

## **SIMULAÇÃO DE UM FORNO INTERMITENTE ASSISTIDA POR CFD**

### **Wagner Mitio Kawaguti**

Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, CEP 88010-970, Florianópolis – SC – Brasil.  
[wagner@cet.ufsc.br](mailto:wagner@cet.ufsc.br)

### **Vicente de Paulo Nicolau**

[vicente@lmpt.ufsc.br](mailto:vicente@lmpt.ufsc.br)

### **Rafael Fernando Hartke**

[elemento@cet.ufsc.br](mailto:elemento@cet.ufsc.br)

### **Willian Anderson Lehmkuhl**

[willian@cet.ufsc.br](mailto:willian@cet.ufsc.br)

### **Tales Gottlieb Jahn**

[tales@cet.ufsc.br](mailto:tales@cet.ufsc.br)

### **Alessandro Pedro Dadam**

[alessandro@cet.ufsc.br](mailto:alessandro@cet.ufsc.br)

### **Rodolfo Savaris de Lorenzi**

[rodolfo@cet.ufsc.br](mailto:rodolfo@cet.ufsc.br)

**Resumo** Um forno intermitente, tipo paulistinha, é utilizado na queima e glazura de pisos cerâmicos. O forno possui formato circular, com seis fornalhas para a queima, distribuídas uniformemente ao longo da parede lateral. A temperatura de queima está situada por volta de 1100°C. A queima é realizada a lenha durante o pré-aquecimento e óleo BPF até o fim do processo. O forno também foi avaliado utilizando o gás natural como combustível. Devido à movimentação dos gases no interior deste forno, eles são classificados como de chama invertida. Os gases quentes são gerados nas fornalhas através da queima do combustível e são extraídos pelo piso, passando pelo interior da carga. Trata-se de um método muito antigo, que apesar da baixa eficiência, ainda é muito praticado. Uma característica bem marcante deste tipo de fornos é o forte gradiente de temperatura presente no processo. Com o uso de uma ferramenta de CFD, é feito um estudo da movimentação dos gases e transferência de calor no interior do forno. O resultado obtido é comparado com medições experimentais, onde são extraídos valores de temperaturas em diversos pontos do forno. Desta forma é possível determinar as prováveis causas da grande diferença de temperatura entre diferentes pontos da carga, sendo este problema já identificado nas medições. Tal problema faz com que o processo seja demorado, além de causar danos ao produto, deixando-o muito heterogêneo. Este trabalho mostra os perfis de velocidade e temperatura no interior do forno. Através de balanços térmicos são apresentadas as destinações de cada parcela da perda de energia gerada com a queima de combustível, bem como a eficiência do processo.

*Palavras chave:* Cerâmica Vermelha, Simulação Numérica, Gás Natural e CFD.

### **1. Introdução**

A cerâmica vermelha, classe à qual pertence o tijolo usado em nossas casas, em nossos muros, enfim na maioria das estruturas edificadas pela humanidade, nos acompanha desde tempos remotos. Segundo Resende (2001), a cerâmica deve ter sido a primeira das artes conhecidas. As olarias, fornecedoras tradicionais deste produto, especialmente no Brasil, parecem por vezes serem mais velhas que o próprio tijolo. Com ar antiquado, rudimentar, destoa em meio ao quadro de desenvolvimento tecnológico do século XXI. O tijolo e as olarias foram um marco na história da civilização. Este apresenta uma resistência quase igual à da pedra, resistindo às forças do intemperismo e aos efeitos da poluição, sendo mais resistente que o mármore que é atacado pela chuva ácida e ainda persiste diante dos padrões de estética.

Apesar de um pouco esquecida, ainda hoje a indústria cerâmica tem um papel importante no desenvolvimento da humanidade, pois está presente na grande maioria das construções que crescem na mesma proporção que o mundo se desenvolve. Em países como Itália e Espanha, este setor tem acompanhado o crescimento tecnológico dos tempos modernos. Porém no Brasil, devido à abundância de matéria prima, ao perfil do empresário e a falta de incentivo do governo, a indústria de cerâmica estrutural encontra-se estagnada, com um atraso de mais de 50 anos quando comparada aos países acima citados. Este cenário faz com que fornos intermitentes, que apesar de sua eficiência estar muito aquém dos fornos contínuos, sobrevivam e ainda sejam maioria nas olarias brasileiras.

O processo de fabricação da cerâmica consiste no aquecimento da argila, provocando transformações na estrutura do componente, conferindo-lhe resistência. Desta forma, tal processo demanda muita energia térmica para sua

execução. No processo de secagem e queima, o principal combustível usado tem sido a lenha e seus derivados, destacando-se a serragem. Também têm sido utilizados o óleo combustível (BPF) e o carvão mineral, em menor escala.

As indústrias mais desenvolvidas, por fabricarem produtos de alto valor agregado — como os produtos esmaltados — necessitam de um combustível “limpo”. Este fato justifica o uso de GLP por estas indústrias, sendo que nestas o gás natural vem ganhando espaço.

Com a chegada do gás natural na região sul do Brasil, através do gasoduto Bolívia-Brasil, viu-se a possibilidade do desenvolvimento da indústria de cerâmica vermelha no Estado de Santa Catarina. Sabe-se que, neste setor da indústria, o gás natural é usado em grande escala nos países desenvolvidos, enquanto no Brasil seu uso ainda está em fase experimental. A utilização do gás natural é uma tendência mundial, por ser um combustível mais nobre, menos poluente e em estado gasoso, facilitando o controle de sua queima. No Brasil, o uso de lenha e seus derivados como combustível na indústria de cerâmica vermelha ainda é preponderante, face aos custos quando comparados ao gás natural. Apesar das suas vantagens como combustível, o gás natural não tem penetração imediata no setor, primeiro em razão dos custos e segundo pelo desenvolvimento tecnológico alcançado pelo setor. Este desenvolvimento não é suficiente para atingir o nível de produtos de maior valor agregado, que necessitem do uso de um combustível mais nobre, que compensem um maior investimento, tanto em equipamentos quanto em combustível. Sendo renováveis, a madeira ou a lenha, encontram-se no centro de uma discussão, cujas componentes não estão completamente definidas. Não se tem uma avaliação precisa das áreas plantadas e de disponibilidade em curto e médio prazo, assim como não se tem uma avaliação precisa de quem são ou serão os seus consumidores, e de quais serão os volumes a serem consumidos. Barreiras foram impostas pela legislação ambiental, no que diz respeito às madeiras nativas, mas tem sido crescente o investimento em reflorestamento. Já no caso dos resíduos de madeira, uma ameaça ainda encontra-se no seu uso para a geração de energia elétrica, bem como a utilização destes resíduos na fabricação de produtos para a indústria moveleira, como é o caso dos aglomerados.

Neste contexto, é muito importante a realização de um estudo do comportamento térmico de fornos intermitente tipo “paulistinha”, frente à conversão para o uso de combustíveis mais nobres como o gás natural, de modo que se possa analisar a viabilidade deste processo de substituição. A escolha deste forno se deve à disponibilidade da empresa interessada em participar deste projeto.

Este trabalho consiste na simulação do comportamento térmico do forno em questão a partir de um modelo matemático desenvolvido em linguagem *fortran* apresentado por Nicolau et al. (2002). Paralelamente a esta atividade, foram realizadas simulações utilizando o software comercial *CFX 5.6*, de maneira a comparar os resultados de ambos os programas com dados experimentais obtidos em campo. Deste modo tem-se como objetivo final obter maiores informações sobre o fenômeno físico, visando a melhora do processo.

## 2. Descrição do problema

O forno estudado pertence à Cerâmica Solar, situada em Forquilha, no sul de Santa Catarina. Trata-se de um forno de alvenaria, com espessura de parede de um metro, onde se localizam seis fornalhas regularmente espaçadas. Seu interior possui 6 metros de diâmetro e sua altura varia de 1,3 metro na extremidade a 2,5 metros no centro, sendo seu teto — também conhecido como abóbada — em forma de calota. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do forno. Neste tipo de forno a tiragem dos gases provenientes da combustão é feita no piso através da depressão causada por um exaustor ou uma chaminé. Os gases quentes acumulados na parte superior do forno são succionados, passando pelo interior da carga. Por este motivo, os fornos “paulistinhas” são classificados como de chama invertida.

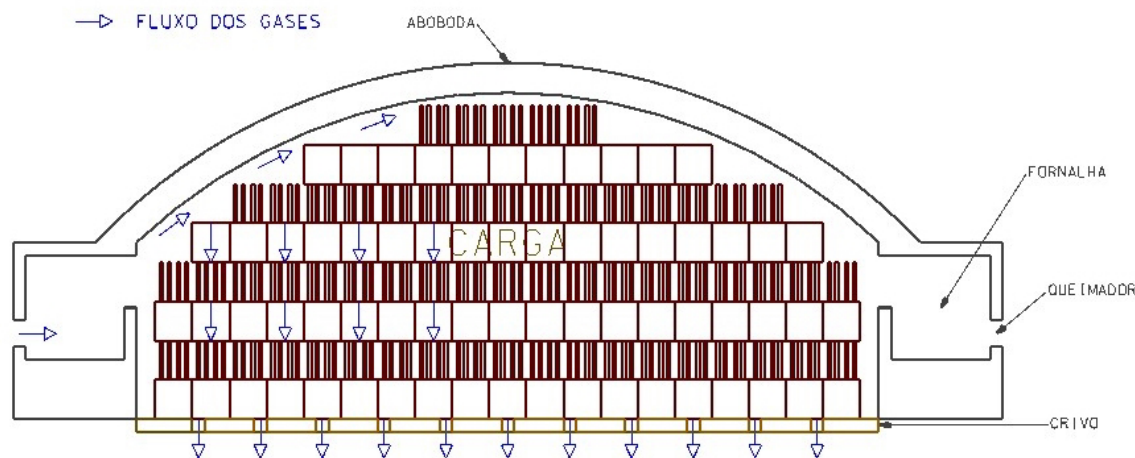


Figura 1 – Desenho esquemático do forno “paulistinha”.

O ciclo de queima deste forno tem duração média de 80 horas, sendo 32 horas de aquecimento e queima além das 48 horas de resfriamento. O processo de aquecimento é iniciado utilizando lenha como combustível. Após 6 horas passa a se utilizar óleo combustível, sendo que esta troca representa um grande inconveniente para o processo. O uso da lenha é justificado pela difícil queima do óleo a baixas temperaturas. Ao fim do aquecimento, que dura cerca de 24 horas, é feita a glasura do material. Este processo consiste na adição de sal e bórax nas fornalhas que conferirá um aspecto vitrificado às peças. O ciclo de queima também foi conduzido utilizando gás natural como combustível.

A demanda energética medida neste forno atingiu um valor superior a 2000 kcal/kg (8.370 kJ/kg - massa de material queimado), sendo que em fornos contínuos este valor gira em torno de 550 kcal/kg (2.300 kJ/kg). Grande parte desta diferença é justificada pela necessidade de ter a estrutura do forno reaquecida a cada ciclo de queima, sem o aproveitamento da energia na fase de resfriamento. Também tem importância a energia associada aos gases de combustão que é jogada ao ambiente pela chaminé, não sendo reaproveitada, como ocorre em um forno túnel. Além da baixa eficiência outro grande problema encontrado em fornos intermitentes é o forte gradiente de temperatura. As grandes dimensões do forno, aliadas ao mecanismo de aquecimento da carga fazem com que a região mais alta do forno se mantenha mais aquecida durante todo o processo de queima, fato que é amplificado pela presença de umidade residual no material, no início do processo.

Em contrapartida este tipo de fornos é mais flexível, possibilitando a fabricação de produtos com maior valor agregado, além de requerer menos investimento inicial. Este fato, aliado a falta de conhecimento dos empresários permite a maior ocorrência deste forno em relação ao tipo túnel.

### 3. Simulação numérica

Para a determinação de perdas foi utilizado o programa computacional *SIMFINT*, que simula o comportamento térmico do forno em questão, desenvolvido por Nicolau et. Al (2002). O modelo matemático descreve, através de balanços de energia e de massa, a distribuição de temperatura ao longo do tempo de todos os elementos constituintes do forno, bem como dos gases presentes no processo. Desta forma é possível conhecer os valores das perdas energéticas. Porém a distribuição do fluxo dos gases no interior do forno é arbitrada.

Como o comportamento dos gases no interior do forno é algo desconhecido, o uso de uma ferramenta de CFD, mostrou-se como uma possível solução deste problema. Assim optou-se pelo *CFX 5.6*, um pacote computacional mundialmente conhecido por sua velocidade, robustez e precisão, utilizado para simulação de transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. O *CFX* utiliza o método de volumes finitos (Maliska, 1995) para a discretização das equações da continuidade, da conservação de quantidade de movimento linear, da conservação de energia e das equações para turbulência, que precisam ser resolvidas para se obter uma solução para problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor (Bejan, 1995).

Entretanto pelas dimensões do conjunto, ficou constatado que não haveria a possibilidade de solucionar o problema como um todo, já que o forno possui 6 metros de diâmetro e a espessura das paredes das lajotas em seu interior é de um centímetro. Dessa forma, a malha necessária para representar esse material inviabiliza sua solução.

Para contornar essa questão, o domínio do problema foi reduzido ao interior do forno, excluindo a parede e a abóbada. Além disso, foi definido que todo o material a ser queimado, seria um meio poroso isotrópico, assim reduzindo o número de pontos necessários para a solução. O mesmo tratamento seria dado ao piso do forno, comumente chamado de “crivo”. Além desta hipótese simplificativa, também foi adotada a simetria angular, restando como domínio apenas uma “fatia” do forno, representando um doze avos do mesmo, apresentado na Fig. 2.

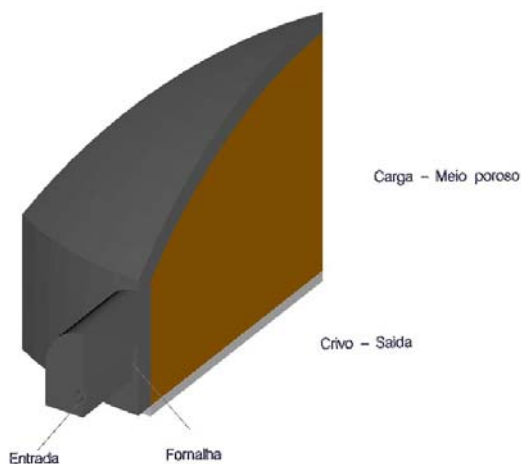


Figura 2. Representação do domínio e subdomínios de solução.

O foco do problema é a etapa de queima e de glasure do material, que têm duração média de 4 horas. A simulação foi feita em regime permanente.

### 3.1. Modelagem do Meio Poroso

Segundo Dybbs e Edwards apud Kaviany (1995), a consideração de um meio poroso pode ser feita de acordo com o número de Reynolds, baseado na velocidade média no interior do poro e no diâmetro médio do poro. Sendo assim, foi calculado o número de Reynolds do escoamento no interior da carga de material a ser queimado:

$$Re = \frac{\overline{\rho u_p d_p}}{\mu} \quad (1)$$

Onde:

$\overline{u_p}$  é a velocidade média do escoamento no poro;

$\overline{d_p}$  é o diâmetro médio do poro;

$\rho$  é a densidade do ar obtido na temperatura média do domínio;

$\mu$  é a viscosidade do ar obtido na temperatura média do domínio.

Assim:

$$Re = \frac{0,3.0,00315.0,02}{4,6.10^{-5}} = 0,41$$

Para  $Re < 1$  é utilizado o modelo de Darcy para escoamento em meios porosos. Em 1856, Darcy relacionou a perda de carga com a porosidade, viscosidade e a velocidade do escoamento, através da equação da conservação da quantidade de movimento de Darcy:

$$\vec{\nabla} p = \frac{\mu}{\overline{\overline{K}}} \vec{u} \quad (2)$$

Onde  $\vec{\nabla} p$  é o vetor perda de carga,  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $\overline{\overline{K}}$  é o tensor permeabilidade e  $\vec{u}$ , o vetor velocidade.

Em um meio isotrópico, onde  $\overline{\overline{K}}$  é constante:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\mu}{K} \vec{u}_i$$

Assim, pode-se aproximar por, na componente z,

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = \frac{\mu}{K} w$$

Logo,

$$\frac{\mu}{K} = \frac{\Delta p}{\Delta z} w \quad (3)$$

Como a carga é colocada de forma repetitiva e ordenada no interior do forno, para a obtenção desse parâmetro foi utilizado o CFX, onde foi resolvida uma região da carga, apresentada na Fig. 3, que se repete por toda sua extensão.

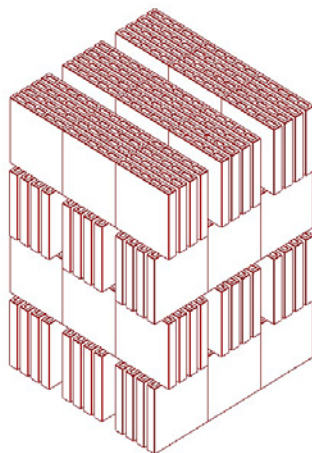


Figura 3: Empilhamento da carga.

Apesar deste empilhamento da carga apresentar características ortotrópicas em sua porosidade, para simplificar o problema foi considerado um meio isotrópico.

### 3.2. Condições de Contorno

Para simplificação do problema não foi realizada a simulação da reação de queima do combustível, ou seja os gases foram considerados como ar quente, ou mais precisamente como um gás ideal para a solução do problema. Como o fluxo de ar e a sua temperatura puderam ser medidos, pode-se determinar facilmente a condição de entrada do fluido no domínio. A condição de saída foi determinada como “openning”, e pressão constante, podendo entrar ou sair massa por essa superfície.

Como em todas as outras superfícies do domínio não há fluxo de massa atravessando-as, foram definidas como paredes, sendo a condição de fluxo de calor calculada a partir das dimensões e propriedades dos elementos que constituem o forno. A sua parede possui 1 metro de espessura e é feita de tijolo comum com condutividade de 1,5 W/m.K, e sua abóbada possui, cerca de 30 cm de camada de tijolo com mesma condutividade, mais outra camada isolante de 20 cm de cinza de arroz, com condutividade de 0,1 W/m.K, obtido experimentalmente no LMPT-EMC-UFSC. Foi considerado ainda o valor de 10 W/m<sup>2</sup>.K para o coeficiente de transferência de calor por convecção natural na superfície externa da parede.

Dessa maneira, através da equação (4), pode ser obtido um coeficiente de transferência de calor equivalente, considerando a condução na parede ou na abóbada e a convecção natural externa, sendo esse valor equivalente imposto à superfície do domínio.

$$\frac{1}{h_{eq}} = \left( \frac{1}{h} + \frac{L}{k} \right) \quad (4)$$

Para a superfície que representa a parede, o coeficiente obtido foi de 1,3 W/m<sup>2</sup>.K e para abóbada, foi de 0,4 W/m<sup>2</sup>.K.

### 3.3. Simulação do problema completo

Nas primeiras simulações com a “fatia” do domínio, permitida pela simetria, a solução do problema não foi possível pela falta do conhecimento da pressão logo após o piso do forno. Desta forma o domínio do problema teve que ser estendido até as regiões de onde se tinha conhecimento das condições de saída. Entao o domínio passou a compreender, além do forno inteiro, a chaminé e o canal que os interliga.

A Figura 4 mostra o domínio resolvido no CFX com a finalidade de se conhecer o comportamento dos gases no interior do forno. Como a geometria das fornalhas influencia diretamente na movimentação dos gases, as fornalhas também foram incorporadas ao domínio, fazendo com que o domínio abranja desde a saída dos queimadores até a saída da chaminé, as quais são condições facilmente pré-determinadas.

A Figura 5 ilustra o domínio em corte, com o intuito de mostrar os subdomínios definidos como meios porosos, onde será adicionado um termo fonte de quantidade de movimento, a partir da equação de Darcy, bem como um termo fonte na equação de energia, representando o gasto de energia térmica com o aquecimento do material.

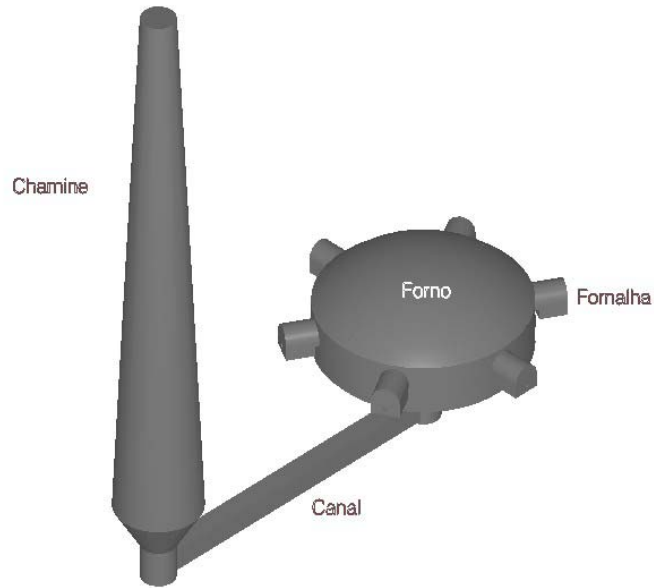


Figura 4. Domínio de solução do problema completo.

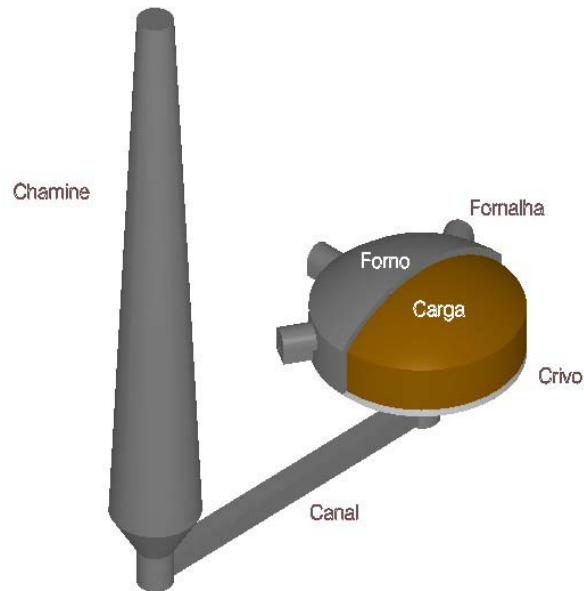


Figura 5. Domínio de solução do problema completo – com a representação dos subdomínios.

As condições de contorno para a parede e para abóbada foram mantidas, porém a mudança das fronteiras do problema implica na mudança de algumas condições de contorno. A condição de saída foi deslocada para a chaminé, onde são conhecidas as condições que o fluido se encontra. Além disso, na parede da chaminé, foi considerada a mesma condição da parede pela sua semelhança construtiva. Para as superfícies da base e dos canais da base, as condições de contorno foram definidas como paredes adiabáticas.

#### 4. Resultados Obtidos

Inicialmente, para obter o valor da permeabilidade da carga de material a ser queimada, foi realizada uma simulação de uma pequena parte da pilha, já que ela se repete por toda a pilha de material. O resultado da simulação está apresentado na Fig. 6 que apresenta o campo de pressão no plano xy, para dois valores de z conhecidos, bem como a pressão média em cada plano.

Para a solução deste problema, foi gerada uma malha de 223.760 elementos hexaédricos.

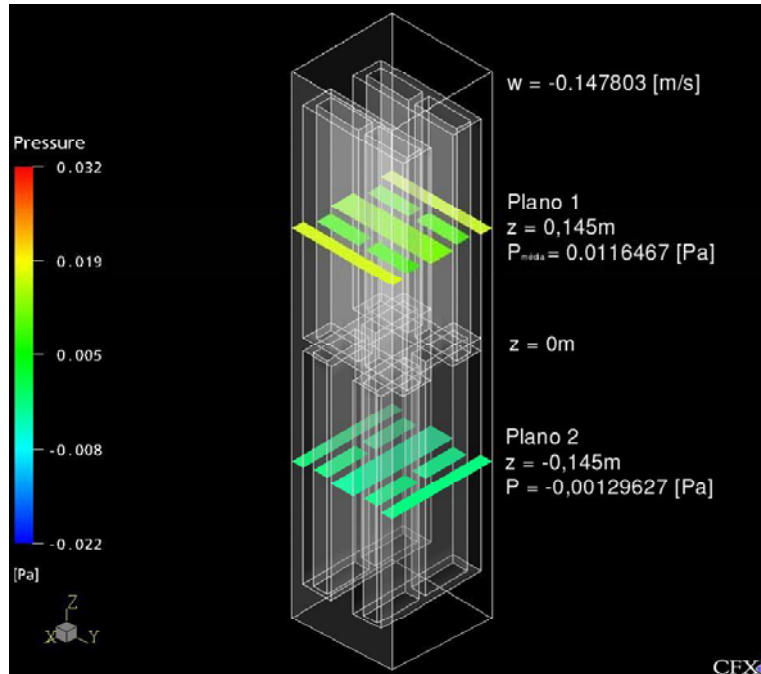


Figura 6. Distribuição de pressão nos dois planos utilizados para o cálculo da razão  $\frac{\mu}{K}$ .

A partir dos valores extraídos do CFX, é possível calcular a razão viscosidade/permeabilidade. Utilizando a equação (3):

$$\frac{\mu}{K} = \frac{\Delta p}{\Delta z} w$$

Onde:

$$\Delta p = 0,0116467 - (-0,00129627) = 0,01294297 Pa$$

$$\Delta z = 0,145 - (-0,145) = 0,29m$$

$$w = -0,147803m / s$$

Assim:

$$\frac{\mu}{K} = 0,0066kg / m^3 s$$

Portanto com esse valor é possível definir a carga no interior no forno como um meio poroso. O domínio de soluções gerou uma malha de 1.221.600 elementos tetraédricos. As Figuras 7, 8 e 9 mostram os perfis de velocidade, temperatura e os vetores de velocidade respectivamente, no plano yz, que corta o centro do forno.



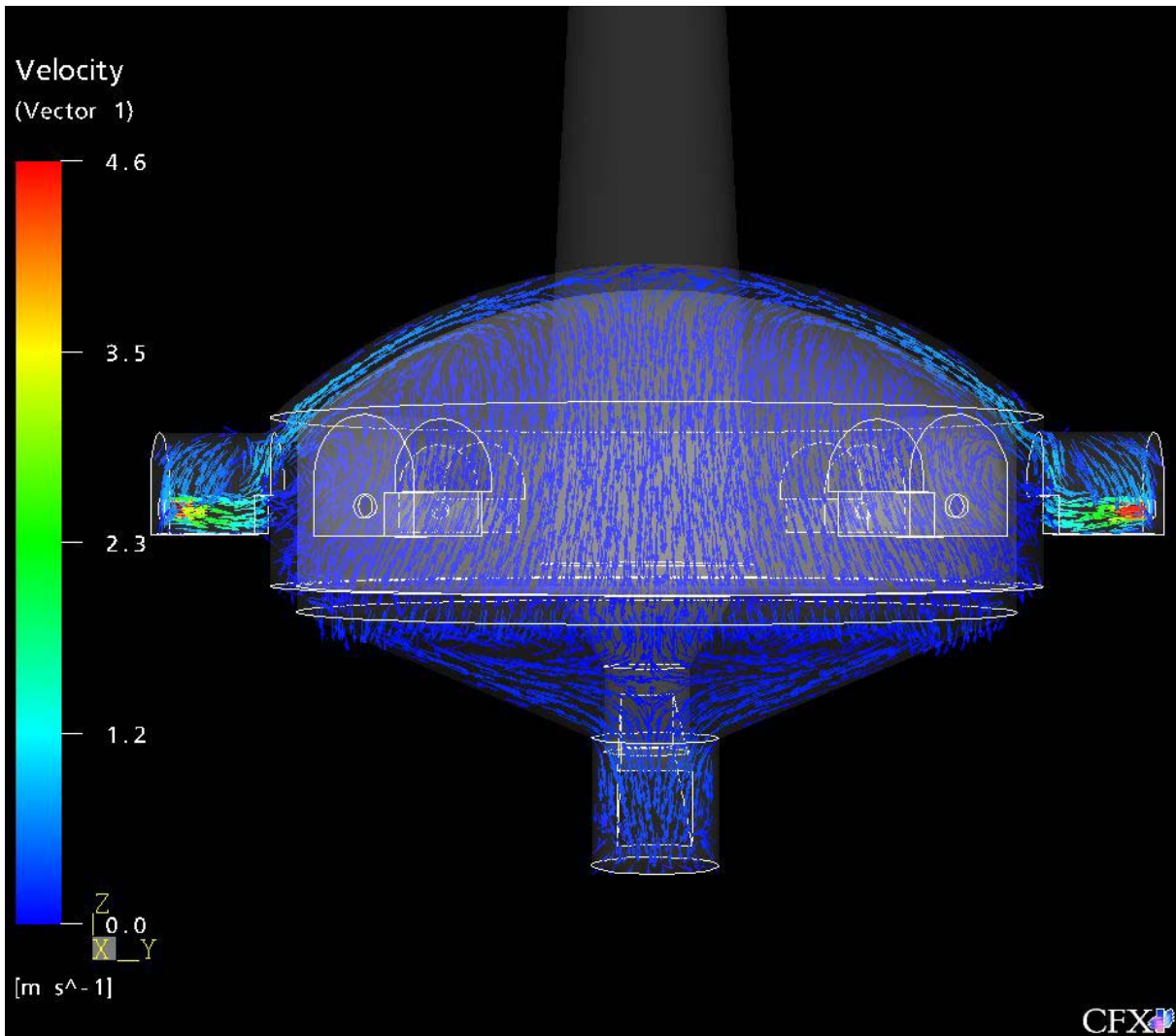


Figura 7. Vetores de velocidade no plano yz, que passa pelo centro do forno.

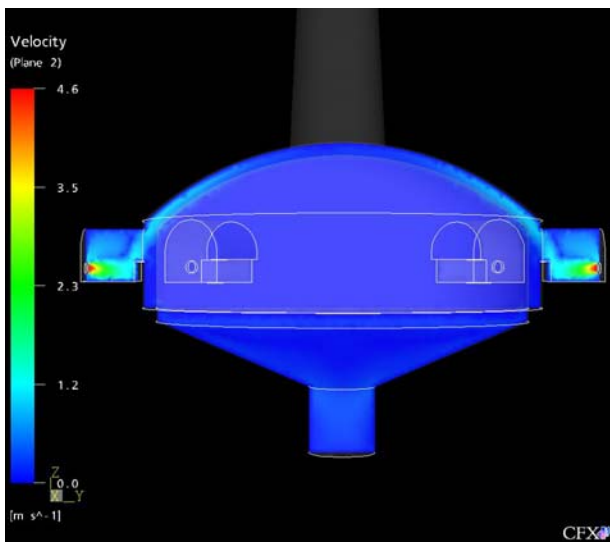


Figura 8. Perfil de velocidade.

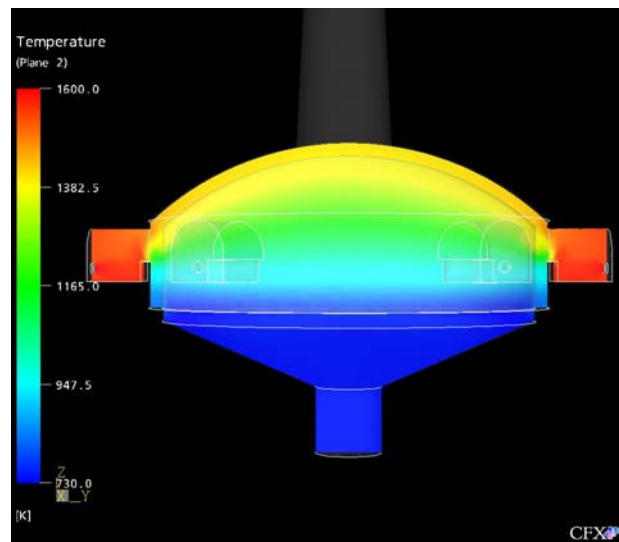


Figura 9. Perfil de temperatura.



Pode-se observar na Fig. 7 que o anteparo posicionado na frente dos queimadores direcionam o fluxo de ar quente para a parte superior do forno. Isso proporciona um escoamento predominantemente vertical, passando pelo interior da carga, como desejado. Em contrapartida, de acordo com a Fig. 9, esta movimentação dos gases gera um forte gradiente de temperatura, porém os valores não condizem com a realidade, pois o valor do termo fonte adicionado não foi devidamente quantificado.

Comparando com o perfil de temperatura apresentado na Fig. 10, extraído do programa *SINFINT*, durante a queima, com o perfil obtido pelo *CFX 5*, Fig. 9, pode-se notar a semelhança no gradiente de temperatura, porém de magnitude diferente, fato já explicado anteriormente.

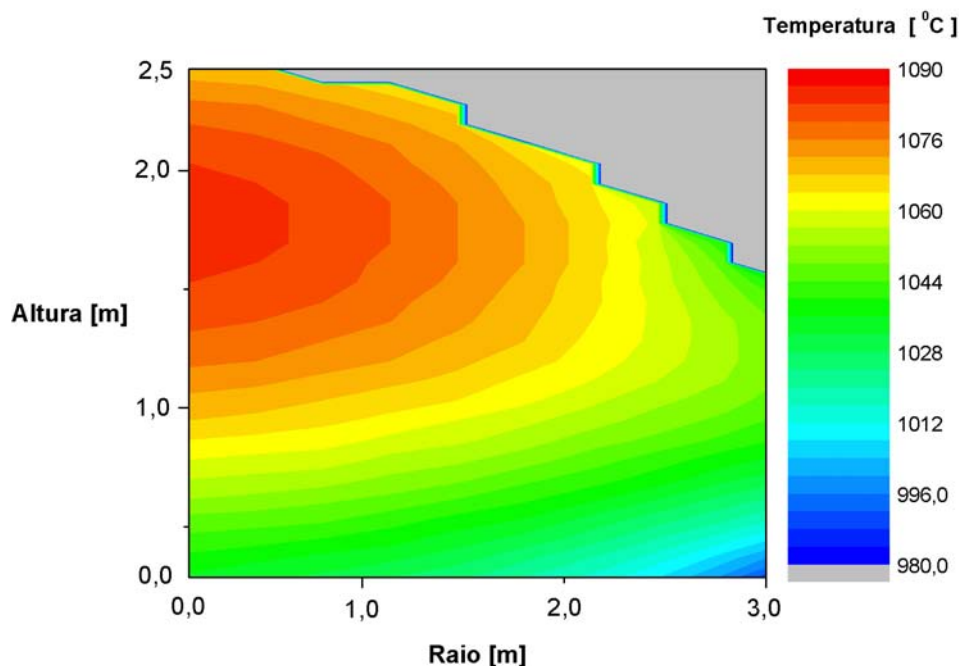


Figura 10. Perfil de temperatura simulado com o programa *SINFINT*.

Tabela 1 – Parcelas de energia despendidas no forno, durante a queima.

Parcela de energia	Energia [J]	Percentual [%]
Perdas por radiação na abóbada	9,60E+08	0,7
Perdas por convecção na abóbada	2,87E+08	0,2
Perdas por radiação na superfície externa da parede	2,23E+09	1,6
Perdas por convecção na superfície externa da parede	2,30E+09	1,6
Perdas por condução na superfície externa da parede	3,80E+07	0,0
Perdas por condução da base para o solo	2,95E+08	0,2
Perdas pela chaminé	3,36E+10	23,8
<b>Total de perdas</b>	<b>3,98E+10</b>	<b>28,2</b>
Aquecimento da carga	3,23E+10	22,9
Aquecimento dos gases do forno	1,03E+08	0,1
Aquecimento da abóbada do forno	8,99E+09	6,4
Aquecimento da parede lateral	4,32E+10	30,6
Aquecimento do piso	5,63E+09	4,0
Aquecimento dos gases do piso	5,51E+06	0,0
Aquecimento da base	1,12E+10	8,0
Aquecimento dos gases da base	6,31E+06	0,0
<b>Total para aquecimento do forno</b>	<b>1,01E+11</b>	<b>71,8</b>
<b>Produção de energia com a queima do combustível</b>	<b>1,41E+11</b>	<b>100,0</b>

O *SIMFINT* simula todo o funcionamento do forno desde aquecimento da carga até seu resfriamento. Por isso é capaz de quantificar toda perda de energia com boa concordância, segundo Nicolau et. al. (2002). A Tabela 1 apresenta as parcelas de energia despendidas por cada mecanismo de perda presente no processo. A identificação das perdas é muito importante para a melhora do processo. Como exemplo, está sendo realizado um estudo de reaproveitamento dos gases de exaustão, já que representam 23,8% de toda energia despendida no processo.

## 5. Conclusões

Os resultados obtidos com a simulação do forno completo foram satisfatórios. Mostraram a direção e sentido predominante do fluxo dos gases no interior do forno. Apesar de pouco representativa, a análise térmica mostrou o gradiente de temperatura existente neste tipo de fornos. Assim, a equação de Darcy se mostra como uma boa alternativa para a simplificação do problema em questão, representando o fenômeno físico.

Tendo em vista a grande dificuldade de medições, o uso da tecnologia de CFD se mostrou como uma poderosa ferramenta no conhecimento do comportamento dos gases nesta aplicação, mesmo se tratando de um problema de grandes dimensões.

Os resultados de perdas são de grande valia para futuros estudos de otimização do processo, por identificar os mecanismos de perdas mais relevantes.

## 6. Agradecimentos

O presente artigo foi realizado com recursos do Projeto Multicliente PMC 06, aprovado no âmbito da REDEGÁS – Rede de Excelência do Gás Natural, envolvendo as empresas parceiras: Petrobrás S.A., Transportadora do Gasoduto Bolívia-Brasil (TBG) e a Companhia de Gás de Santa Catarina (SCGÁS).

Os autores Wagner Mitio Kawaguti, Tales Gottlieb Jahn, Rafael Fernando Hartke e Rodolfo Savaris de Lorenzi são bolsistas do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás Natural- PRH09-ANP/MME/MCT.

Os autores agradecem ainda os proprietários e funcionários da Cerâmica Solar, Forquilha-SC, onde todo o trabalho de medição e de implantação do gás natural foi realizado.

## 7. Referências

- Bejan, A., 1995, “Convection heat transfer”, 2.ed. USA: John Wiley & Sons.
- Henriques JR., M. F. et al., 1993, “Manual de conservação de energia na indústria de cerâmica vermelha”. Ministério de Ciência e Tecnologia/INT.
- Incropera, F. P., De Witt, D. P., 1992, “Fundamentos de transferência de calor e de massa”, 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.
- Kaviany, M., 1995, “Principles of Heat Transfer in Porous Media”, 2<sup>a</sup> ed., New York: Springer-Verlag.
- Kawaguti, W. M., Nicolau, V. P., Hartke, R. F., Jahn, T. G., Lehmkuhl, W. A., 2003, “Análise Numérica e Experimental de um Forno Intermitente para a Queima de Produtos Cerâmicos”. In: 2<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Rio de Janeiro, Brasil.
- Maliska, C. R., 1995, “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”. 1<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.
- Nicolau, V.P., Hartke, R. F., Lehmkuhl, W. A., Kawaguti, W. M., Jahn, T. G., Santos, G.M. 2002, “Análise numérica e experimental de um forno túnel utilizado em cerâmica vermelha”. In: ENCIT 2002 – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. Caxambú.
- Nicolau, V. P., Hartke, R. F., Jahn, T. G., Lehmkuhl, W. A., 2002, “Análise numérica e experimental de forno intermitente para a queima de produtos cerâmicos”. In: CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. João Pessoa, Brasil.
- Resende, M. P., 2001, “A Utilização da Argila Através dos Tempos” Revista Expressão n<sup>o</sup> 2.
- Santos, G. M., 2001, “Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFSC, Florianópolis, Brasil.
- Tapia, R. E. C., Villar, S. C., Henrique JR., M. F., et al., 2000, “Manual para a indústria de cerâmica vermelha”. Série uso eficiente de energia. Rio de Janeiro: SEBRAE.

## NUMERICAL SIMULATION OF A BATCH KILN ASSISTING BY CFD

**Wagner Mitio Kawaguti**

Laboratory of Combustion and Thermal System Engineering, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Santa Catarina, CEP 88010-970, Florianópolis – SC – Brazil.

[wagner@cet.ufsc.br](mailto:wagner@cet.ufsc.br)

**Vicente de Paulo Nicolau**

[vicente@lmpt.ufsc.br](mailto:vicente@lmpt.ufsc.br)

**Rafael Fernando Hartke**

[elemento@cet.ufsc.br](mailto:elemento@cet.ufsc.br)

**Willian Anderson Lehmkuhl**

[willian@cet.ufsc.br](mailto:willian@cet.ufsc.br)

**Tales Gottlieb Jahn**

[tales@cet.ufsc.br](mailto:tales@cet.ufsc.br)

**Alessandro Pedro Dadam**

[alessandro@cet.ufsc.br](mailto:alessandro@cet.ufsc.br)

**Rodolfo Savaris de Lorenzi**

[rodolfo@cet.ufsc.br](mailto:rodolfo@cet.ufsc.br)

***Abstract.** A batch kiln is used to burn and glaze ceramic floors. The kiln have circular format, with six furnaces, distributed evenly along the lateral wall. The final temperature is about 1100°C, using firewood during the preheating and fuel oil until the end of the process. The kiln was also evaluated using the natural gas as fuel. Due to the movement of the gases inside the kiln, it is classified as of “inverted flame”. The hot gases are generated in the furnaces and extracted in the floor, crossing the load core. It is a very old burning method, that, in spite of the low energetic efficiency, it is still very practiced. A very outstanding characteristic of batch kilns is the strong gradient of temperature presented in the process. Using a CFD method, it is made a study of the movement of the gases and transfer of heat inside the oven. The results are compared with experimental measurements, mainly extracted values of temperatures in several points of the oven. In such a way it is possible to determine the probable causes of the great temperature difference among different points of the load, being this problem already identified in the measurements. Such a problem increases the burn time and reduces the product quality, leaving it very heterogeneous. As an important result, this work shows gas velocity and temperature distribution inside the oven. Through a thermal analysis the destinations of each portion of consumed energy are presented, as well as the efficiency of the global process.*

*Keywords: Structural Ceramics, Numerical Simulation, Natural Gas, and CFD.*