

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE TÉRMICA DE TIJOLO CERÂMICO VAZADO VIA CFD

Morgana de Vasconcellos Araújo, morganamva@gmail.com¹
Veralúcia Severina da Silva, veralucia.silva84@yahoo.com.br¹
Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br¹
Kaio Farias de Moraes, kaiofariasdemoraes@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-900.

Resumo: A fabricação de tijolos de argila vermelha passa por várias etapas, entre as quais estão incluídas a umidificação da argila, a moldagem, a secagem e o cozimento. O processo de secagem tem alto consumo energético e o material precisa ser secado de forma uniforme para não apresentar falhas e tornar-se inutilizável pós-secagem. O estudo para a otimização do processo de secagem (diminuição do tempo do processo e do gasto energético) é crucial para a indústria ceramista. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo fazer um estudo térmico transiente da distribuição de calor em um tijolo industrial devido ao fornecimento de energia do ar de secagem escoando no regime turbulento sobre o mesmo. O objetivo da análise é fornecer dados para auxiliar na otimização do processo de secagem. O estudo é efetuado através da simulação numérica do escoamento utilizando o software ANSYS CFX 15.1. Os resultados transientes são exibidos através de campos de temperatura e velocidade do ar, e da temperatura do tijolo.

Palavras-chave: Tijolo, Transferência de calor, Cerâmica, CFD e CFX.

1. INTRODUÇÃO

A secagem é uma das operações unitárias químicas de maior complexidade e consumo energético. Defraeye (2014) afirma que esta operação usa aproximadamente de 10% a 25% da energia nacional consumida em processos industriais.

Para otimizar tecnologias de secagem existentes ou o desenvolvimento de novas tecnologias necessita-se realizar uma análise do processo, seja experimentalmente ou numericamente. A modelagem numérica possui vantagens sobre experimentos de secagem feitos em laboratórios ou plantas-piloto, por exemplo. Dentre as vantagens descritas por Defraeye (2014), destacam-se:

- É possível ter a distribuição de todas as variáveis (temperatura, taxa de umidade, velocidade, etc) sobre e dentro do produto analisado, diferentemente do processo experimental, onde só é possível obter-se a média de cada variável;
- Pode-se quantificar através do tempo e do espaço os fluxos de calor e massa. Tal quantificação ajuda na otimização de energia, na recuperação do calor desperdiçado e na desumidificação do ar de retorno;
- A sensibilidade à pequenas mudanças, como as condições de secagem, podem ser detectadas sem as “incertezas experimentais” ou sem a necessidade de repetição de experimentos devido à influência de fatores externos;
- Não há limitações quanto às condições de secagens, nem há preocupação com relação à segurança;
- Não precisa se preocupar com a redução de escalas que ocorrem em plantas-piloto. As simulações podem ser realizadas na escala real;
- Não há a necessidade de um laboratório com espaço adicional nem há gastos com manutenção ou com mão de obra técnica.

O processo de secagem de produtos sólidos envolve os fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa, além da quantidade de movimento e encolhimento do produto. Trata-se de uma etapa importante para a indústria em geral, seja para processamento de alimentos, produtos químicos, cerâmicos, processamento ou armazenamento de grãos, entre outros (Forte e Okos, 1980).

Assim, devido a essa complexidade, o estudo e otimização exige a necessidade de se gerar modelos matemáticos que simule o processo com um grande realismo físico (Silva, 2009).

Segundo Forte e Okos (1980), a análise da secagem é muitas vezes baseada em condições externas, como temperatura, umidade (absoluta ou relativa) e velocidade do ar, correlacionadas com a taxa de secagem do sólido. A vantagem deste procedimento é a sua simplicidade, uma vez que grupos adimensionais podem ser formados facilmente e o número de experiências minimizadas. São os chamados modelos empíricos ou semi-empíricos e os modelos baseados em uma análise concentrada. Esses modelos assumem a não existência de gradientes de umidade e temperatura no interior do material. Contudo, devido a importância de se reconhecer os fenômenos no interior do material, diversas pesquisas tem utilizado modelos distribuídos. No entanto, escassos são os trabalhos envolvendo CFD para analisar os fenômenos exterior e interior do produto, envolvendo a vizinhança.

Para a compreensão do processo de secagem de forma mais completa, deve-se estudar a distribuição de temperatura e umidade no material e em seguida os diversos mecanismos que descrevem as transferências de massa e calor em seu interior. Com uma boa base é possível realizar o estudo completo da secagem envolvendo a transferência de calor e massa no produto, e no ar que o envolve (no caso de secagem convectiva). O presente artigo é a parte de uma pesquisa que visa simular, e comparar com dados experimentais, a transferência de calor e massa no processo de secagem de tijolos vazados, envolvendo o produto em si e o meio externo, que neste caso é a estufa de secagem. O foco aqui é a transferência de calor por convecção na superfície e a condução no interior do tijolo, bem como o comportamento de fluido sobre o material.

2. METODOLOGIA

2.1. Definição da Geometria e da Malha

Os domínios de estudo, definidos como o tijolo cerâmico vazado e o ambiente (estufa / forno de secagem) onde ocorre a troca térmica, assim como suas dimensões estão definidas na Fig. (1). As dimensões do tijolo industrial foram retiradas da literatura (Silva, 2009). O tijolo tem simetria geométrica. As faces de entrada e saída de ar estão destacadas. Nas demais faces foi imposta a condição de parede adiabática, sem rugosidade nem deslizamento.

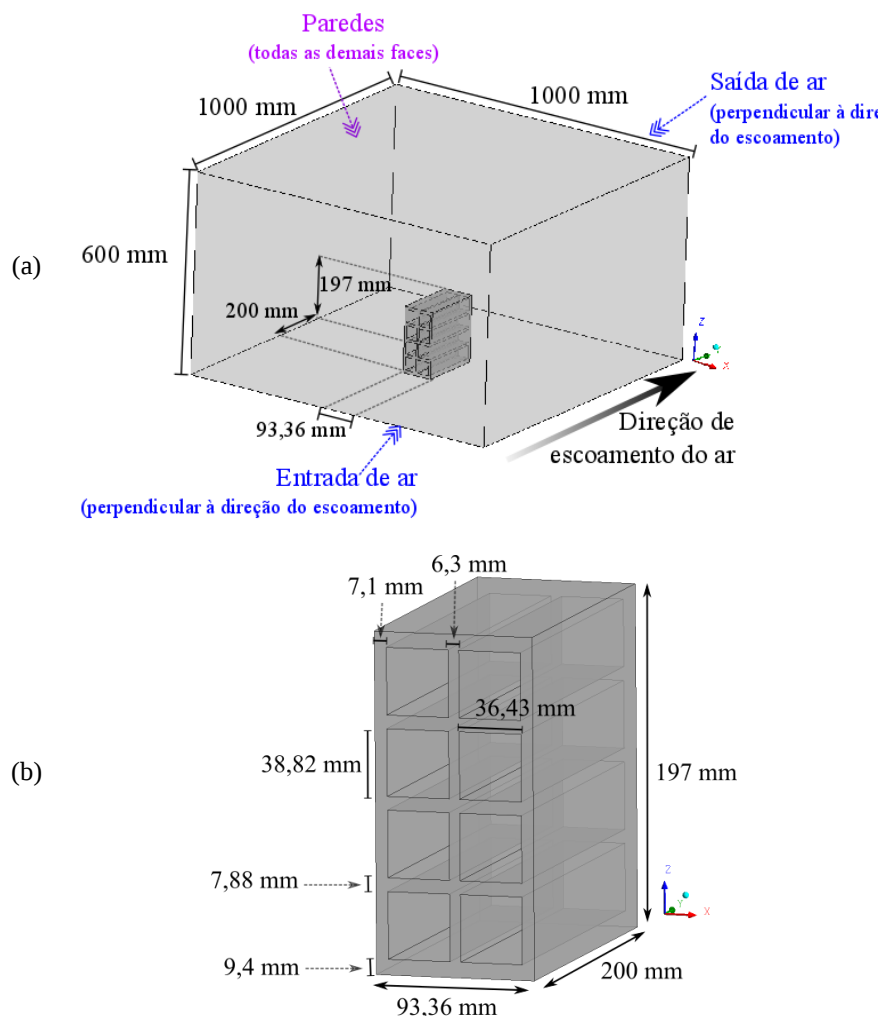


Figura 1. Geometria representativa dos domínios com (a) o domínio completo e (b) destaque no tijolo.

Sobre a geometria foi construída, através do método de blocagem, uma malha hexaédrica, veja Figs. (2) e (3), contendo aproximadamente 1 milhão de elementos hexaédricos. Para se chegar a esta malha, foi feito o estudo de dependência da mesma com relação à quantidade de elementos. Ambas geometria e malha foram construídas utilizando-se o *software* ICEM CFD 15.0. Com este tipo de malha é possível determinar os gradientes das grandezas com maior precisão.

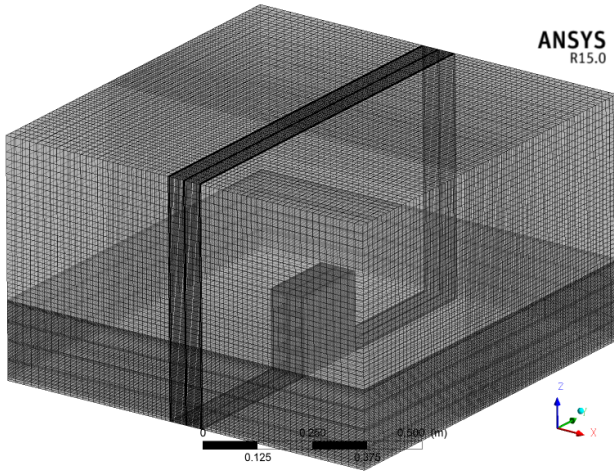


Figura 2. Malha hexaédrica construída sobre o domínio representativo.

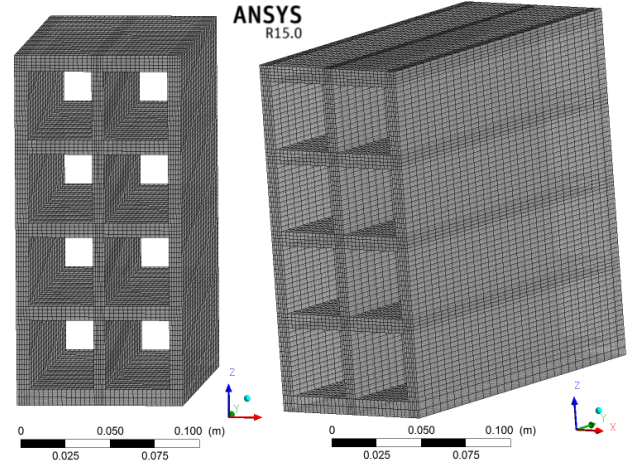


Figura 3. Detalhe do refinamento da malha hexaédrica construída no tijolo.

2.2. Equações Governantes

As equações transientes consideradas na modelagem matemática foram as da conservação do momento linear (Eq. (1)), da massa (Eq. (2)) e da energia (Eq. (3)).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) + \nabla p - \nabla \cdot \left\{ \mu \left[\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T \right] \right\} - \vec{S}_M - \vec{M} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} H - \lambda \nabla T) = 0 \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica, $\vec{U}$ é o vetor velocidade, p é a pressão, μ é a viscosidade do ar, H é a entalpia do ar e λ é a condutividade térmica.

A convecção é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a fluida adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de fluido. A transferência de calor por convecção cresce com a velocidade do fluido. A convecção pode ser natural ou forçada. Neste último caso, o fluido é forçado a fluir sobre a superfície por meios externos. A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura e é expressa pela Lei de Newton do resfriamento (Eq. (4)):

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_s - T_{ar}) \quad (4)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A_s é a área superficial, T_s é a temperatura na superfície do tijolo, T_{ar} é a temperatura do ar e $\dot{Q}_{conv}$ é a taxa de transferência de calor. O valor de h é calculado a partir dos resultados da simulação numérica.

2.3. Condições de Contorno

As simulações foram realizadas aplicando-se dois domínios: o domínio externo fluido, onde está inserido o tijolo, é composto por ar (Tab. (1)), fluido contínuo, a uma temperatura de 80 °C. Escolheu-se uma pressão relativa inicial de 101325 Pa, pois o equipamento de secagem possui a mesma pressão que o ambiente externo, e uma pressão de referência de 0 Pa. Adotou-se um regime turbulento, pois o ar em movimento ao deparar-se com um obstáculo, o tijolo,

gera pequena turbulência. Para a turbulência foi escolhido o modelo κ - ϵ por ser o de maior aplicação industrial. As velocidades do ar na entrada variaram entre 0,5, 1 e 2 m/s. Na saída de ar foi inserida uma pressão de 101325 Pa. O domínio interno, sólido, refere-se ao tijolo cerâmico. Para tal, foi criado um novo material, chamado argila, cujas propriedades físicoquímicas estão expostas na Tab. (1). Uma temperatura inicial de 25 °C foi aplicada ao tijolo.

Tabela 1. Propriedades do ar e da argila.

Propriedades	Ar	Argila
Capacidade calorífica específica [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	1004,4 ^(*)	1673 ^(**)
Condutividade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	0,0261 ^(*)	1,675 ^(***)
Densidade [kg m ⁻³]	1,185 ^(*)	1495 ^(***)
Viscosidade dinâmica [kg m ⁻¹ s ⁻¹]	1,831x10 ⁻⁵	

(*)Manual CFX 15.1; (**)Almeida, 2009.; (***)Çengel e Ghajar, 2012.

As simulações foram realizadas utilizando o software comercial ANSYS CFX 15.0. Foram adotados os seguintes tempos de simulação e passo de tempo.

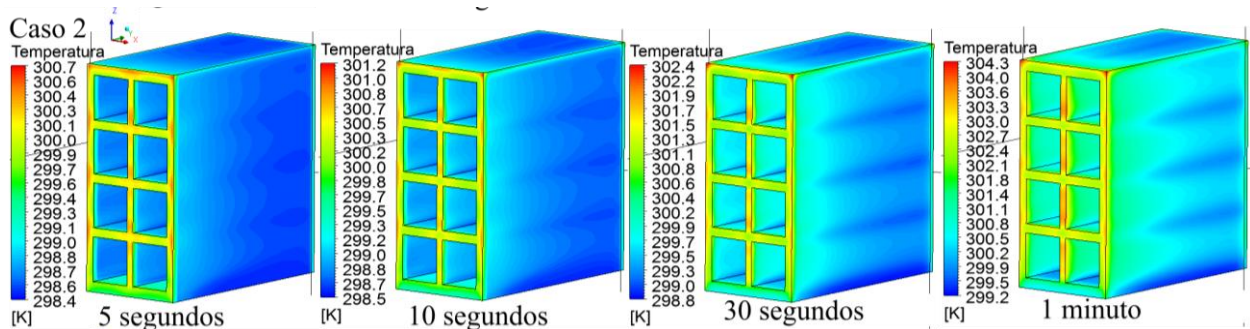
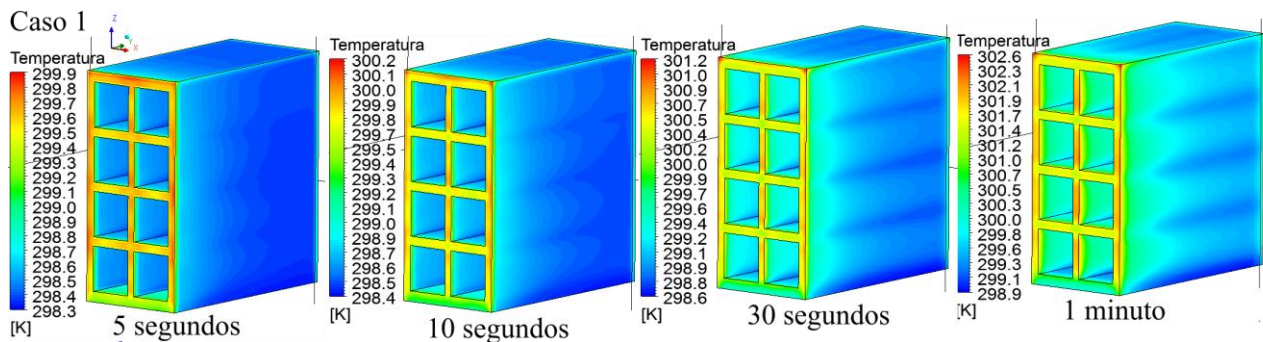
- Escoamento: 0 < t < 10s Passo de tempo: 1 s
- Escoamento: 10s < t < 60s Passo de tempo: 5 s
- Escoamento: 60s < t < 600s Passo de tempo: 60 s
- Escoamento: 600s < t < 3600s Passo de tempo: 600 s

As simulações feitas diferem apenas com relação à velocidade de escoamento do ar:

- Caso 1 – Velocidade de escoamento de 0,5 m/s;
- Caso 2 – Velocidade de escoamento de 1,0 m/s;
- Caso 3 – Velocidade de escoamento de 2,0 m/s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para observar a evolução da distribuição da temperatura sobre a superfície do tijolo, foram feitas as Figs. (4), (5), (6), (7), (8) e (9). Nota-se o crescimento temporal da temperatura em todos os casos analisados. É importante observar também que na simulação “Caso 3”, onde o ar escoa na maior velocidade (2 m/s), a superfície do tijolo atingiu temperaturas superiores em comparação com as demais simulações. As figuras também exibem a zona de maior temperatura, que é aquela perpendicular e frontal à direção do escoamento de ar aquecido. O gradiente de temperatura permanece mesmo após 1 hora de escoamento, conforme as Figs. (7), (8) e (9). Deve-se atentar para a escala de temperatura em cada figura. Tais gradientes de temperatura são responsáveis pela geração de tensões térmicas no interior do tijolo, contração volumétrica e expansão térmica, que podem gerar trincas, deformações e ruptura do material, inutilizando-o para uma aplicação específica.



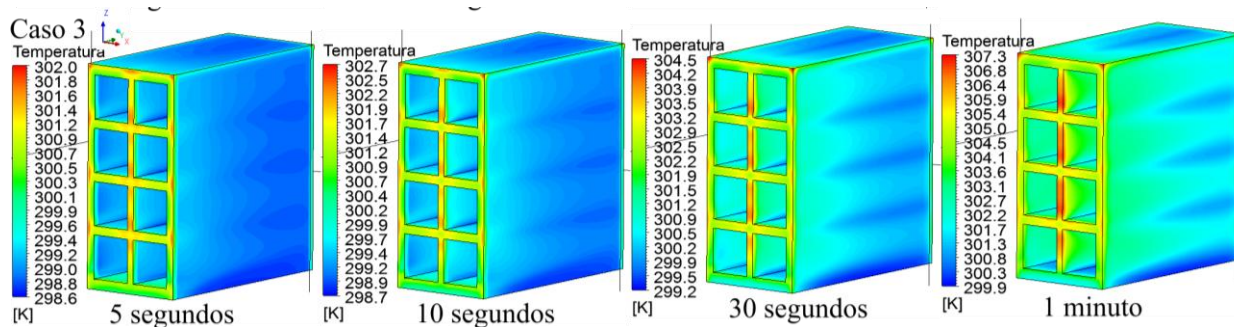


Figura 6. Temperatura sobre a superfície do tijolo para os tempos de escoamento de 5 a 60 s com $V_{ar} = 2,0$ s.

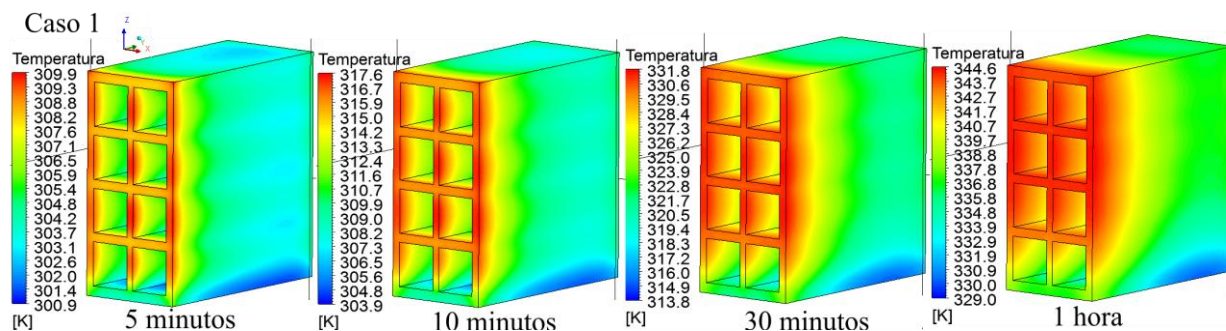


Figura 7. Temperatura sobre a superfície do tijolo para os tempos de escoamento de 5 a 60 min $V_{ar} = 0,5$ s.

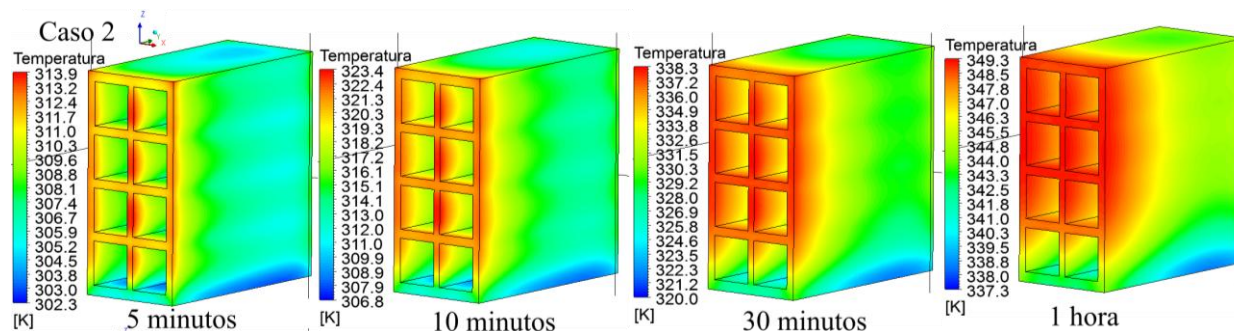


Figura 8. Temperatura sobre a superfície do tijolo para os tempos de escoamento de 5 a 60 min $V_{ar} = 1,0$ s.

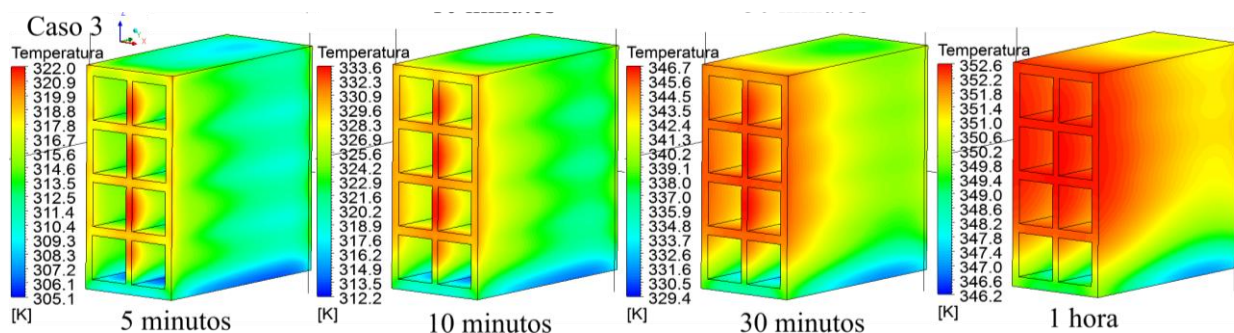


Figura 9. Temperatura sobre a superfície do tijolo para os tempos de escoamento de 5 a 60 min $V_{ar} = 2,0$ s.

Para observar o comportamento da temperatura no interior do tijolo, foi construída, a partir de três planos, a Fig. (10), que exibe os campos de temperatura na simulação de escoamento de ar quente a 2 m/s. Nota-se que os gradientes de temperatura também ocorrem no interior do material. Observa-se ainda que a região de menor temperatura é aquela na base do tijolo, que efetivamente não está em contato com o ar.

Tomando um plano vertical (Fig. (11)) e plotando-se um campo de temperatura sobre o mesmo e sobre a superfície do tijolo (Fig. (12)), observa-se que após uma hora de escoamento ainda há diferença entre os valores de temperatura no tijolo e no ar, isto é, o tijolo ainda não entrou em equilíbrio térmico com o ar de secagem. O ar, ao escoar sobre o produto, perde energia térmica para o mesmo. A perda de calor é observada na região do plano próxima ao material em análise (veja a região à direita do tijolo na Fig. (12)).

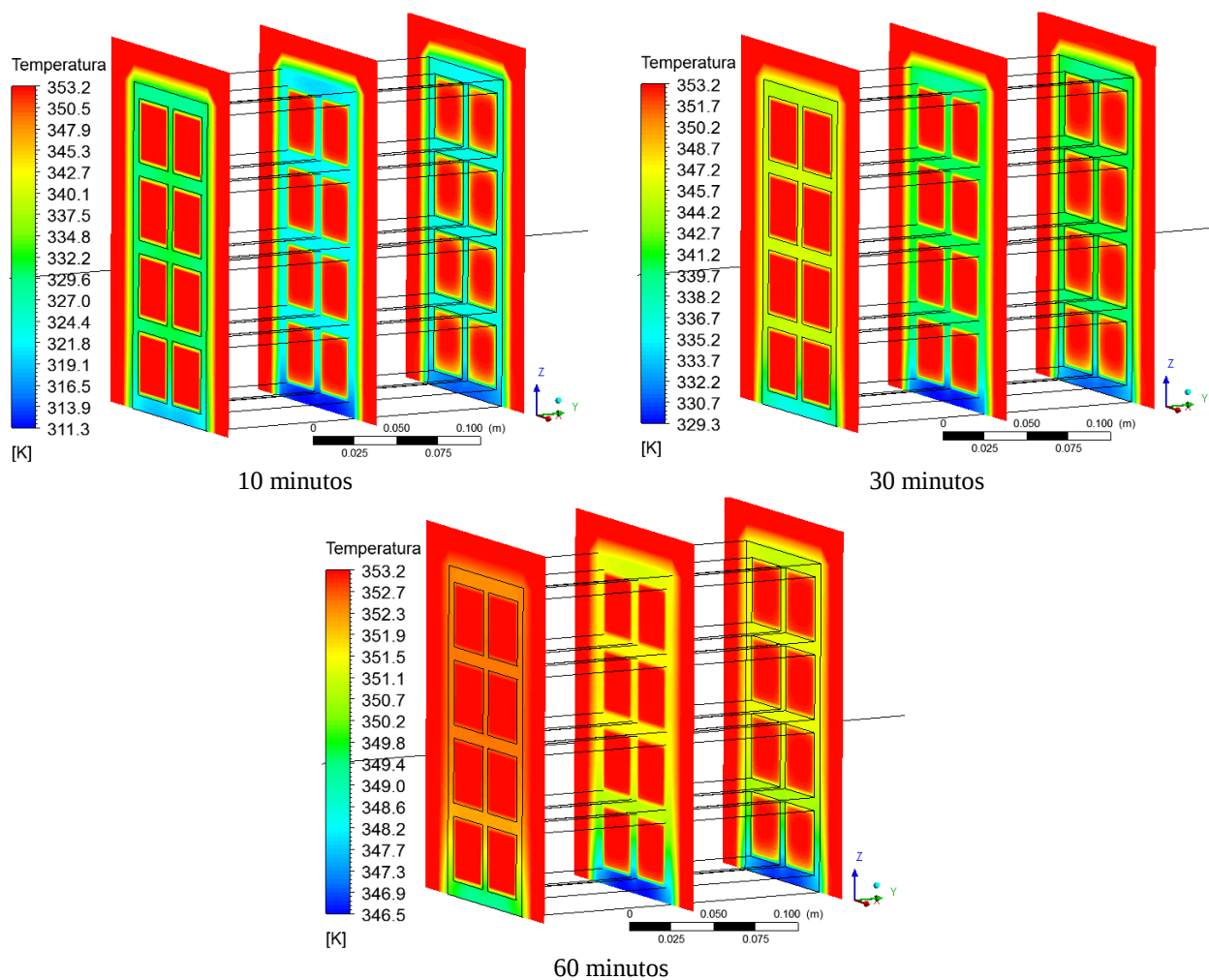


Figura 10. Temperatura no interior do tijolo para os tempos de escoamento de 10 a 60 min.

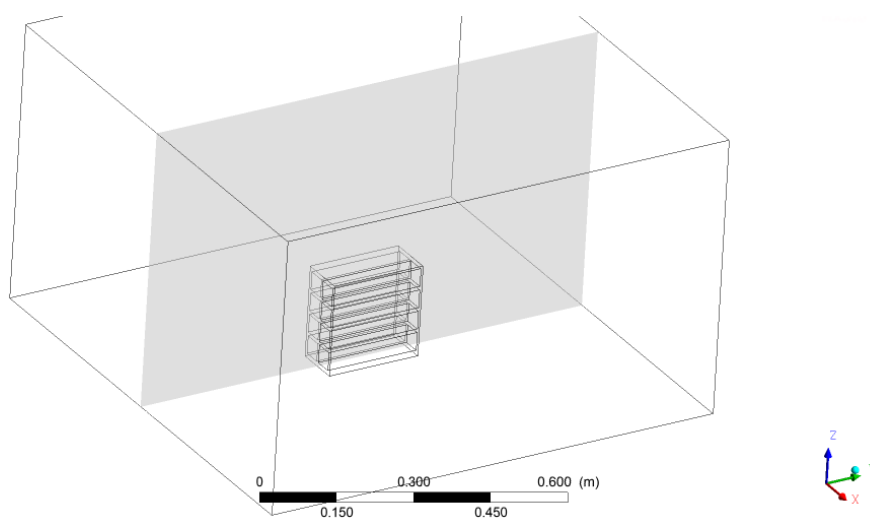


Figura 11. Plano YZ no centro do domínio.

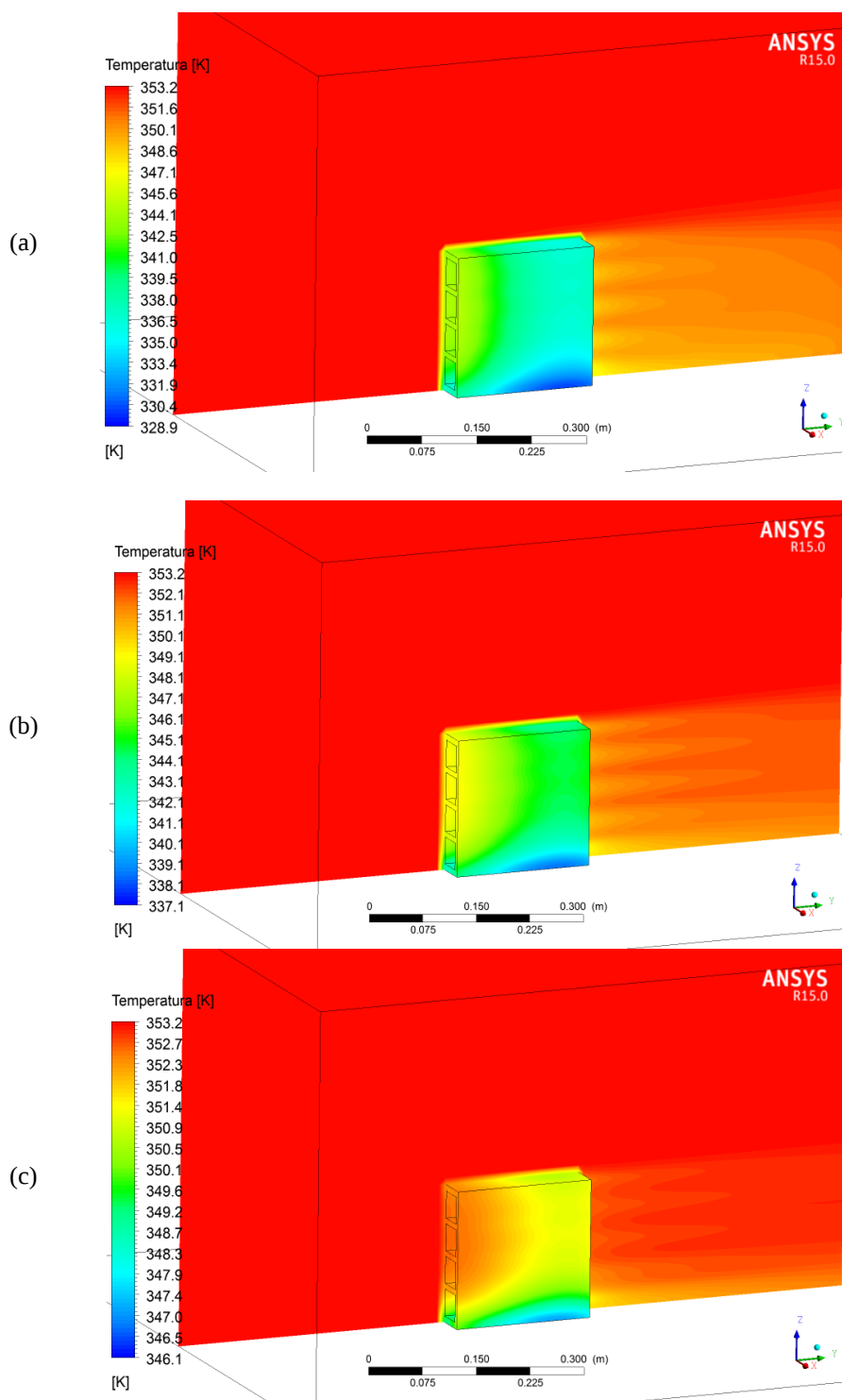


Figura 12. Campos de temperatura do ar e da superfície do tijolo após uma hora de escoamento de ar quente para (a) Caso 1, (b) Caso 2 e (c) Caso 3.

O campo de velocidade do ar é diretamente afetado pela presença do tijolo. Em escoamentos externos, observa-se junto ao obstáculo zonas de alta e baixa velocidades. Para ilustrar a velocidade do ar e o caminho percorrido pelo mesmo, construiu-se os campos de velocidade e seus vetores para os três casos analisados no tempo de 1 hora de escoamento (Fig. (13)).

Para observar o comportamento do ar escoando entre as paredes do tijolo, foi construída a Fig (14) que exhibe o perfil de velocidade em termos de linhas de corrente e campo para a última simulação e após 1 hora de escoamento. Nota-se um aumento do valor da velocidade do ar entre as paredes e a formação da camada limite de escoamento junto às paredes do produto.

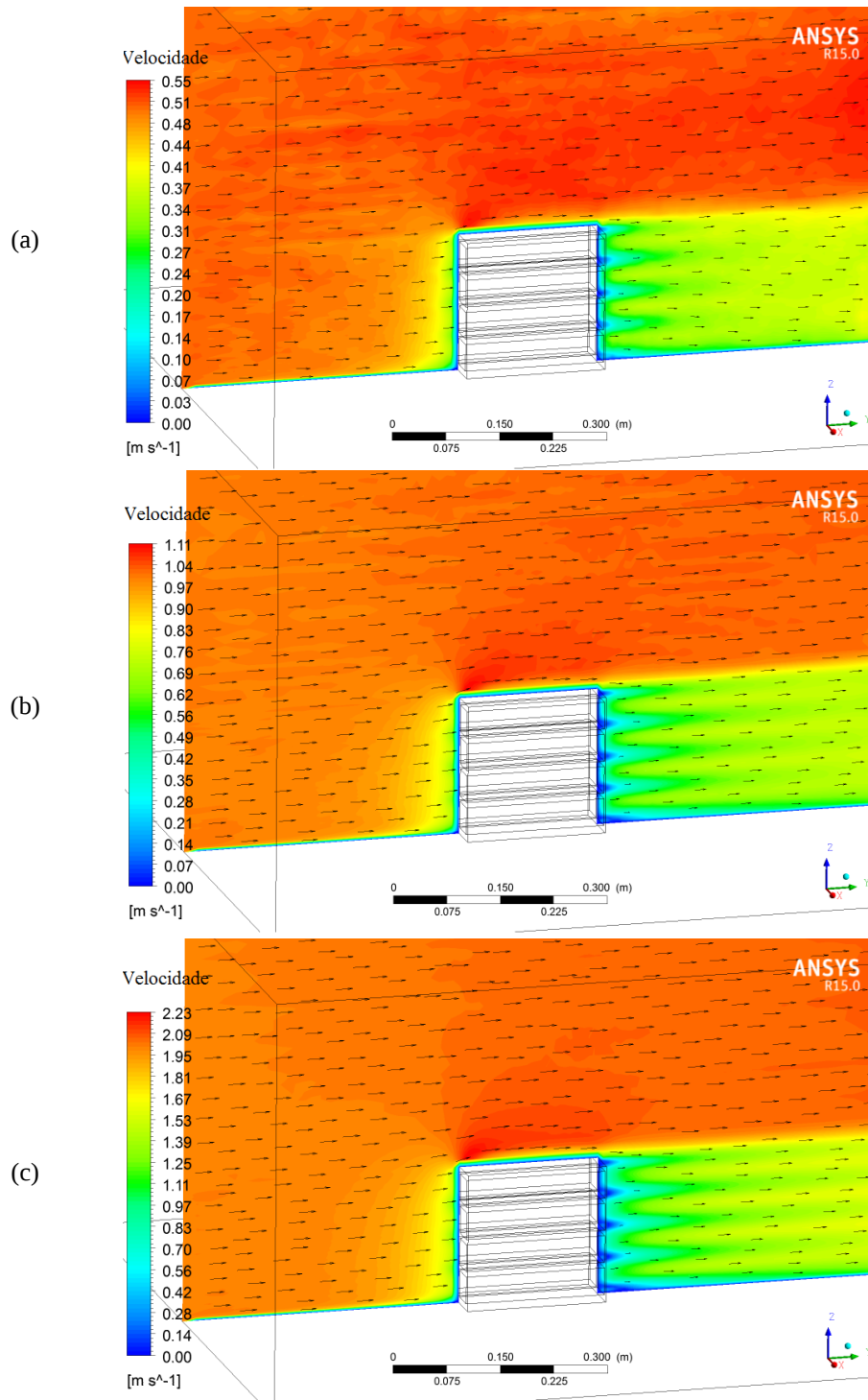


Figura 13. Campos e vetores de velocidade do ar após uma hora de escoamento para (a) Caso 1, (b) Caso 2 e (c) Caso 3.

O fenômeno da turbulência é observado nos canais internos do tijolo. Plotaram-se três planos ao longo de um dos canais, para uma velocidade média do ar de 0,5 m/s, exibindo os campos de velocidade (Figura 15). Calculou-se a velocidade média no plano central e, a partir do cálculo do diâmetro hidráulico, encontrou-se um número de Reynolds de aproximadamente 12 mil, caracterizando um escoamento turbulento.

Foram obtidos os valores médios da temperatura do tijolo para as três simulações ao longo do tempo e foi construído o gráfico exposto na Fig. (16). Observa-se que quanto maior a velocidade de escoamento, mais rápida cresce a temperatura no tijolo.

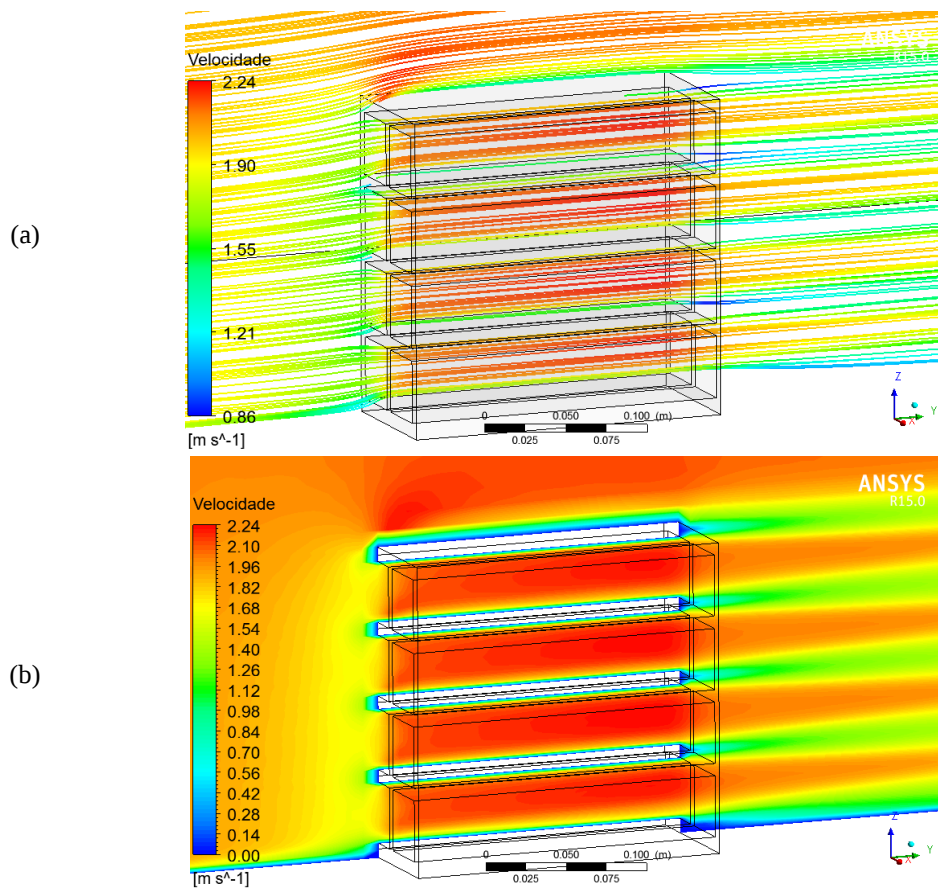


Figura 14. (a) Linhas de corrente e (b) campo de velocidade do ar

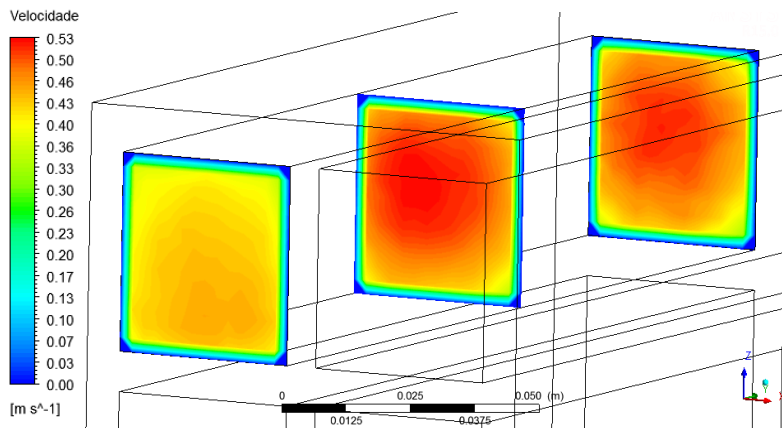


Figura 15. (a) Linhas de corrente e (b) campo de velocidade do ar

4. CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Quanto maior a velocidade de escoamento do ar, maiores serão os gradientes de temperatura.
- Os gradientes de temperatura sobre a superfície do tijolo permanecem mesmo após 1 hora de passagem do ar quente sobre a superfície do tijolo;
- A turbulência observada é muito pequena para o ar escoando paralelamente à superfície vazada do tijolo;
- Quanto maior a velocidade de escoamento do ar, maiores serão a temperatura atingida na superfície do produto considerando o mesmo tempo de escoamento.

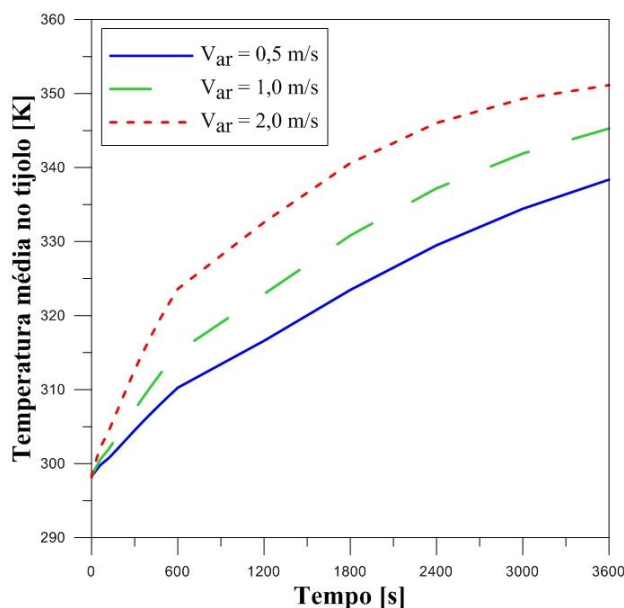


Figura 16. Temperatura média temporal do tijolo para diferentes velocidades de escoamento de ar.

5. REFERÊNCIAS

- Almeida, G. da S., 2009, “Simulação e Experimentação da Secagem de Cerâmica Vermelha em Sistemas Térmicos Industriais”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Çengel, Y. A e Ghajar, A. J., 2012, “Transferência de Calor e Massa”, Ed. AMGH, Porto Alegre, Brasil, 902 p.
- Defraeye, T., 2014, “Advanced computational modelling for drying process – A review”, Applied Energy, Vol. 131, pp. 323-344.
- Fortes, M. e Okos, M. R., 1980. “Drying theories: their bases and limitations as applied to food and grains”, Advances in Drying, Vol. 1, Mujumdar, A.S. Ed. Hemisphere, Washington, D. C., pp. 119-154.
- Silva, J. B. da., 2009, “Simulação e Experimentação da Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

THERMAL ANALYSIS OF HOLLOW CERAMIC BRICK VIA CFD

Morgana de Vasconcellos Araújo, morganamva@gmail.com¹

Veralúcia Severina da Silva, veralucia.silva84@yahoo.com.br¹

Antonio Gilson Barbosa de Lima, antonio.gilson@ufcg.edu.br¹

Kaio Farias de Moraes, kaiofariasdemoraes@gmail.com¹

¹Federal University of Campina Grande, Aprígio Veloso Street, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, Zip code: 58429-900.

Abstract. The manufacture of red clay brick pass by several steps, among which are included the wetting of the clay, molding, drying and baking of the brick. The drying process needs a special attention, because it is a high-energy process and the material need to be dried evenly, since otherwise the final product may fail and therefore the product will become unusable. The study for the optimization of the drying process (reduction of process time and energy expenditure) is quite interesting for the potteries. In this sense, this paper aims to make a transient thermal study of the heat distribution of industrial brick due to the power supply of the drying air flowing in turbulent flow on it. The objective of the analysis is to provide data to assist in optimizing the drying process. The study is conducted through numerical simulation of flow using the commercial package ANSYS CFX 15.1 ®. Transients results are displayed through temperature fields, velocity of air and brick temperature.

Keywords: Brick, Heat Transfer, Ceramic, CFD and CFX.