemático em CFD para caracterizar o escoamento dos gases na zona de queima, aplicando as equações de conservação de quantidade de movimento, massa e energia. A validação do modelo proposto foi obtida através de medições de temperaturas no interior do forno. Foi desenvolvido um sistema de comunicação wireless de forma a acompanhar de forma contínua e interrupta a evolução de temperatura do forno.

**Palavras-chave:** Modelagem; CFD; Pelotização; Leitos porosos.

## EVALUATION OF THE FLOW DISTRIBUTION THROUGH CFD IN THE PELLETIZING FURNACE AT SAMARCO AND EXPERIMENTAL VALIDATION<sup>1</sup>

### Abstract

The Samarco produces iron ore pellets thermally processed in straight grate furnaces. This process is essential in order to obtain adequate mechanical strength to the pellets transportation and operation in the reduction reactors. All the mechanical properties of the agglomerates are obtained during the stage of firing, being decisive step to pellet quality. Therefore, the velocity distribution of gas flow within this zone must have homogeneous distribution. Therefore, it was developed a mathematical CFD model to characterize the gas flow in the burning zone, applying the equations of conservation of momentum, mass and energy. The validation of the model was obtained by measuring the temperatures inside the furnace. It was developed a wireless communication system in order to monitor continuously and uninterrupted evolution of oven temperature.

**Key words:** Modeling; CFD; Pelletizing; Packed beds.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, MBA, Eng., Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Phd, Professor, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

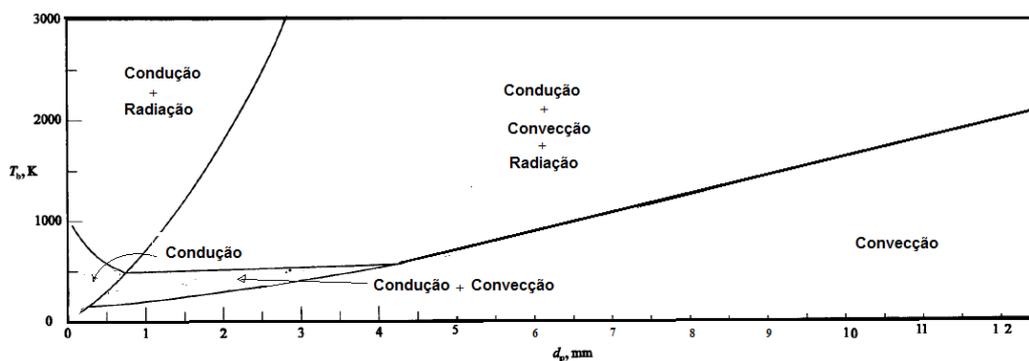
<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, MSc, Eng., Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos objetos estratégico da Samarco Mineração S/A é o de “assegurar produtos e serviços de qualidade”. A qualidade das pelotas de minério de ferro é conferida quando se agrega resistência mecânica aos aglomerados de minério de ferro. Esta propriedade é obtida através de processamento térmico dos aglomerados em fornos de grelha móvel (*Straight Grate*). Os fornos processam as pelotas em três etapas sequenciais: secagem, queima e resfriamento. Segundo Meyer<sup>(1)</sup> todas as propriedades dos aglomerados são obtidas durante a queima, sendo etapa portanto decisiva para garantir a qualidade da pelota.

Fornos de pelletização do tipo *Straight Grate* são equipamentos térmicos baseados em intensa convecção de calor. Através da recuperação do ar aquecido devido ao resfriamento das pelotas na descarga do forno, realiza-se a queima dos novos aglomerados, através de uma adição de calor ao ar pré-aquecido pelos queimadores posicionados ao longo da zona de queima. Não obstante a importância na qualidade do produto, medições de temperatura feitas na Samarco no leito de pelota indicam um desbalanceamento de vazão dos gases ao longo da zona de queima, adicionalmente imagens termográficas da descarga do forno mostram uma larga distribuição de temperaturas das pelotas. Distribuição não uniforme das temperaturas leva à redução da qualidade física final do aglomerado.

Estas pelotas de baixa qualidade agravam o risco de degradação durante o transporte.<sup>(2)</sup> Adicionalmente, na prática industrial, a distribuição irregular de fluxo de ar aquecido ao longo da transversal do forno gera o desgaste prematuro e não uniforme de elementos mecânicos no interior da zona de queima. O volume de ar para o processo pode ser superior à 1,5 kNm<sup>3</sup>/tms de pelota. Nos leitos de pelotas o mecanismo de transporte de energia predominante é a convecção (Figura 1) diferente de outros sistema de leitos de partículas.



**Figura 1.** Mecanismos de transferência de calor em leito-gás em função de temperatura e diâmetro de partícula.<sup>(3)</sup>

Adicionalmente, fatores geométricos e fluidodinâmicos podem estar associados a estes desequilíbrios do fluxo de ar aquecido, indesejados ao processo. A assimetria das caixas de vento do forno mostra-se crítica neste problema, podendo ser causa do desgaste dos carros de grelha de forma acentuada do lado sul.

## 2 OBJETIVO

Caracterizar o escoamento bidimensional de ar quente na zona de queima do forno de pelletização e validar o modelo através de medições de temperatura no interior do forno.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Modelamento Matemático do Escoamento na Zona de Queima

O código numérico utilizado foi baseado em elementos finitos<sup>(4)</sup> para a resolução das equações da continuidade, Navier-Stokes com Reynolds Médio (RANS) e a equação de conservação de energia. O mesmo foi implementado com recursos do LaSiP – Laboratório de Simulação de Processos, nas dependências do Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFMG. A discretização do domínio fluido do forno de pelletização foi realizada através de uma malha de 118.225 elementos (o teste de independência de malha mostrou menos de 2% de variação com o dobro de elementos). A combustão foi considerada através de uma abordagem não-reacional com injeção de um fluxo dos produtos de combustão (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>) à temperatura adiabática de chama e considerando um fluxo multicomponente. O regime de escoamento é o permanente. Esta última simplificação foi realizada para minimizar o custo computacional devido excessivo refinamento da malha realizado, no entanto, o fluxo de gases esta de fato plenamente desenvolvido em relação ao forno, o leito de pelotas, no entanto é transiente em relação ao forno. Consideração válida pelo foco no perfil de escoamento dos gases (muitos trabalhos já avaliaram o perfil de temperatura desde o trabalho de Thurlby).<sup>(5)</sup> O modelo de turbulência κ-ε adequou melhor aos dados de validação experimental e é amplamente válido em casos industriais<sup>(6)</sup>. No caso do forno de pelletização, ainda existe o efeito do leito poroso que gera uma perda de carga ao fluido através do forno. Este efeito foi adicionado ao termo-fonte da equação de quantidade de movimento. Este termo fonte adicional pode ser definido pela Equação 1 que tem forma semelhante a equação proposta por Ergun para queda de pressão em leito de partículas.

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\mu}{K_{perm}} U_i + K_{loss} \frac{\rho}{2} U_i |U| \quad (1)$$
$$\text{Onde, } K_{perm} = \frac{1}{150} \frac{\phi d^2}{\varepsilon^3} \quad \text{e } K_{loss} = 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\phi d}$$

#### 3.2 Desenvolvimento de Sistema de Medição de Temperatura em Carros de Grelha

Foi desenvolvido conjuntamente em parceria com a INSAUT instrumentação um sistema de medição on-line e contínuo de temperatura dos carros de grelha ao longo do forno a fim de avaliar em um longo período o perfil de temperatura das pelotas e barras de grelha. Foram então desenvolvidas barras de grelha com pontos para inserção e fixação de termopares. Todos os transmissores de temperatura e repetidores de sinal compuseram então uma rede wireless HART, não-estruturada, ou seja, o sinal é otimizado focando o monitoramento do posicionamento do carro no forno. Ao todo 15 repetidores de sinal comunicavam entre si de forma a amplificar e garantir a maior intensidade de sinal possível da rede. A recepção dos sinais vindos dos repetidores posicionados estrategicamente ao longo do forno foi realizada através de uma gateway posicionada na lateral do forno com a função de enviar o sinal para o registro dos dados PIMS, para monitoramento remoto do processo. Os termopares instalados nos carros de grelha comunicam em grupos de quarto a

quatro transmissores de temperatura que tinha a função de comunicação das leituras das temperaturas a rede wireless HART, ainda comunicavam a temperatura de suas eletrônicas, assim gerando uma segurança para a integridade do equipamento (Figura 2).

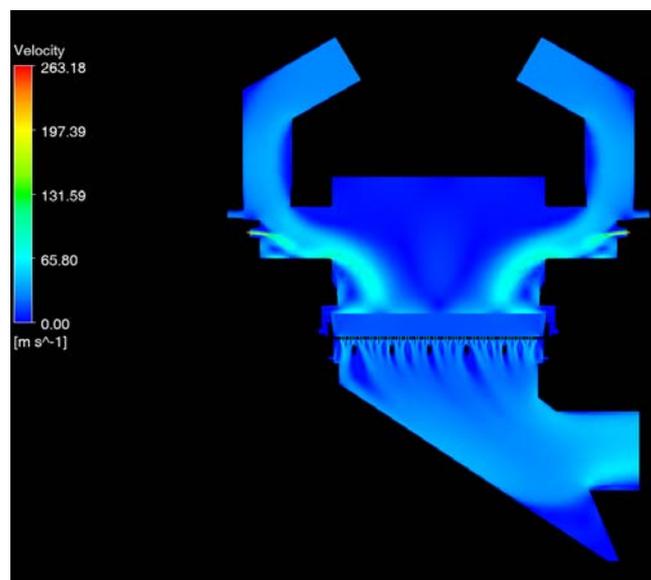


**Figura 2.** Detalhe do carro de grelha mostrado em destaque (a) Posicionamento dos transmissores de temperatura (b) vista geral do carro de grelha e posição das medidas (c) barra grelha com termopar exposto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

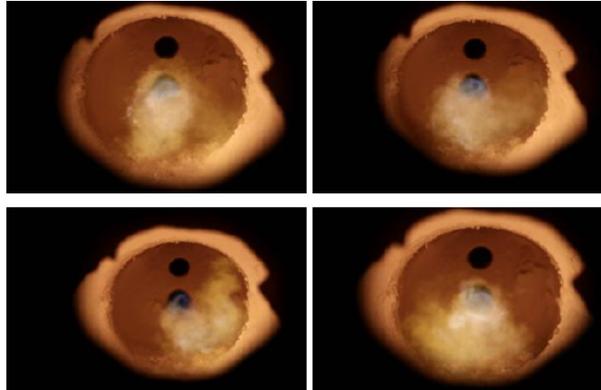
### 4.1 Caracterização da Fluidodinâmica na Região de Queima do Forno

A Figura 3 mostra a caracterização do fluxo de gases no interior da região de queima. Os contornos de velocidade mostram a existência de regiões com grades velocidades dos gases. A partir desta análise é possível perceber que o fluxo de gases oriundos dos *downcommer* gera uma deflexão nas chamas geradas nos queimadores no interior da câmara de combustão que influencia em todo o perfil de velocidades no interior do forno. Segundo Athayde<sup>(7)</sup> este efeito pode gerar risco de obstrução da câmara de combustão devido a acumulação de particulado no interior da câmara de combustão devido ao pó carregado pelo ar aquecido através dos *downcommers*.



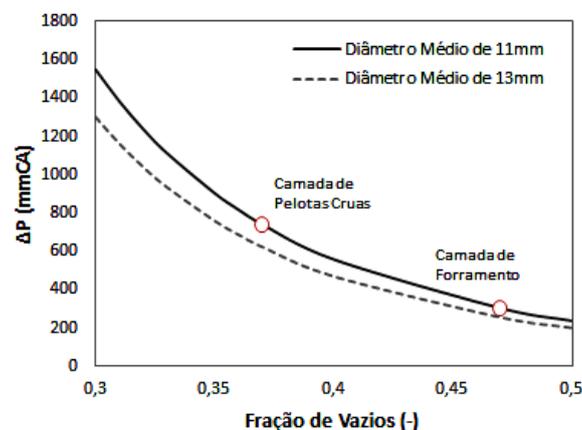
**Figura 3.** Contornos de Velocidade no Interior da Zona de Queima de Forno de Pelotização.

A deflexão da chama do gás natural ocorre nas camara de combustão devido ao razão entre as taxas de fluxo de momento dos fluxos perpendiculares de ar e gás natural. A Figura 4 mostra uma visão frontal da câmara de combustão onde em momentos diferentes onde a “cauda” da chama é deslocada para baixo, conforme previsto pelo modelo.



**Figura 4.** Contornos de velocidade no interior da zona de queima de forno de pelotização.

No presente trabalho, foi identificado ainda que o jato de alta velocidade é intensamente amortecido pelo fluxo oriundo dos downcommers mesmo após saída da camara de combustão. O fluxo segue em direção ao leito de pelotas com maior intensidade nas proximidades da lateral do forno e não no centro como esperado. A causa deste efeito foi associada aos gradientes de fração de vazios encontrados no leito de pelotas. A simulação mostrada na Figura 5 destaca a influência da fração volumétrica de vazios na queda de pressão no leito de pelotas. Esta variável apresenta ainda uma consequência crítica já que está ligada fortemente à heterogeneidade da distribuição granulométrica. Toda camada de forramento é peneirada (pelotas já queimadas) afim de permitir satisfatória passagem de ar na camada de fundo do carro. Portanto, um delta de 400mmCA pode ser encontrado entre a camada de forramento da lateral dos carros de grelha e o leito de pelotas cruas, levando ao favorecimento a passagem do ar mais próximo a esta região, conforme previsto.



**Figura 5.** Influência da fração de vazios e repartições do leito de pelotas da queda de pressão no leito de pelotas.

A distribuição não uniforme dos fluxos de gases pode levar a heterogeidade da qualidade física final do aglomerado na região central do forno, já que está pode ser

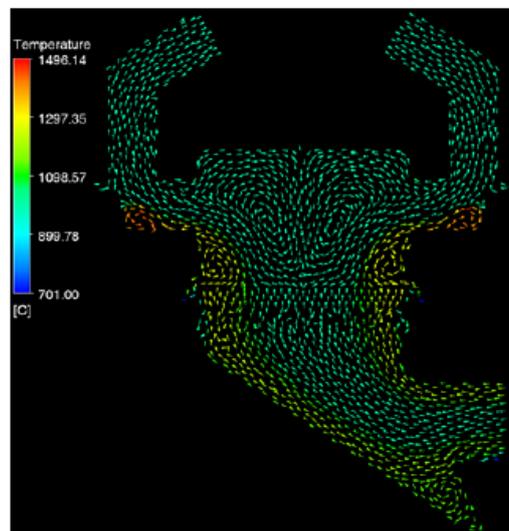
prejudicial, a denominada por Batterham<sup>(8)</sup> trajetória isotérmica da pelota. Não obstante, na prática industrial, o aporte térmico total é intensificado para garantir a qualidade e então esta singularidade ao longo da transversal do forno pode promover o desgaste prematuro e não uniforme de elementos mecânicos no interior da zona de queima, como barras de grelha e laterais dos carros de grelha. A Figura 6 mostra as barras laterais do forno danificadas devido ao intenso fluxo gasoso na região das extremidades do forno.



**Figura 6.** Desgaste abrasivo devido ao intenso fluxo na região.

Outros fatores geométricos do forno podem ainda estar associados a estes desequilíbrios do fluxo de ar aquecido, indesejados ao processo. A assimetria das caixas de vento do forno mostra-se crítica neste problema, podendo ser a causa do desgaste dos carros de grelha de forma acentuada do lado sul. Embora exista um plano de simetria na região superior da coifa da queima, esta singularidade não se repete na parte inferior do leito de pelotas. Esta geometria leva a um escoamento dos gases que leva a um desgaste mais acentuado do lado sul na posição próxima ao duto de saída para o ventilador de processo.

O efeito final do fluxo de massa é o desequilíbrio de temperaturas observado no forno (Figura 7). As intensidade de temperatura mostradas nas correntes de fluxo mostram que o centro do carro não alcança os patamares mais altos de temperatura do forno, portanto grande parte da energia empregada desloca-se para o aquecimento da carga circulante (camada de forramento lateral).



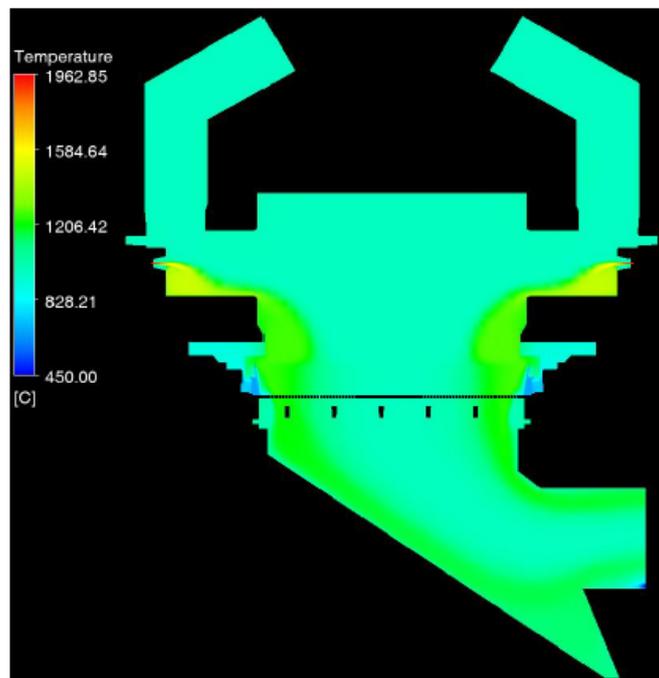
**Figura 7.** Fluxos de ar no interior do forno com destaque ao gradiente de temperaturas.

Devido ao principal elemento de perda de carga ser o próprio leito de pelotas, o perfil de velocidades ainda indica uma forte área de recirculação dos gases da região central do forno que leva finos de minério ao teto do forno gerando desgaste químico do teto (Figura 8).



**Figura 8.** Exemplo de formação de escória da reação do refratário com o minério de ferro.

O efeito resultante do fluxo de gases demonstrado anteriormente é direto no perfil de temperaturas no interior do leito de pelotas e mesmo sobre as barras de grelha, que irão por consequência apresentar um sobreaquecimento e ciclos de temperatura mais alto resultando em um desgaste abrasivo excessivo nesta região. Este perfil de temperaturas fica claro através da Figura 9.



**Figura 9.** Contornos de temperatura ao longo da seção do forno.

A Figura 10 mostra conjuntamente a influência do fluxo de massa que atravessa o leito de pelotas e a temperatura por barra de grelha. Ocorre uma larga distribuição de vazões ao longo da transversal do leito de pelotas e portanto o desequilíbrio de vazão na coifa do forno leva a uma heterogeneidade nesta região. É importante

destacar que as regiões de fluxo acentuados também apresentam temperatura superiores. Este efeito ocorre com destaque para região compreendida em cerca de 8 barras de grelha a partir da primeira “barra cega”, que apresenta hoje um desgaste excessivo.

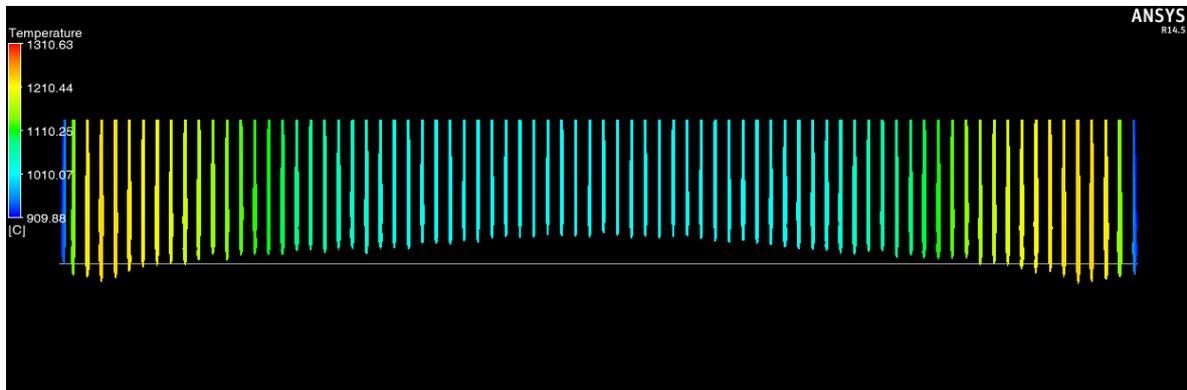


Figura 10. Gráfico de Barras com intensidade de fluxo de massa e temperatura.

Não obstante o deslocamento de massa em alta velocidade na região para o processo de desgaste das barras de grelha, também o fluxo dos produtos de combustão oriundo dos queimadores desloca-se próximo à parede do forno Figura 11. Uma análise do escoamento multicomponente dos gases que não pode ser desprezado o efeito da relativa concentração de vapor superaquecido (fração molar de 0,04-0,07, com temperaturas superiores a 1.000°C) nesta região que se torna um poderoso agente com grande importância na geração de desgaste nas barras de grelha.

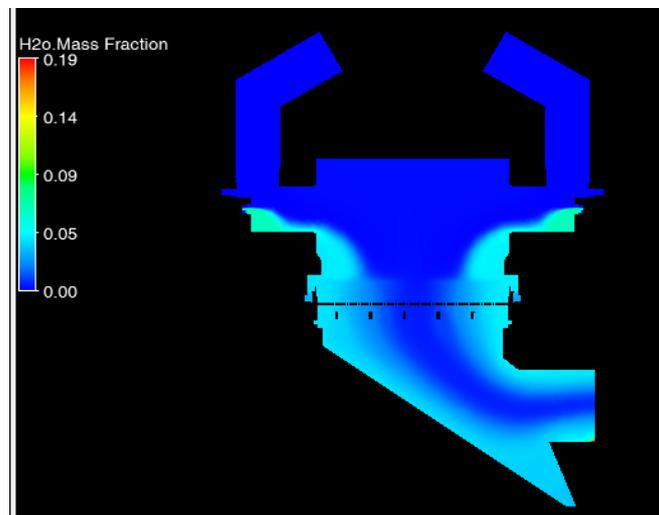
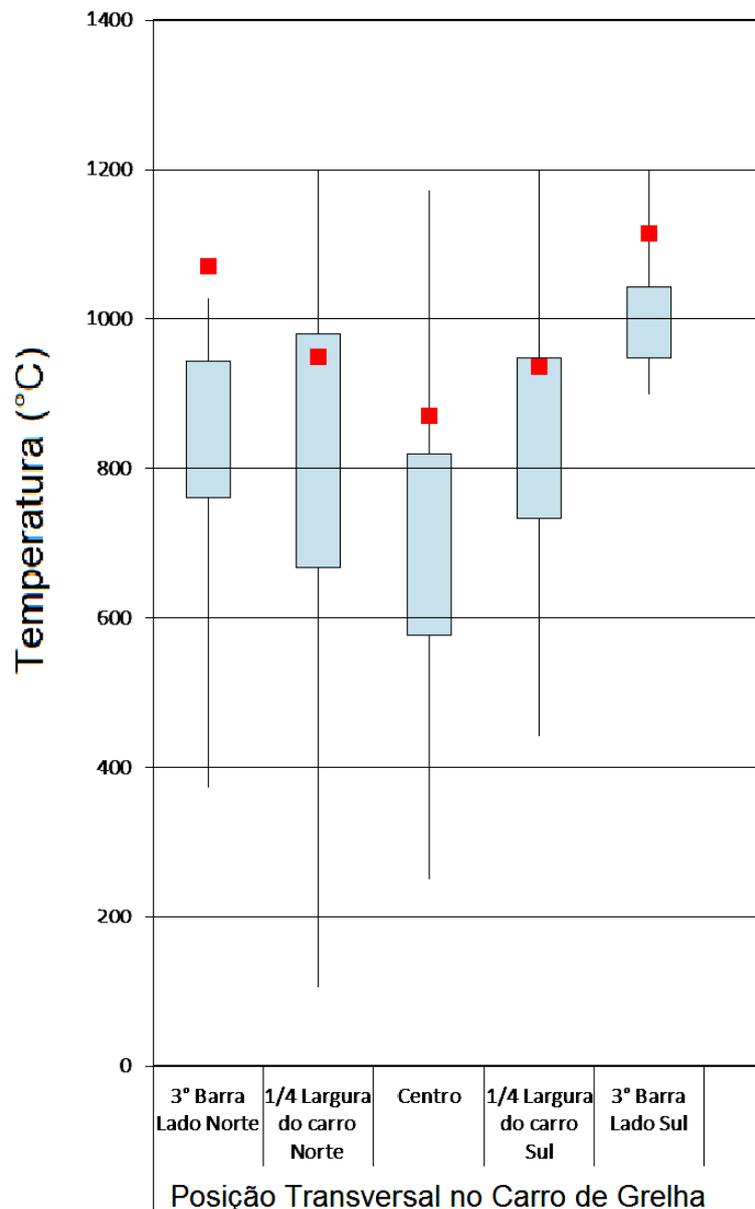


Figura 11. Concentração de vapor de água ao longo do forno.

#### 4.2 Validação do Modelo Proposto e Análise das Medições de Temperatura

Foram realizados 30 dias de monitoramento contínuo de dados de temperaturas dos carros de grelha de forma a estabelecer limites de “burnthrough” do leito de pelotas durante os ciclos do carro de grelha. A Figura 11 mostra os Box-Plox com a distribuição de temperaturas na camada de fundo de pelotas em diferentes posição na transversal do carro de grelha. Adicionalmente os pontos são as temperaturas atingidas pelo modelo proposto. A tendência da curva é semelhante à mediana dos dados coletados no final da zona de queima do forno, ponto no qual é o final do

regime estacionário na queima. O erro entre o valor medido e o calculado esta associado ao não atingimento do pleno regime de temperaturas no interior do leito de pelotas e adicionalmente ao tempo de resposta dos termopares não ser suficiente, já que são subitamente o carro é resfriado no inicio do resfriamento.



**Figura 12.** Validação Industrial do modelo proposto e mapeamento das temperaturas do carro de grelha.

## 5 CONCLUSÃO

Foi possível através de uma abordagem bidimensional em regime permanente caracterizar o perfil fluidodinâmico em um forno de pelotização. Assim o modelo possibilitou identificar uma irregularidade no perfil de velocidade e por consequência também de temperaturas que é uma das principais fontes de desgaste de barras de grelhas dos carros de grelha.

Um sistema de medição de temperatura robusto e confiável foi desenvolvido para medição contínua e on-line das temperaturas do forno e validação do modelo proposto.

## REFERÊNCIAS

- 1 MEYER, K., *Pelletizing of Iron Ores*, Düsseldorf: Springer-Verlag mbH, 1980, p 205.
- 2 NUNES S.F., Influência da Carga Circulante do Pelotamento na Qualidade Física das Pelotas Cruas e Queimadas da Samarco Mineração, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2007, 133p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 3 PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Washington: McGraw Hill Book Company, 1980, 197p
- 4 THURLBY, J.A., R.J. Batterham, R.E. Turner, Development and validation of a mathematical model for the moving grate induration of iron ore pellets, *International Journal of Mineral Processing*, Vol 6, n° 1, p 43-64, Junho 1979.
- 5 SESHADRI, V., TAVARES, R. P., SILVA, C. A., DA SILVA I, A Fenômenos de transporte: fundamentos e aplicações nas Eng. Metalúrgica e de Materiais, São Paulo: ABM, 2010. P 798.
- 6 NIVEN, K., R.Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid Flow in packed and fluidised beds, *Chemical Engineering Science*, Vol 57, p 527 – 534, Outubro 2002
- 7 ATHAYDE, M., NUNES, S. F., SILVA, G.A.L. , SOUSA, F.D.A. and ARIMA, M.N. , In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF IRONMAKING, 6°, 2012, Rio de Janeiro: ABM, 2012. *Novel burner design supported by cfd to minimize deposits inside combustion chambers of samarco pelletizing furnaces*. pp 100-105.
- 8 BATTERHAM R.J. Modeling the Development of Strength in Pellets, *Metallurgical Transactions B*, Londres, Vol 17B, Setembro 1986.