

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE AQUECIMENTO E DINÂMICA DOS GASES NO INTERIOR DE UM FORNO INDUSTRIAL

AMELOTI, G. B; CARVALHO, S.R.

RESUMO

Propõe-se neste trabalho um estudo detalhado da transferência de calor no interior de um forno industrial do modelo RAC220 destinado à produção de carvão vegetal. Este estudo é feito através de simulações computacionais em softwares comerciais, obtendo de forma qualitativa os perfis de temperatura para diferentes configurações propostas dos fornos. Para a solução do problema utilizou-se o método dos volumes finitos para resolver numericamente as equações de Navier-Stokes, da conservação da massa e da energia. O acoplamento pressão-velocidade foi resolvido pelo método do Passo Fracionado, e o esquema temporal utilizado foi o implícito. O fluido em questão deve ser newtoniano e incompressível e foram considerados os efeitos da temperatura na variação da densidade (Aproximação de Boussinesq). Para a elaboração do código numérico, foi utilizado o software Ansys-Fluent. A construção do código é de grande utilidade, já que permite obter informações importantes sobre o aquecimento e a dinâmica dos gases no interior do forno sem que seja necessário construir um protótipo e fazer experimentos e medições no mesmo. A construção de códigos desse tipo simboliza uma grande evolução na área de mecânica dos fluidos no sentido da otimização dos processos. Através da evolução dos códigos e das novas metodologias que vão surgindo, cada vez mais se dispõe de mais opções no tratamento de problemas de mecânica dos fluidos. As simulações foram realizadas no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Universidade Federal de Uberlândia.

Palavras-Chave: Simulação Computacional, Transferência de Calor, Forno Industrial, Processo de Otimização.

1 – FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica, Bloco 5P, Uberlândia – MG, CEP38400-902 – gui.ameloti@gmail.com

2 – FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica, Bloco 5P, Uberlândia – MG, CEP38400-902 – srcarvalho@mecanica.ufu.br

NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF HEATING AND GAS DYNAMICS WITHIN AN INDUSTRIAL OVEN

AMELOTI, G. B.; CARVALHO, S. R..

ABSTRACT

It is proposed in this paper a detailed study of heat transfer inside a kiln RAC220 model for the production of charcoal. This study is done through computer simulations in commercial software, resulting in a qualitative temperature profiles for different configurations of the proposed ovens. To solve the problem we used the finite volume method to numerically solve the Navier-Stokes equations, the conservation of mass and energy. The pressure velocity coupling was solved by the method of Step Fractional, and temporal scheme used was implicit. The fluid in question must be Newtonian and incompressible and considered the effects of temperature on the variation of density (Boussinesq approximation). In preparing the numerical code, we used the software Ansys-Fluent. The building code is very useful, since it provides important information about the heating and dynamics of gas inside the oven without having to build a prototype and do the same experiments and measurements. The construction of such codes symbolizes a major progress in the area of fluid mechanics towards the optimization of processes. Through the development of codes and new methodologies that are emerging, increasingly have more options in treating problems of fluid mechanics. The simulations were performed at the Laboratory of Fluid Mechanics, Federal University of Uberlândia.

Keywords: Computer Simulation, Heat Transfer, Industrial Oven, Process Optimization.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca entre as economias industrializadas pela elevada participação das fontes renováveis em sua matriz energética. Isso se explica por alguns privilégios da natureza, como uma bacia hidrográfica contando com vários rios de planalto, fundamental a produção de eletricidade, e o fato de ser o maior país tropical do mundo, um diferencial positivo para a produção de energia de biomassa (OLIVEIRA JR; FARINAS E MARINO, 2008).

Portanto, a produção do carvão vegetal é muito discutida e apresenta inúmeros fatores contrários à sua produção. O carvão vegetal ainda é atrelado ao desmatamento de florestas nativas, às baixas condições de trabalho e muitas vezes associado ao trabalho escravo.

Por outro lado, o valor da produção primária florestal do país, em 2006, houve um aumento de 6,8%. Deste total, 66,0% foram provenientes da silvicultura (exploração de florestas plantadas). Já o extrativismo do carvão caiu 15,7%, revertendo a tendência de crescimento desde 1998. A atividade de produção de madeira de florestas plantadas concentra-se nas Regiões Sudeste e Sul e a Região Norte destaca-se pelo extrativismo vegetal. (IBGE).

No Brasil, o carvão vegetal ainda continua sendo utilizado de forma sistemática. Ele está longe de ser o combustível mais utilizado no país, mas mesmo assim apresenta ser um combustível muito utilizado quando comparados aos países considerados de primeiro mundo.

Segundo o Instituto Aço Brasil (2011), a produção brasileira de aço bruto em junho de 2010 foi de 2.850.000 toneladas contra 2.962.200 toneladas em 2011. O resultado foi 3,9% maior do que o registrado no mesmo mês do ano passado. Já para o ferro-gusa, foram produzidas em junho de 2010, 2.679.300 toneladas sendo que no mesmo mês de 2011 este número foi de 2761500 toneladas. Para este produto houve um aumento de 3,1% quando comparado. E este número vem se mostrando positivo desde o final da crise mundial 2008.

No Brasil, o setor onde se mais utiliza o carvão vegetal, é o setor siderúrgico, no qual sua principal utilização é como termo-redutor, na produção do aço, fornecendo tanto energia para o processo, quanto participa de forma direta na redução do óxido de ferro.

Em 2009, o setor de ferro-gusa e aço foi responsável pelo consumo de 68,6% de todo o carvão disponível no país (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2010). E este consumo tende a aumentar, sendo que neste mesmo ano, o setor industrial, principal responsável pelo consumo de carvão vegetal, aumentou o seu consumo energético em 13%. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011).

Apesar desta crescente evolução das siderurgias e com o aumento do consumo energético industrial, as empresas produtoras de carvão vegetal, em sua grande maioria energética ainda continuam a usar tecnologias ultrapassadas e de baixa eficiência para a produção deste insumo.

Atualmente, os fornos retangulares ACESITA (RAC) com capacidade de enfiar 220 m³ de madeira em seu interior, são largamente utilizados por diversas empresas. Apesar do processo de entrada de madeira e retirada do carvão ser mecanizado em tais fornos, pouca tecnologia

adicional e eficaz se encontra disponível. Devido ao grande volume interno do forno, disposição das chaminés e bocas de fogo, torna-se muito difícil controlar a temperatura em seu interior e assim promover homogeneidade na queima da madeira e a produção de carvão de qualidade. Na literatura são encontrados diversos trabalhos científicos cujo objetivo principal é propor adequações a estes fornos para melhorar a qualidade do produto e reduzir os impactos ambientais. No entanto, a maioria dos trabalhos são práticos, ou seja, estão relacionados à tentativa de adaptar novas tecnologias nos fornos e testar seus efeitos na produção. Poucos são os estudos voltados para a simulação térmica e da dinâmica dos gases no interior dos fornos. Nesse sentido, este trabalho propõe o estudo e implementação computacional de um modelo térmico bidimensional a fim de simular a dinâmica dos gases no interior de um forno de alvenaria RAC 220. Por meio de tal estudo, espera-se compreender o comportamento dos gases quentes no forno para assim homogeneizar o perfil de temperatura em seu interior. Ao final desta linha de pesquisa, espera-se desenvolver ferramentas que possam auxiliar no projeto e implantação de novas tecnologias em fornos de alvenaria do tipo RAC 220 e, assim, garantir carvão de qualidade em todas as zonas do forno bem como minimizar a formação de tiços e finos em seu interior.

2. REVISAO BIBLIOGRAFICA

O carvão vegetal é proveniente de um processo químico, tendo como matéria prima a madeira. Basicamente, o carvão vegetal é constituído em sua quase totalidade de carbono, portanto podem-se encontrar outros elementos: K, Al, Mg, Fe, Na, Ca, Mn (MORALES, 1999). Seu primeiro registro é estimado em torno de 32 mil anos atrás, mas não se sabe este era produzido de forma deliberada (UK AGRICULTURE, 2009).

Já nos dias de hoje, pequenos produtores de carvão vegetal, normalmente utilizam fornos construídos de alvenaria revestidos de barro. Esses fornos normalmente são feitos em barrancos ou na terra (Fig. 2.1) e não possuem formatos padronizados. Suas formas e tamanhos distinguem de uns para outros, fazendo com que o processo seja muito irregular e que seja dependente de forma direta de seus operadores. Geralmente, esses fornos possuem poucas tecnologias envolvidas, como mecanização e instrumentos de medição das variáveis importantes ao processo, prejudicando tanto o rendimento quanto à qualidade final do produto (OLIVEIRA, 2009).



Figura 2.1 - Forno de encosta (PENDORADA, 2010).

Predominantemente, as indústrias de grande escala de produção de carvão vegetal, utilizam fornos de alvenaria de tamanhos variados, de acordo com a necessidade de produção. Atualmente os mais utilizados são os fornos retangulares, cujo processo pode ser mecanizado. Porém o processo ainda é realizado de forma primitiva sendo que também nestes casos, os fornos possuem poucos instrumentos capazes de fornecer dados precisos ao processo de carbonização da madeira.

Outra notável diferença entre os grandes e pequenos (Fig. 2.2) produtores de carvão vegetal, é que o processo de carbonização dos grandes produtores é padronizado (práticas operacionais e a madeira enforada), no entanto, os fornos utilizados possuem maior capacidade, dificultando o controle do processo.

Atualmente, nessas indústrias, o cálculo da produtividade é obtido pela estimativa do volume de madeira enforada com o volume de carvão retirado do forno. Esse cálculo de produção torna-se uma medida não confiável, pois o volume de madeira enforado está diretamente ligado a fatores subjetivos, como a experiência dos operadores, posicionamento da madeira dentro do forno (OLIVEIRA et al., 2010), entre outros. Para um cálculo da produção de forma mais precisa é necessário a utilização do cálculo do rendimento gravimétrico, que é dependente da massa da madeira e da massa do carvão produzido a cada ciclo.

O desenvolvimento de modelos numéricos e procedimentos experimentais para controlar qualquer tipo de equipamento são fundamentais para a obtenção de lucro, produtividade e qualidade do produto. Especificamente em fornos de carvão vegetal, onde alguns problemas tais como, a previsão do tempo de produção, o tempo de secagem da madeira verde e os procedimentos para o controle da homogeneidade da carbonização são fundamentais e de difícil execução (MULINA et al., 2009).



(a)



(b)

Figura 2.2 - Comparação entre as dimensões dos fornos utilizados pelos pequenos produtores (a) forno rabo-quente (IMOPEC, 2011) e os utilizados pelos grandes produtores de carvão vegetal (b) fornos retangulares – modelo RAC220.

Normalmente, algumas variáveis importantes que controlam o processo como a abertura e fechando da chaminé, umidade da madeira e tempo de resfriamento do carvão vegetal também estão ligadas às experiências práticas dos operários.

De acordo com GOMES e OLIVEIRA. (1982), a madeira quando submetida a altas temperaturas, sofre uma série de transformações nas quais vários componentes são modificados. Já TRUGILHO e SILVA. (1998) afirmam que a carbonização da madeira envolve fenômenos complexos que tornam possíveis a geração de um alto número de composições. Sendo assim, a temperatura é uma grandeza de extrema relevância no processo de produção do carvão vegetal, sendo que esta é responsável por alterações dos parâmetros químicos e físicos (OLIVEIRA 2009).

Alguns estudiosos se baseiam na temperatura para dividir o processo de carbonização da madeira em quatro fases (MEDEIROS e RESENDE, 1983) e (OLIVEIRA, VIVACQUA e MENDES, 1982: abaixo de 200°C – secagem da madeira verde; 200°C a 280°C - reações de endotérmicas: liberação de ácido acético, metanol, água, gás carbônico entre outros; 280°C a 500°C - reações exotérmicas: liberação de gases combustíveis como monóxido de carbono e o metano, além do alcatrão; acima de 500°C - liberação de quantias pequenas de gases voláteis, como o hidrogênio em especial.

Em todas essas fases apresentadas, é verificado que a análise térmica do processo é essencial para a qualidade do carvão vegetal. Tais fatos justificam o desenvolvimento de tecnologias a fim de homogeneizar tal parâmetro no interior dos fornos.

MULINA (2009) desenvolveu um sistema supervisório voltado à produção de carvão vegetal e, OLIVEIRA (2009) mostrou que com este sistema é possível desvincular o processo de aspectos subjetivos, relacionados à prática dos carbonizadores, podendo assim diminuir o tempo do ciclo de carbonização e aumentar o rendimento da produção de carvão vegetal. Além disso, o autor mostrou em seu estudo que é possível, através da instrumentação térmica em diferentes modelos de fornos de alvenaria, estabelecer uma relação entre temperatura e a qualidade do carvão. Estas correlações possibilitaram a diminuição significativa de erros operacionais durante o processo.

Muitos são os estudos baseados em sistemas alternativos de carbonização da madeira em escala piloto, incluindo a construção e teste de protótipos instrumentados com termopares para verificar o perfil térmico no interior do forno. Outros aplicam tecnologias capazes de reduzir a emissão de poluentes na atmosfera (LÚCIO, 2006). Também há estudos que mostram a influência da geometria dos fornos na qualidade final do carvão (MOREIRA, 1964). Nesse

sentido, diversos pesquisadores vêm buscando soluções para melhorar o processo de produção como, por exemplo, o uso de fornos metálicos (Figs. 2.3 e 2.4).



Figura 2.3 - Forno container.



Figura 2.4 - Forno metálico modelo DPC (LÚCIO, 2006)

Atualmente, os fornos metálicos são o que há de mais moderno, no entanto o custo de implantação é elevado quando comparado aos fornos de alvenaria. Nesse sentido, muitas

empresas produtoras de carvão vegetal que já possuem fornos de alvenaria consideram inviável a substituição pelos fornos metálicos. Dessa forma as empresas buscam soluções mais econômicas como, por exemplo, instalar adaptações nos fornos para melhorar o processo produtivo conforme apresentado na Fig. 2.5.



Figura 2.5 - Adaptações em fornos retangulares de alvenaria (RAAD, COSTA E WINTER, 2008): a) Instalação de termopares; b) Uso de gaseificadores.

Tais adaptações são, no entanto, baseadas em empirismo e muitas vezes possuem custos elevados e não oferecem os benefícios esperados. Dessa forma, investir em alternativas como modelagem computacional pode ser uma solução na concepção e implantação de grandes projetos.

Atualmente diversas áreas do conhecimento fazem uso de simulações numéricas para analisar problemas sejam eles biológicos, químicos, físicos ou econômicos. Na engenharia tal linha de pesquisa é aplicada em praticamente todos seus segmentos. Em engenharia mecânica, por exemplo, este recurso é utilizado em todas as suas áreas: vibrações, projetos de máquinas, tribologia, processos de fabricação, mecânica dos fluidos, transferência de calor entre outras.

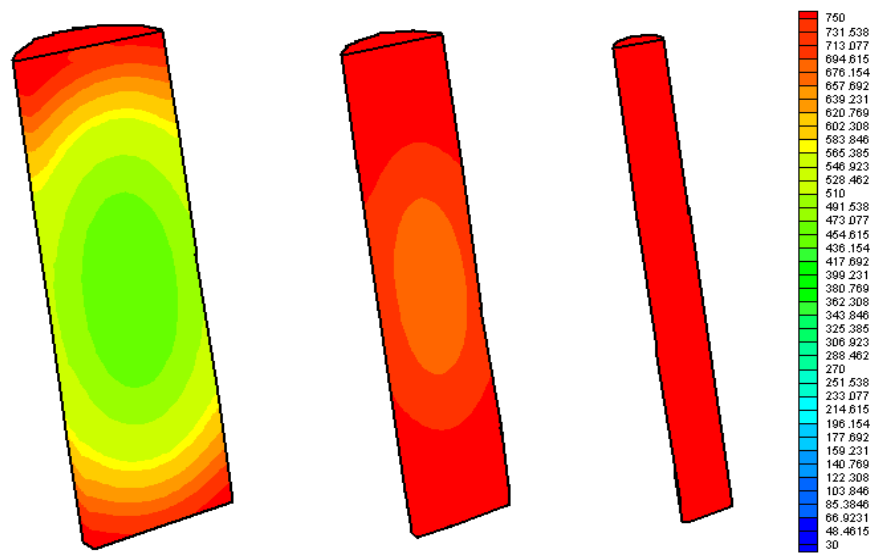
A modelagem numérica se faz presente também na produção de combustíveis e energia. Nos últimos anos o Brasil aumentou a sua produção de petróleo, tornando-se auto-suficiente. Com isso, estudos voltados à destilação de petróleo também são crescentes. Para fabricação da gasolina, os fornos de craqueamento são constantemente modelados. O coque ao se depositar ao longo das serpentinas dos fornos é responsável pela elevação de pressão e da temperatura. O efeito de cada agente isoladamente não é conhecido quantitativamente. Nesse sentido,

OLIVEIRA JÚNIOR (2008) propôs a construção de um modelo computacional do processo, confrontando-o com os resultados de uma fornalha industrial.

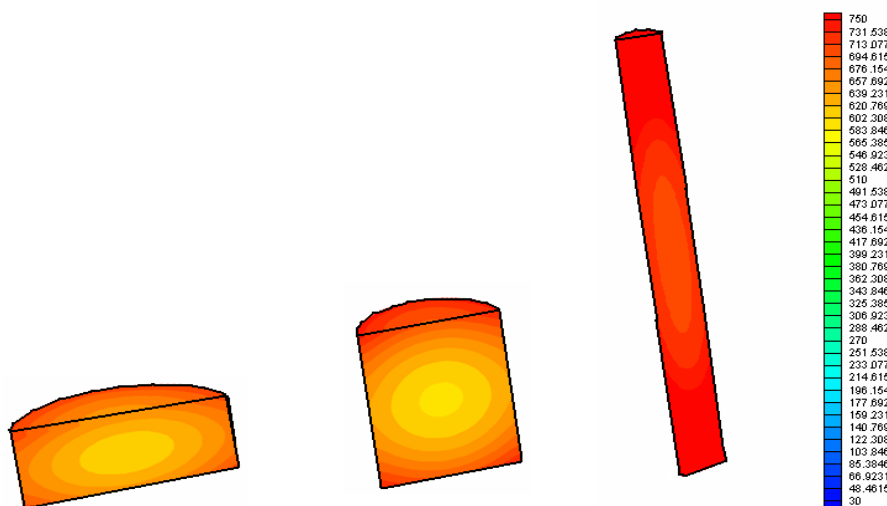
No setor siderúrgico diversos modelos são aplicados para o estudo dos fornos. RESENDE e MALISKA. (2007), por exemplo, realizaram um estudo em um alto forno no qual foi aplicada a simulação numérica no canal de escoamento do gusa a fim de verificar o desgaste do revestimento refratário. Com isso, esclareceram dúvidas sobre as características do escoamento, visualização dos perfis de desgaste e as zonas mais afetadas. GANDRA et al. (2009) realizou um estudo bem similar, no qual foi analisado o escoamento no cadinho do alto-forno. MIRANDA, ZIVIANI E FULLIN JÚNIOR (2006) desenvolveram um modelo tridimensional para o aquecimento de placas em um forno destinado à tratamentos térmicos denominado Walking Beam. Neste trabalho, o autor fez o uso do método das diferenças finitas para obter o perfil térmico do forno e então realizar ajustes importantes no equipamento, melhorando a qualidade do produto.

No processo de produção de carvão vegetal, RAAD (2004) simulou a etapa de secagem e carbonização da madeira. Em seu estudo, o autor analisou a velocidade de propagação do calor em toras de madeira durante os ciclos de carbonização. Outro estudo similar é apresentado por OLIVEIRA (2009) que através do software DPT, desenvolvido por BORGES (2008), simulou o aquecimento de toras de madeira, determinando graficamente os perfis térmicos de diferentes espessuras e comprimentos de toras, conforme mostrado pela Fig 2.7.

FRANÇA (2002) propõe um modelo matemático bidimensional para simular o processo de resfriamento natural de um leito de carvão vegetal no interior de um forno retangular de carbonização de madeira. O objetivo foi compreender os fenômenos de troca de calor relevantes, de forma a embasar futuras melhorias, visando reduzir o tempo total de resfriamento do forno. Neste caso, o autor apresenta uma solução numérica a partir do método das diferenças finitas. O estudo indicou que a velocidade do vento e a redução da espessura do teto exercem pouca influência sobre o tempo total de resfriamento, ao contrário do efeito da redução da espessura da parede.



(a)



(b)

Figura 2.7 - a) Perfis térmicos em toras de diversos diâmetros; b) Perfis térmicos em toras de volume semelhante (OLIVEIRA, 2009)

Todas as áreas do conhecimento citadas anteriormente utilizam a modelagem computacional como um recurso eficiente e de baixo custo. No entanto, cabe salientar que são poucos os trabalhos com simulações numéricas dedicadas ao estudo do processo de produção de carvão vegetal. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo do processo de transferência de calor e da dinâmica dos gases em seu interior. O estudo será baseado em um

modelo térmico e fluido-dinâmico bidimensional simplificado, resolvido a partir do software comercial *Fluent*. A partir deste estudo espera-se ainda compreender as ferramentas matemáticas, numéricas e computacionais disponíveis, para no futuro conceber um modelo mais completo que possa ser efetivamente aplicado ao processo real de produção de carvão vegetal.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA FÍSICO E DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

3.1 Introdução

O objetivo deste projeto é simular a transferência de calor e a dinâmica dos gases no interior de um forno de alvenaria modelo RAC220 conforme mostrado na Fig. 3.1.



Figura 3.1 – Forno típico de Alvenaria modelo RAC220.

O forno analisado no presente trabalho consiste em um modelo retangular de dimensões $L \times h$, sendo L o comprimento de 25 [m] e h a altura de 5,3 [m].

Neste estudo foi desenvolvido um modelo bidimensional do forno. A Fig 3.2 apresenta as dimensões e simplificações envolvidas, enquanto que a Fig. 3.3 apresenta as condições de

contorno adotadas. Para fins de otimização no processo de simulação, o problema é dividido por um eixo de simetria, conforme apresentado na Fig. 3.3.

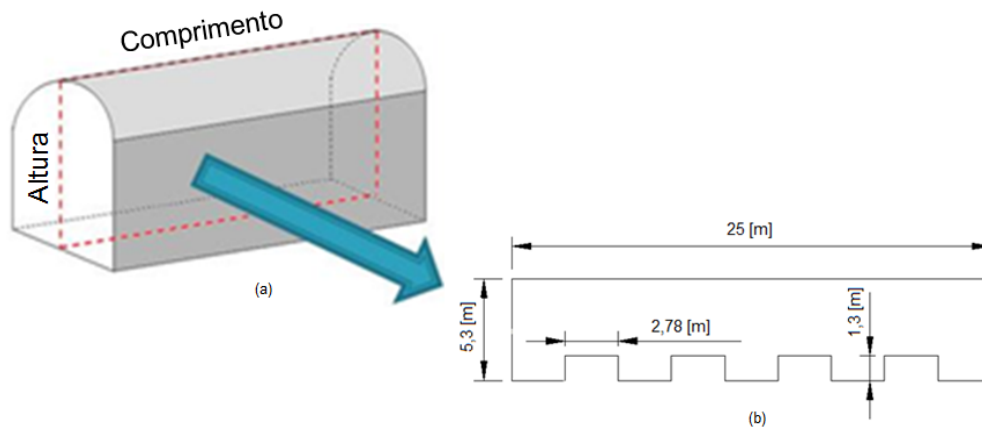


Figura 3.2 – (a) Plano do forno a ser simulado, (b) Representação do plano com suas dimensões.

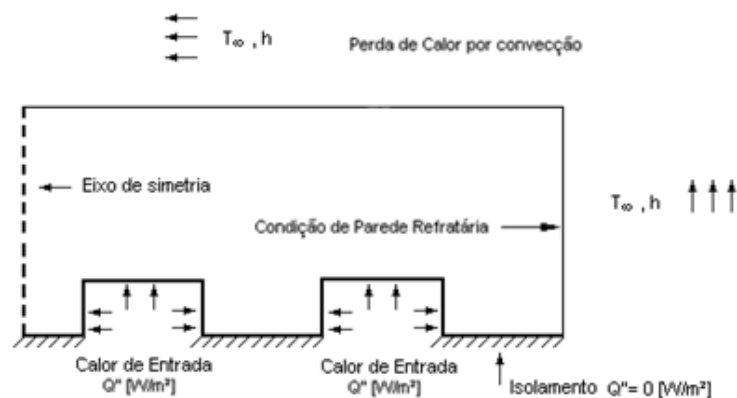


Figura 3.3 – Condições de Contorno

No modelo térmico, o calor é fornecido na parte inferior, representando as pilhas de madeira no estado de pirólise na fase exotérmica. A quantidade de pilhas de carvão, bem como a largura e altura foram adotadas com base em dados de um processo real de produção de carvão no forno em estudo, conforme apresentado na Fig. 3.4.



Figura 3.4 – Pilhas de carvão no interior do forno RAC 220 (Oliveira, 2009)

Nas laterais e na parte superior do modelo do forno são ajustadas condições de parede refratária de alvenaria, com calor específico a pressão constante $C_p=790[\text{J/KgK}]$, condutividade térmica $k=0,9[\text{W/mK}]$ e densidade de $1920[\text{Kg/m}^3]$. Além disso, considerou-se em tais domínios perda de calor por convecção natural com $h=20[\text{W/m}^2\text{K}]$ e $T_\infty=300[\text{K}]$. Para ganhos de processamento computacional, foi usada na simulação uma escala de redução de 1:100.

3.2. Modelo Matemático

A fim de se fazer uma análise térmica e do comportamento dos gases no interior do forno, fez-se o uso das equações da conservação da massa, do balanço da quantidade de movimento linear e da energia. Assim, torna-se possível obter o perfil de temperatura, o campo de velocidade, bem como o campo de pressão no interior do forno. O problema foi resolvido numericamente usando o software comercial *Fluent*. Na sequência, são apresentadas as equações, bem como as aproximações adotadas.

A equação que garante a conservação da massa em sua forma mais geral é dada por:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.1)$$

Particularizando a equação da conservação da massa para um escoamento bidimensional em coordenadas cartesianas tem-se a seguinte expressão:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

As equações que permitem determinar os campos de velocidade e pressão num escoamento são chamadas de Navier Stokes. São equações diferenciais parciais que descrevem o escoamento de fluidos Newtonianos.

Estas equações estabelecem que, mudanças no momento e aceleração de uma partícula fluída são simplesmente o produto (resultado) das mudanças na pressão e forças viscosas dissipativas (similar a fricção) atuando dentro do fluido.

Já a equação geral de Navier-Stokes, também conhecida como equação balanço de quantidade de movimento linear, é dada por:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{V} + (\rho - \rho_0) \vec{g} \quad (3.3)$$

Como pode-se observar no ultimo termo da equação de Navier-Stokes é computado a força de empuxo a qual surge por uma mudança de densidade devido ao aquecimento dos gases.

Devido ao problema em observação ser bidimensional, a equação de Navier-Stokes pode ser reescrita por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + (\rho - \rho_0) g_x \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho - \rho_0) g_y \quad (3.5)$$

Para este problema será feita uma abordagem pela aproximação de *Boussinesq*, na qual, adota-se que a densidade varia linearmente com a temperatura. Nesse sentido, de acordo com INCROPERA et al (2008), a variação de massa específica em função da temperatura à pressão constante é relacionada a uma propriedade do gás conhecida como *coeficiente de expansão volumétrica*.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3.6)$$

Tal expressão pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\rho - \rho_0}{T - T_0} \quad (3.7)$$

assim, tem-se que:

$$(\rho - \rho_0) \approx \rho_0 \beta (T_0 - T) \quad (3.8)$$

onde ρ_0 é a densidade (constante) do gás e T_0 é a temperatura.

Além disso, considerando gás ideal, o coeficiente de expansão β pode ser definido por:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{\rho} \frac{p}{RT^2} = \frac{1}{T} \quad (3.9)$$

A solução da equação do momento depende do conhecimento de T , e assim da solução da equação da energia. Sendo assim, substituindo a Eq. (3.8) nas equações da quantidade de movimento, Eq. (3.4) e Eq. (3.5), têm-se:

Navier-Stokes em x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (uu)}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g_x \rho_0 \beta (T_0 - T) \quad (3.10)$$

Navier-Stokes em y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g_y \rho_o \beta (T_o - T) \quad (3.11)$$

Sabendo previamente que é de interesse obter o perfil térmico dos gases no interior do forno, se faz necessário resolver a equação da energia que na forma bidimensional assume a seguinte forma:

$$\rho \cdot cp \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.12)$$

Para a modelagem do aquecimento no interior do forno, primeiramente aplica-se a equação do balanço da quantidade de movimento para cada volume e depois o balanço da energia, que devem ser satisfeitos de acordo com o grau de precisão estipulado. Além disso, baseado nas equações anteriores, propõe-se o uso de um modelo bidimensional incompressível para simular a dinâmica dos gases no interior do forno. Nesse sentido, deve-se fazer uso de algum método matemático e computacional para resolver o problema do acoplamento pressão-velocidade. Uma opção é o uso do método Passo Fracionado que consiste em uma forma não iterativa para a solução das equações de Navier-Stokes. Neste método, as equações do movimento (3.10 e 3.11) são resolvidas para as componentes da velocidade e a equação de Poisson é resolvida para a pressão. A equação de Poisson é construída a partir das equações do movimento e da continuidade, de forma a garantir a conservação da massa.

Basicamente, o método se resume em:

- I. Estimar as velocidades u e v no tempo $t+dt$;
- II. Com as velocidades estimadas, resolver o sistema linear (Equação de Poisson) para calcular a estimativa de P no tempo $t+dt$;
- III. Fazer a correção das velocidades estimadas e da pressão;
- IV. Verificar se a continuidade é satisfeita em todo o domínio;
- V. Voltar se necessário nas estimativas das velocidades;

VI. Avance para o próximo passo de tempo.

Através das equações apresentadas, presume-se que quando discretizadas, seja possível simular a distribuição de temperatura bem como a dinâmica dos gases do interior do forno.

3.3. Modelo Numérico computacional

Para a tarefa ser cumprida existem dois problemas a serem resolvidos: o problema de Mecânica dos fluidos e o de Transferência de Calor. Serão adotados conceitos envolvendo convecção natural e a aproximação de *Boussinesq* citada anteriormente. Considera-se ainda que as propriedades do gás, neste caso ar, variam com a temperatura.

Na sequência, apresentam-se as etapas de configuração do software *Fluent* para realizar a simulação numérica do problema envolvendo o forno destinado à produção de carvão vegetal.

Na Fig. 3.5 pode ser observada a malha numérica para o problema proposto e os parâmetros gerais da simulação, tais como: solução segregada (*Pressure-Based*), regime transiente, aceleração da gravidade e a inclusão da equação da energia na solução do problema.

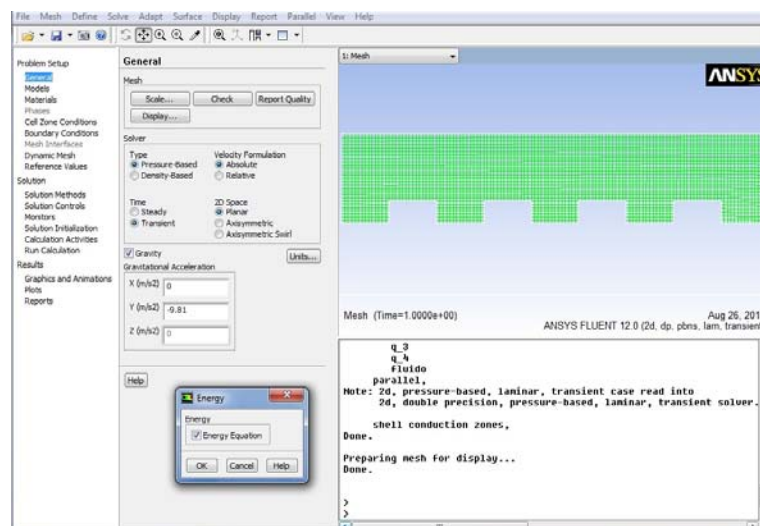


Figura 3.5 – Ajuste do *software* para os parâmetros gerais da simulação.

Na sequência, para inserir a aproximação de *Boussinesq* é necessário alterar a forma de calcular a densidade do ar no painel de edição do *software*, assim como apresentado na Fig. 3.6

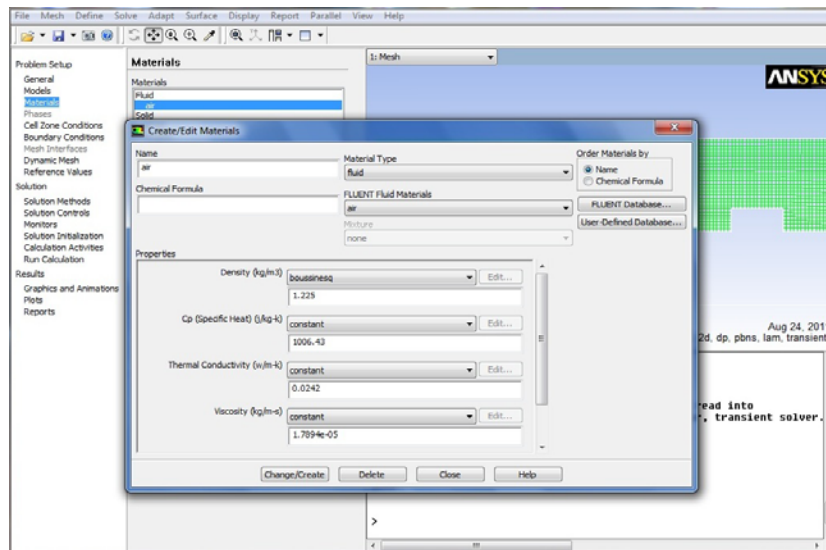


Figura 3.6 – Ajuste do método para o cálculo da densidade e propriedades físicas do ar.

Assim, para a simulação numérica do problema proposto no presente trabalho o *software* utilizado faz uso do método dos volumes finitos e de suas características conservativas no tratamento de problema de mecânica dos fluidos e transferência de calor.

No método dos volumes finitos (PATANKAR, 1980), aplicado à um problema bidimensional, o ponto em que se deseja analisar é chamado de ponto “P”, sendo que o ponto localizado logo acima é chamado de “N”, o que se encontra logo abaixo é chamado de “S” e os vizinhos da direita e da esquerda são chamados respectivamente de “E” e “W”.

O volume elementar é delimitado por 4 faces, sendo que a de cima é chamada de “n”, a de baixo de “s”, a da direita de “e” e a da esquerda de “w”, assim como mostrado na seguinte Fig. 3.7

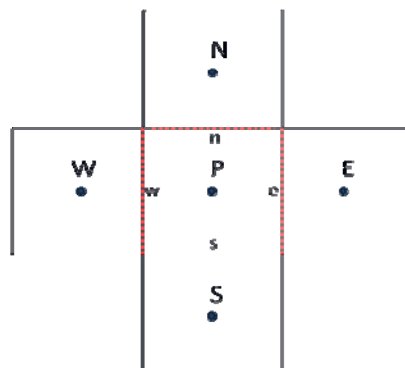


Figura 3.7 - Representação do volume elementar e seus vizinhos

Portanto, quando se deseja resolver numericamente uma única equação diferencial, a incógnita é localizada no centro do volume de controle. Quando se trata de um conjunto de equações, deve-se decidir se todas as variáveis serão localizadas no centro do mesmo volume de controle. O *software Fluent* faz por padrão o uso desse arranjo, denominado co-localizado, mostrado esquematicamente na Fig. 3.8 (MALISKA, 2004).

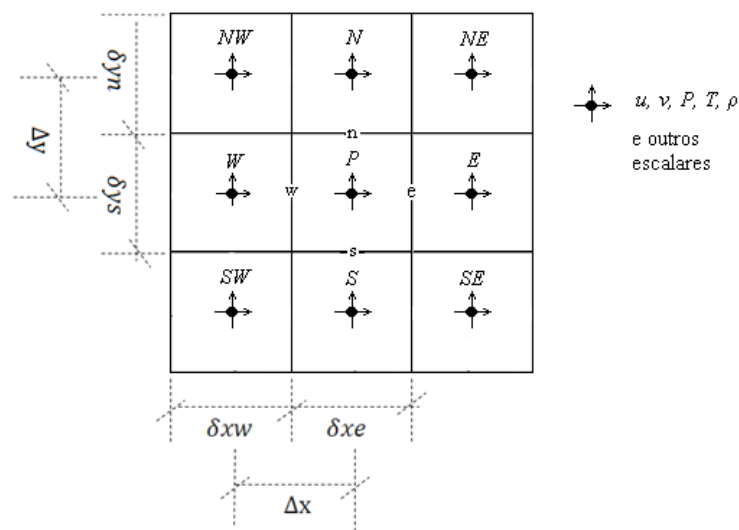


Figura 3.8 – Representação esquemática de um arranjo co-localizado

Para a solução numérica do problema envolvendo o forno destinado a produção de carvão vegetal, fez-se o uso de uma malha uniforme contendo somente volumes inteiros em seu interior. Para representar as condições de contorno o *software Fluent* utiliza por padrão volumes fantasma, que fazem fronteira com os volumes internos que delimitam o domínio (MALISKA, 2004).

Para a construção da malha é necessário inicialmente criar o desenho do forno em Auto CAD e em seguida exportá-lo para o *software* apropriado para a construção da malha. Para isso, neste trabalho utiliza-se outro *software* comercial chamado *Gambit*, que de forma direta cria e exporta a malha para o *software Fluent*.

Na Fig. 3.9 pode ser observado de forma simplificada a interface do programa usado para gerar a malha e as ferramentas que permitem alterar o espaçamento entre os volumes finitos presente na malha.

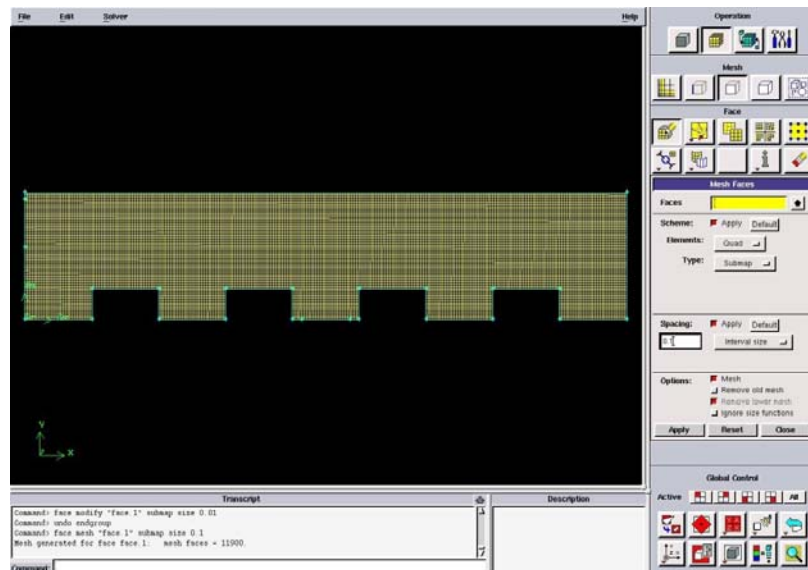


Figura 3.9 – Interface do usuário do programa *Gambit*.

Após a definição da malha e das equações que regem o problema - Navier-Stokes, Poisson, Continuidade e Energia - é preciso integrá-las conforme o volume finito definido na Fig. (3.8). Cabe salientar que o *Fluent* foi ajustado para discretização temporal implícita de primeira ordem. Além disso, foram ajustadas as seguintes opções no software:

- Escoamento Laminar;
- Número de Brinkman nulo;
- Passo de tempo de 1[s];
- Resíduo máximo tolerado para a equação da energia em qualquer ponto da malha de 10^{-6} ;
- Resíduo máximo tolerado para as velocidades u e v em qualquer ponto da malha de 10^{-3} .
- Resíduo máximo tolerado para a equação da conservação da massa em qualquer ponto da malha de 10^{-3} .

Além de todas as configurações de operação, é necessário declarar as condições de contorno que foram apresentadas no modelo físico. Nesse caso, o *Fluent* conta com um painel de

condições de contorno conforme apresentado na Fig. 3.10, (*Boundary Conditions*) no qual é possível escolher ou alterar as condições de contorno necessárias.

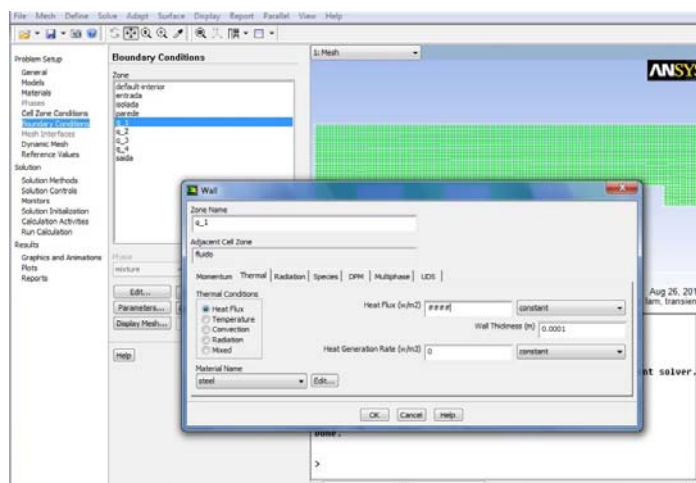


Figura 3.10 – Painel de condições de contorno.

Na figura anterior verifica-se um exemplo no qual declarou-se um fluxo de calor constante [W/m^2] como condição de contorno. As grandezas foram ajustadas considerando o modelo em escala reduzida de 1:100. Nesse caso, o fluxo imposto foi de 1250 [W/m^2] frente ao valor real de 3631.9 [W/m^2] que é calculado com base na massa de carvão produzido (40 ton), poder calorífico inferior (31380 kJ/kg) e tempo de produção (4 dias).

As demais condições de contorno, como convecção nas paredes e tubulações foram ajustadas conforme valores apresentados no Capítulo III deste trabalho. O procedimento de implementação no software é semelhante àquele apresentado para a condição com fluxo de calor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mencionado anteriormente, este trabalho tem como objetivo analisar a distribuição de temperatura e a dinâmica dos gases no interior de um forno destinado à produção de carvão vegetal. RAAD (2008), em seu estudo apresentou um trabalho similar ao estudo proposto onde o objetivo foi estudar experimentalmente a fluidodinâmica dos gases de carbonização em fornos de alvenaria, para verificar se existe diferença estatística na qualidade do carvão vegetal.

A Fig. 6.1 mostra o forno estudado por RAAD (2008) onde é possível visualizar as tubulações aletadas que permitem a recirculação dos gases quentes.



Figura 6.1 – Forno de Alvenaria com recirculadores aletados.(RAAD , 2008)

Em seu trabalho, RAAD (2008) teve como resultado um ganho tanto produtividade quanto no rendimento gravimétrico da carbonização.

A partir desta análise, propõe-se o estudo de metodologias para auxiliar na recirculação dos gases em seu interior, tais como o uso de tubulações auxiliares conforme indicado nas Figs. (6.2b) a (6.2d).

Os resultados apresentados são para a condição de regime permanente na qual o modelo apresenta equilíbrio térmico.

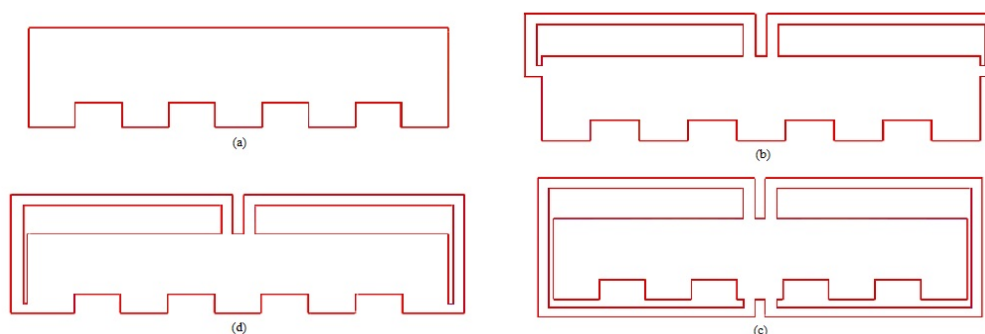


Figura 6.2 – Tipos de fornos analisados: (a) Forno sem recirculadores, (b) Forno com recirculadores lateral superior, (c) Forno com recirculadores lateral inferior, (d) Forno com recirculadores inferior central.

No processo de simulação foram consideradas tubulações de aço-carbono ($C_p=486[\text{J/KgK}]$, condutividade térmica $k=52,9 [\text{W/mK}]$ e densidade de $7860 [\text{Kg/m}^3]$) com a superfície externa submetida à convecção natural ($h=20[\text{W/m}^2\text{K}]$ e $T_\infty=300[\text{K}]$).

A Fig. 6.3 apresenta o perfil de temperatura em um forno sem recirculadores, no qual identifica-se uma temperatura máxima interna de aproximadamente $700 [\text{K}]$.

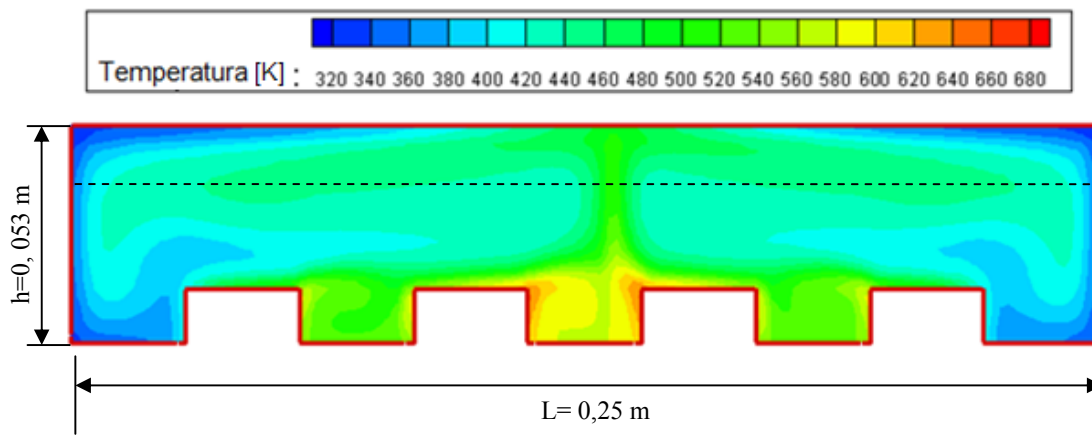


Figura 6.3 – Perfil de temperatura no modelo de forno industrial sem recirculação

Para avaliar a variação da temperatura ao longo do forno, extraiu-se um perfil de temperatura a $0,033 [\text{m}]$ de altura, conforme linha tracejada apresentada na Fig 6.3. A Fig 6.4 apresenta os resultados obtidos.

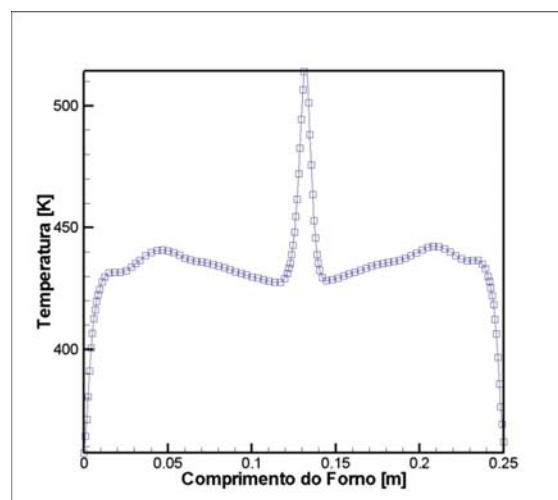


Figura 6.4 – Distribuição da temperatura ao longo do modelo sem recirculação

Como informação adicional, apresenta-se na Fig. 6.4 o campo de pressão no interior do forno. Ressalta-se que no processo de simulação a pressão de referência é definida por um valor nulo.

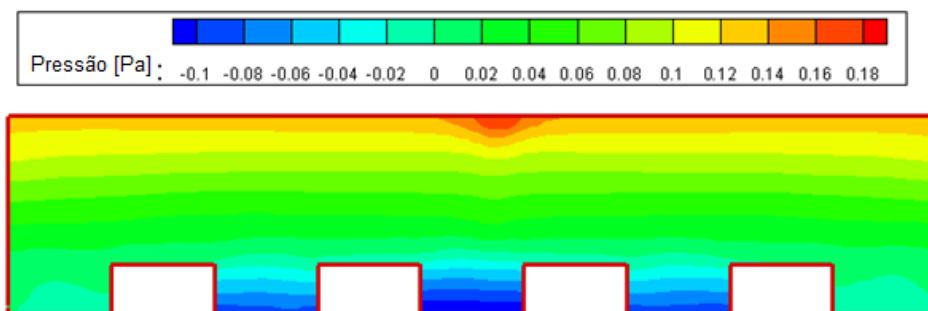


Figura 6.5 – Perfil de pressão no modelo de forno sem recirculação.

Como pode ser observado na Fig. 6.4, existe uma concentração de gases na parte superior central, devido ao aquecimento e conseqüente mudança de densidade dos gases produzindo assim um aumento na pressão nessa região, observado no perfil de pressão apresentado na Fig. 6.5

A partir dos dados anteriores, apresenta-se na Fig. 6.6 um modelo de forno industrial com algumas configurações de recirculadores de gases. Neste trabalho, propõe-se a injeção dos gases quentes em regiões onde as menores temperaturas são identificadas, como por exemplo, próximo às portas e base do forno.

Observa-se neste caso que a instalação do equipamento acarreta em uma diminuição da temperatura e pressão interna média do forno. Segundo SILVA e TRUGILHO (2003) a temperatura adequada para produzir carvão de qualidade é em torno de 350 °C. Além disso, FIGUEIREDO, (2008) afirma que quanto maior a pressão, maior será o rendimento gravimétrico, ou seja, maior será a quantidade de carvão produzido em cada ciclo.

A partir dos casos analisados, verifica-se que a reentrada de gases quentes na base do forno proporciona uma maior homogeneidade da temperatura interna do forno. Este comportamento se torna ainda mais evidente comparando a distribuição de temperatura apresentada na Fig. 6.4 com aquelas obtidas a partir da Fig. 6.6. A Fig. 6.7 apresenta os resultados obtidos.

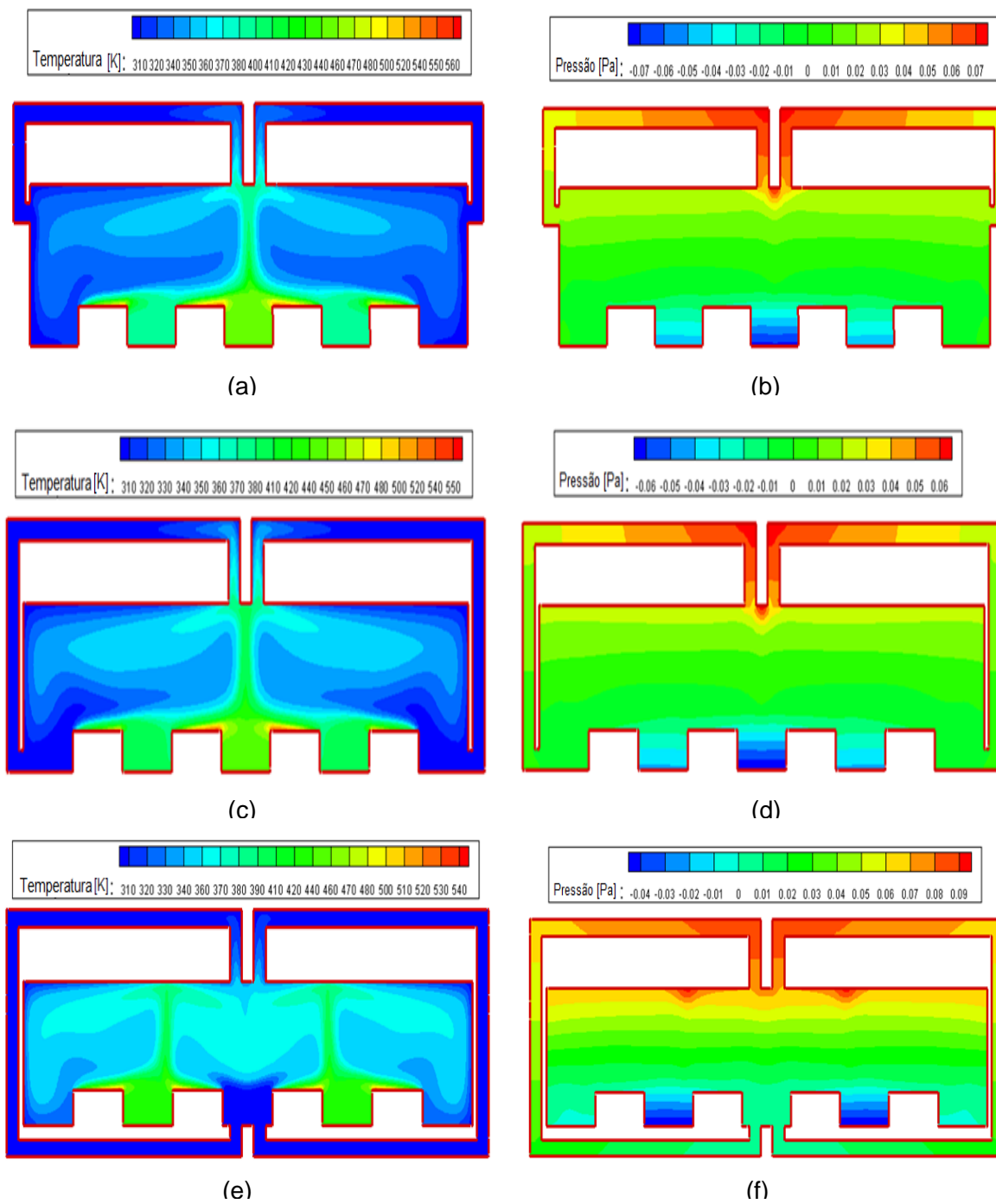


Figura 6.6 – Distribuição da temperatura e pressão em fornos com recirculadores de gases

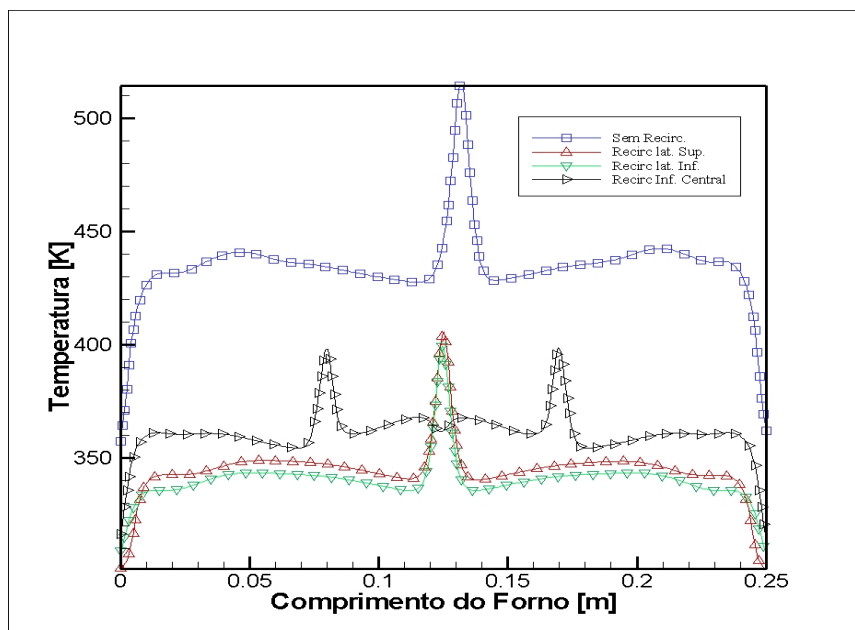


Figura 6.7 - Distribuição de temperatura ao longo do forno conforme as configurações de recirculadores definidas anteriormente

Nota-se na Fig. 6.7 que o esquema de recirculador definido na Fig. 6.6e proporciona uma maior homogeneidade da temperatura interna do forno, que se mantém em torno de 350°C e 400°C, reduzindo a presença de picos de temperatura (superior a 400°C) que induzem na formação de cinzas de carvão.

Ressalta-se que este trabalho apresenta apenas um estudo preliminar onde o objetivo principal foi alcançado, ou seja, fazer uso de técnicas numéricas e computacionais para compreender a formação dos campos térmicos e fluido-dinâmico dos gases no interior de um forno destinado à produção de carvão vegetal.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo numérico para ser aplicado no estudo dos campos térmicos e fluido-dinâmico desenvolvidos durante o processo de produção de carvão em um forno de alvenaria modelo RAC. Nesse sentido, o modelo matemático foi baseado na equação diferencial de energia térmica e nas equações de Navier-Stokes, segundo um sistema de coordenadas cartesianas. O problema direto foi resolvido a partir de uma malha regular por meio do Método de Volumes Finitos.

Uma das dificuldades em resolver esse problema está associado ao fato da densidade variar de acordo com a temperatura, pois nas equação da energia e da quantidade de momento linear o valor da densidade é constante. Nesse caso, a formulação proposta acrescenta um termo fonte de movimento nas equações de momento a fim de computar a mudança da densidade gerando a força de empuxo e por sua vez o movimento do gás. Essa formulação se faz possível pela aproximação de *Boussinesq* a qual determina a densidade em função da temperatura e permite obter os perfis térmicos e os campos de velocidade e pressão no modelo em questão. Ressalta-se que no intuito de reduzir o custo computacional foi implementado uma condição de simetria na região central do modelo de forno simulado.

A partir da definição do modelo matemático e do modelo numérico neste trabalho foram realizadas três simulações em condições praticas semelhante variando apenas a posição da tomada de ar dos recirculadores. Ao acrescentar a recirculação de gases quentes, foi possível observar uma maior homogeneidade na temperatura interna do forno, além de uma queda de temperatura máxima, que se aproxima de valores adequados e que proporcionam melhorias na produtividade.

Apesar de ser um estudo inicial, os objetivos foram alcançados, ou seja, verificou-se que por meio de técnicas numéricas e computacionais torna-se possível compreender o comportamento dos gases no interior de um forno destinado à produção de carvão vegetal, a fim de homogeneizar o processo de queima da madeira e otimizar a produção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BORGES, V. L. **Desenvolvimento do método de aquecimento plano parcial para a determinação simultânea de propriedades térmicas sem o uso de transdutores de fluxo de calor**. Tese (doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil. 2008.

FIGUEIREDO, C. K., **“Pirólise sob pressão uma nova abordagem para a carbonização”**, Apresentação do Terceiro Congresso Internacional de Bioenergia, Curitiba/PR, 26 a 28/06/2008.

FRANÇA, G. A. C. **Análise teórica e experimental do resfriamento de carvão vegetal em forno retangular**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil. 2002.

GANDRA, B. F.; CARVALHO, J. S.; CASTRO, J. A.; CASTRO, L. F. A. **Um modelo matemático do escoamento de líquidos no cadinho do alto-forno**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais., São Paulo, v. 5, n. 3, p. 138-143, jan.-mar. 2009.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. **Teoria da carbonização da madeira**. 2010. In: PENEDO, W. R. (Ed.) Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte: CETEC. pp. 27-41.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Acessado em 20/09/2010. Disponível: http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1052&id_pagina=1).

IMOPEC. **Resgate da cultura de um povo**. Disponível em: <<http://www.imopec.org.br>> Acesso em: 22 de agosto de 2011.

INCROPERA, F.P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 642p.

Instituto Aço Brasil. **Números de Mercado: Estatísticas**. 2011. Acessado em 26/06/2011. Disponível: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp>.

LÚCIO, A. **DPC: uma tecnologia inovadora e altamente competitiva em constante evolução**. 2006. Seminário: Prática, Logística, Gerenciamento e Estratégias para o Sucesso da Conversão da Matéria Lenhosa em Carvão Vegetal para Uso na Metalurgia e Indústria. Belo Horizonte, MG.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2.ed. Universidade Federal de Santa Catarina: LTC, 2004. 454p.

MEDEIROS, C. A., RESENDE, M. E. A. **Alcatrão vegetal: perspectivas de produção e utilização**. 1983. Revista da Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, v.13, n.9-12, pp. 42-48.

Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2010**.

Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2011**.

MIRANDA, L. L.; ZIVIANI, M. FULLIN JÚNIOR. B. **Modelagem matemática do processo do forno de reaquecimento WB2 da LTQ da Acesita**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.3. n.2, p. 34-38, out.-dez. 2006.

MORALES, R. C. **Caracterização estrutural e composicional do carvão vegetal derivado de madeira e bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 1999.

MOREIRA, C. S. **Contribuição ao Estudo da Eficiência de Pequenos Fornos na Produção de carvão Vegetal Destinado a Alto Forno**. 1964. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP.

MULINA, B. H. O.; OLIVEIRA, R. L. M., BORGES, V. L., CARVALHO, S. R. **Instrumentação térmica aplicada ao processo de carvão vegetal em fornos de alvenaria** 2009.

OLIVEIRA JR, Amilton Antonio de; FARINAS, Flavio Henrique; MARINO, José Eduardo. **Política Energética para o Brasil. Seminário de Engenharia de Petróleo e Gás Natural. Santos, 2008.**

OLIVEIRA JÚNIOR, J. M. **Modelagem e simulação de fornos de craqueamento de 1,2-dicloroetano: determinação da conversão.** 2008. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Brasil.

OLIVEIRA, J. B., VIVACQUA FILHO, A., MENDES, M. G., GOMES, P. A. **Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos.** 1982. In: PENEDO, W. R. (Ed.) Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, pp. 59-73.

OLIVEIRA, R. L. M. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal.** 2009. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Brasil.

OLIVEIRA, R. L. M., MULINA, B. H. O., BORGES, V. L., CARVALHO, S. R. **Análise térmica e do rendimento gravimétrico em fornos de produção de carvão vegetal.** 2010. CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande, Brasil.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** Hemisphere Publishing Corporation. New York. 1980.

PENDORADA. **Arqueologia das profissões e ofícios IV.** Disponível em: <<http://culturalpendorada.blogspot.com/2010/03/arqueologia-das-profissoes-e-oficios-iv.html>>
Acesso em: 22 de agosto de 2011.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *eucalyptus spp.*** Tese (doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Brasil. 2004.

RAAD, T. J.; COSTA, L. C.; WINTER, M. **Pesquisa e desenvolvimento na produção de carvão vegetal**. 2008. I Fórum Nacional Sobre Carvão Vegetal. Belo Horizonte, MG.

REZENDE, R. V. P.; MALISKA, C. R. **Modelagem matemática e simulação numérica do escoamento em canal de alto-forno e sua influência no desgaste do revestimento refratário**. XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, de 20 a 23 de maio de 2007. Belo Horizonte, Brasil.

TRUGILHO, P. F., SILVA, D. A. **Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá**. 1998. Revista Árvore, Viçosa, v.21, n.1, pp. 113-130.

UK Agriculture. **The history of Charcoal – Worldwide**. Disponível em: <http://www.ukagriculture.com/countryside/charcoal_history.cfm> Acesso em: 02 de agosto de 2009.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4.ed.:Mc Graw Hill, 2002.570p.