

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM SECADOR CONTÍNUO UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA

Rafael Fernando Hartke

Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos – UFSC, Campus Trindade, Florianópolis / SC, CEP 88010-970.
elemento@cet.ufsc.br

Willian Anderson Lehmkuhl

willian@cet.ufsc.br

Tales Gotlieb Jah

tales@cet.ufsc.br

Vicente de Paulo Nicolau

vicente@lmpt.ufsc.br

Resumo. *Uma das etapas mais importantes do processo de fabricação de produtos cerâmicos é a etapa de secagem. Esta etapa deve, de maneira geral, estar sincronizada com o processo de queima, caso contrário a secagem se torna o gargalo para o aumento da produção. Curiosamente ainda existem poucos estudos dirigidos para o problema da secagem na indústria de cerâmica, com ênfase na secagem de peças extrudadas. De maneira geral os secadores são alimentados por um energético barato ou com a energia que é recuperada dos fornos que, não raro, utilizam um energético mais nobre. Neste caso, o mau balanceamento entre a quantidade de energia recuperada e a quantidade de energia efetivamente retirada do forno pode aumentar consideravelmente o consumo de combustível. Com tudo isso, surge a seguinte questão: Será que a quantidade de energia disponível para recuperação nos fornos é suficiente para se realizar uma secagem eficiente em secadores que trabalham sincronizados e acoplados a esses mesmos fornos? O objetivo deste trabalho é, então, apresentar um estudo fenomenológico do processo de secagem e uma avaliação numérica das principais variáveis de processo envolvidas e a elaboração de um programa de simulação computacional que servirá como ferramenta de projeto e análise de secadores. Com o auxílio do programa computacional será possível se estimar o tempo de secagem, capacidade de um secador, energia requerida, vazão de ar necessária, etc. O desenvolvimento do programa conta com um acompanhamento experimental, através de testes de laboratório e testes de campo realizados em empresas. O presente trabalho vem sendo desenvolvido pelos autores, dentro do contexto das pesquisas de desenvolvimento tecnológico para a aplicação de gás natural na indústria de cerâmica vermelha, com apoio da RedeGásEnergia e do Depto. de Eng^a Mecânica da UFSC.*

Cerâmica vermelha, processo de secagem, secadores, simulação numérica.

1. Introdução

O setor de cerâmica vermelha no estado de Santa Catarina, conforme estudos realizados no estado (SECTME, 1990), é responsável por cerca de 16000 empregos diretos, e caracteriza-se por empresas de pequeno porte e administração familiar. O processo produtivo encontra-se em geral pouco desenvolvido tecnologicamente, o que coloca as empresas na posição de produtoras de itens de baixo valor agregado. Os combustíveis utilizados para a queima nos fornos são principalmente a serragem, lenha e óleo combustível.

A evolução do setor brasileiro de construção civil, com a crescente necessidade de certificação dos produtos e a presença de programas governamentais como o PBQP-H, demanda a modernização da indústria cerâmica vermelha. Além disso, a chegada ao estado do gás natural boliviano como uma nova fonte energética para a indústria cerâmica também impulsiona o desenvolvimento do setor. Entretanto o pequeno porte e a falta de contato com os meios de difusão de novas tecnologias dificultam esta modernização e é neste contexto que estudos como este ganham substancial importância.

Este trabalho propõe-se a desenvolver uma ferramenta de análise energética de um secador contínuo, como parte de estudo maior do processo de secagem da argila dos produtos cerâmicos e das relações energéticas e econômicas existentes entre os secadores e os fornos.

1.1. Processo de secagem da argila

A secagem é uma etapa essencial da produção cerâmica, e que demanda de uma grande quantidade de energia térmica para evaporar a água adicionada durante o processo de extrusão das peças. As relações existentes entre as etapas de extrusão, secagem e queima das peças são bastante complexas e quaisquer mudanças nestas etapas do processo produtivo afetam toda a sequência da produção. No entanto, esta complexidade é muitas vezes negligenciada durante a produção e existem muito poucos estudos publicados sobre o tema.

A secagem seja ela natural ou artificial, requer grandes quantidades de ar para cumprir três funções básicas: o transporte do calor necessário à evaporação, o arraste do vapor d'água produzido e a redução da camada de vapor saturado formado na superfície da peça.

No estudo da fenomenologia da secagem da argila, observa-se que eficiência deste processo está ligada tanto às questões termodinâmicas das relações entre a água líquida, o vapor d'água e o ar seco, quanto à questões morfológicas do meio poroso que é a argila e a velocidade de secagem da peça.

Sob o aspecto termodinâmico, analisa-se a influencia da umidade relativa do ar no processo. A umidade relativa do ar é uma relação entre a pressão parcial do vapor contido neste ar e a pressão de saturação do vapor na sua temperatura. A pressão de saturação do vapor d'água no ar aumenta com a temperatura e quanto mais distante da pressão de saturação estiver a pressão parcial do vapor, maior a capacidade do ar de absorver o vapor d'água evaporada das peças a secar. Portanto, a capacidade do ar em absorver vapor d'água cresce com a temperatura, de modo que quanto maior a temperatura do ar maior a sua capacidade de secagem. Além disto, ar mais quente diminui o volume de ar necessário à secagem e em função disto as potências dos exaustores e circuladores de ar são reduzidas, diminuindo-se os custos de secagem. O calor contido no ar quente é utilizado para aquecimento da massa de produtos a secar, da massa estática do secador, para evaporar a água de umidade dos produtos e compensar as perdas inevitáveis em todo o sistema.

Entretanto, a velocidade de secagem da peça cerâmica é limitada pelo comportamento de meio poroso da argila. Como a umidade de peça se encontra no interior de seus poros, a forma e estrutura destes terão uma grande influência sobre o a secagem, de modo que mesmo sob um ambiente termodinamicamente favorável a evaporação da água, a umidade pode vir a ficar presa no interior dos poros da argila. Isto ocorre quando a superfície da peça seca muito rapidamente e os poros ainda cheios de água, mas muito estreitos, não fornecem umidade a uma taxa compatível com a da evaporação. A parte seca da peça sofre então uma contração, dificultando ainda mais a difusão da umidade do interior do poro para a superfície, o que limita assim a velocidade de secagem da argila.

Percebe-se assim a intrínseca e complexa relação entre o processo de extrusão, com sua influência nas propriedades do meio poroso, e o processo secagem.

De acordo com (Hartke, 2003), pode-se dizer que em termos gerais o processo ideal de secagem é dividido em quatro fases distintas: adaptação, saída da água coloidal, formação de vazios e expulsão da umidade intersticial. Na primeira fase ocorre a adaptação do produto às condições ambientais (temperatura e pressão), nas quais será efetuada a secagem. Em seguida evapora a água coloidal e ocorrem variações sensíveis das dimensões da peça devido à aproximação dos grãos da sua microestrutura. Ainda nesta fase a água constantemente migra até a superfície da peça, formando constantemente uma película úmida saturada que então evapora, tornando assim a velocidade de evaporação aproximadamente constante e função principalmente da porosidade da peça. Na terceira fase ocorre o desaparecimento do filme de água na superfície da peça, que muda de cor. Esta diminuição da quantidade de água que se desloca por capilaridade, ou difusão, acaba por formar vazios no interior da peça e a quantidade de água evaporada decresce gradativamente, havendo uma conseqüente redução da velocidade de evaporação e de secagem. A última fase da secagem, que nem sempre é alcançada nos secadores, sendo muitas vezes executada nos próprios fornos de queima, e a de expulsão das últimas quantidades de umidade, de origem intersticial, onde a velocidade de secagem diminui até valores próximos de zero.

Como a fenomenologia associada ao processo de secagem leva em conta aspectos microscópicos da peça de argila juntamente com aspectos macroscópicos do ambiente ao qual esta está exposta, a modelagem matemática da secagem é bastante complicada. Assim, uma série de hipóteses simplificativas teve que ser criteriosamente tomada a fim de garantir a "computacionabilidade" do problema e a qualidade da solução.

1.2. Esquema do secador contínuo analisado

O secador contínuo analisado no presente trabalho é similar ao encontrado na Cerâmica Heinig, em Brusque - SC, parceira do projeto desde o início das atividades de pesquisa. Este secador consiste de um longo túnel percorrido pela carga de tijolos a secar e pelos gases quentes de secagem em contracorrente, conforme a Fig. (1).

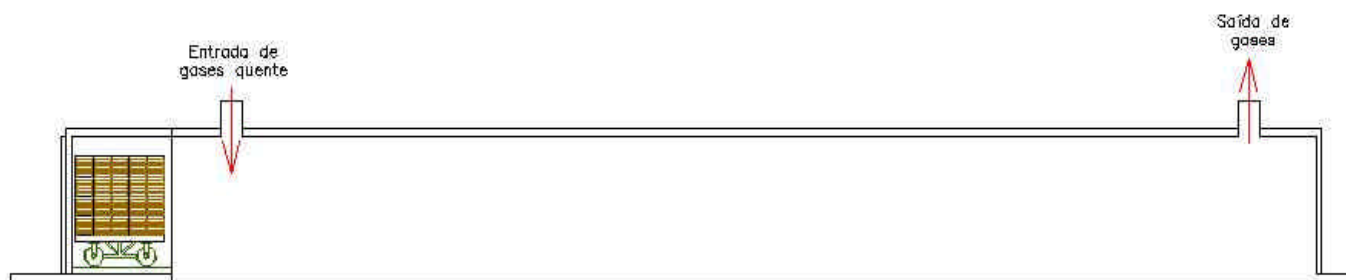


Figura 1. Perfil do secador contínuo analisado.

Um corte transversal do secador, mostrando as vagonetas que carregam os tijolos e as entradas de ar quente, é apresentado na Fig. (2). Nesta figura percebe-se que há uma simetria transversal neste secador, uma vez que os gases quentes entram no túnel por ambos os lados e o programa computacional pode se aproveitar desta característica.

Entretanto, por uma questão de flexibilidade do programa optou-se por considerar as paredes laterais esquerda e direita separadamente nos balanços de energia dos volumes de controle do secador.

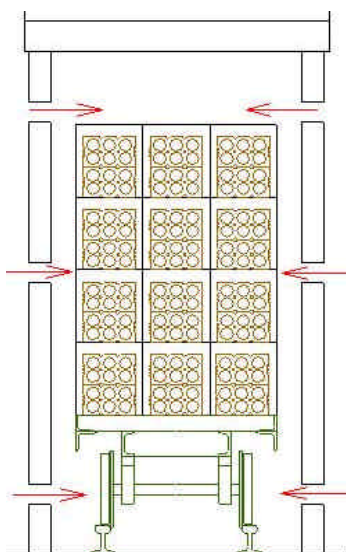


Figura 2. Corte transversal do secador contínuo analisado.

As características e dimensões deste secador, utilizadas na simulação numérica, encontram-se na Tab. (1).

Tabela 1. Características do secador simulado.

Comprimento do Secador (m)	40,0
Altura Interna do Secador (m)	2,0
Largura Interna do Secador (m)	2,0
Espessura da Parede Lateral Esquerda do Secador (m)	0,20
Espessura da Parede Lateral Direita do Secador (m)	0,20
Espessura da Parede Superior do Secador (m)	0,20
Espessura da Parede Inferior do Secador (m)	0,20
Área Superior da Carga de Tijolos (m ²)	0,0578
Área Lateral da Carga de Tijolos (m ²)	0,0867
Área dos Furos da Carga de Tijolos (m ²)	0,220
Área Frontal da Carga de Tijolos (m ²)	0,0425
Área Total da Carga de Tijolos (m ²)	4,0
Área da Superfície Interna da Parede Lateral Esquerda (m ²)	0,178
Área da Superfície Externa da Parede Lateral Esquerda (m ²)	0,196
Área da Superfície Média da Parede Lateral Esquerda (m ²)	0,187
Área da Superfície Interna da Parede Lateral Direita (m ²)	0,178
Área da Superfície Externa da Parede Lateral Direita (m ²)	0,196
Área da Superfície Média da Parede Lateral Direita (m ²)	0,187
Área da Superfície Interna da Parede Superior (m ²)	0,178
Área da Superfície Externa da Parede Superior (m ²)	0,213
Área da Superfície Média da Parede Superior (m ²)	0,196
Área da Superfície Interna da Parede Inferior (m ²)	0,178

2. Desenvolvimento do programa de simulação numérica

A modelagem matemática do processo de secagem foi feita utilizando-se o método das diferenças finitas, onde são comparadas as temperaturas no interior de volumes de controle discretos. A equação para o cálculo da temperatura de um ponto qualquer pode ser definida de várias maneiras, e aqui se adotou o balanço de energia pelas fronteiras do volume de controle como caminho para a determinação desta equação. Por se tratar da simulação de um secador contínuo, pode-se adotar a hipótese de regime permanente.

O programa computacional foi desenvolvido pelos autores na linguagem FORTRAN 90, utilizando-se um processo iterativo para o cálculo das temperaturas.

2.1. Balanços de energia no secador

Os balanços de energia foram desenvolvidos visando a posterior manipulação de cada equação para isolar a temperatura do interior dos elementos e assim calculá-la com a rotina computacional.

Os elementos carga são divididos na direção longitudinal e na altura do secador. As trocas de calor consideradas na modelagem são a convecção com o ar, a radiação com as paredes laterais, superior e inferior do secador e com os elementos superior e inferior de carga, havendo ausência de condução entre elementos de carga. Além disto, há o consumo interno de energia associada à mudança de fase da água, de líquido para vapor, durante a evaporação da umidade da carga. É considerada também a energia associada às vazões que cruzam as fronteiras do volume de controle, de carga e líquido entrando, e carga, líquido e massa evaporada saindo. Um esquema das trocas de calor consideradas em um elemento de carga encontra-se na Fig. (3), onde T_{-} refere-se à temperatura, m_{-} as vazões e os índices i e j referem-se às divisões longitudinais e verticais, respectivamente.

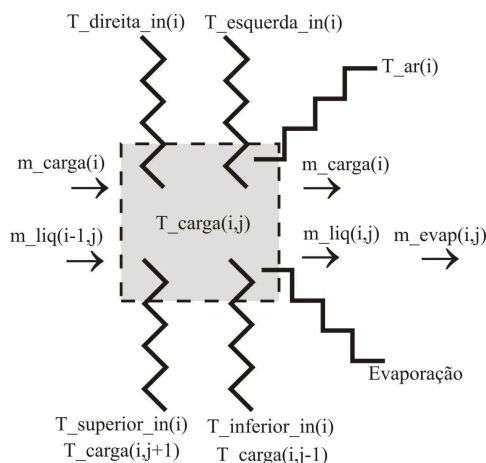


Figura 3. Esquema das trocas de calor de um elemento de carga.

A massa de ar circulante no secador é dividida na direção longitudinal do secador. Note-se que este ar é na verdade uma mistura de ar seco e vapor d'água superaquecido (umidade).

As trocas de calor consideradas na modelagem são a convecção com os elementos de carga e com as paredes lateral esquerda, lateral direita, superior e inferior do secador. Não é levada em conta a troca por radiação ou por condução. É considerada também a energia associada às vazões que cruzam as fronteiras do volume de controle, de ar seco, vapor e evaporado entrando e ar seco e vapor saindo. Entretanto não é considerada a possibilidade de condensação do vapor d'água (umidade) presente no ar e, portanto, não há nenhuma geração interna de energia associada à mudança de fase da água, de vapor para líquido. Um esquema do balanço de energia de um elemento de ar pode ser visto na Fig. (4).

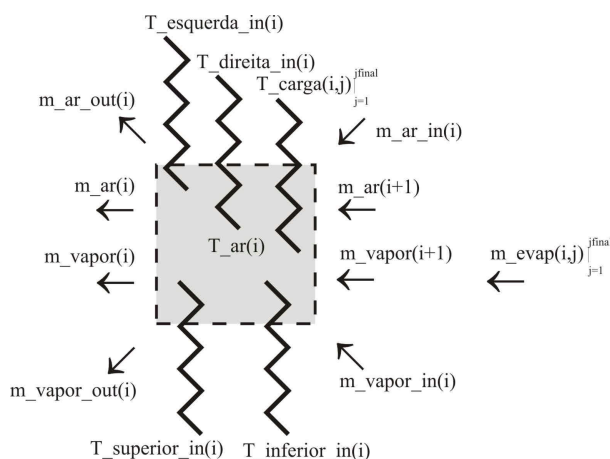


Figura 4. Esquema das trocas de calor de um elemento de ar.

Os balanços de energia das paredes lateral esquerda, lateral direita e superior são divididos em duas partes, uma interna e outra externa. O balanço para o piso é feito apenas pelo lado interno, uma vez que abaixo do piso considera-se a presença apenas de solo a temperatura constante.

Para as superfícies internas das paredes laterais, esquerda e direita, considera-se na modelagem a condução com a sua superfície externa, convecção com o ar e radiação com as superfícies laterais de todos os elementos de carga. Não

há nenhuma entrada ou saída de massa, e conseqüentemente de energia, pelas fronteiras do volume de controle. O esquema do balanço de energia para os elementos da parede lateral esquerda pode ser visto na Fig. (5), onde aparecem tanto a superfície interna quanto a externa.

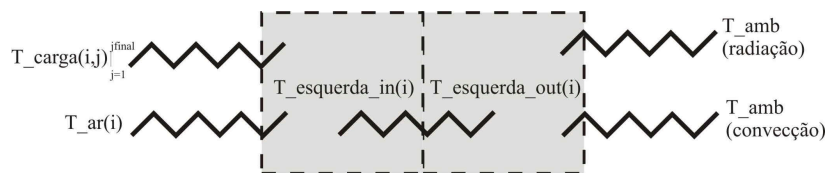


Figura 5. Esquema das trocas de calor de um elemento da parede lateral esquerda.

Os balanços de energia das paredes lateral direita e superior, tanto interiores quanto exteriores, são análogos aos da parede lateral esquerda.

No balanço da parede inferior do secador, aquela que compõe o piso, considera-se que há troca calor por convecção com o ar de secagem, por condução com interior da terra e por radiação apenas com o elemento inferior da carga. Um esquema de seu balanço de energia pode ser visto na Fig. (6).

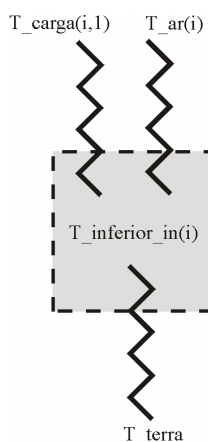


Figura 6. Esquema das trocas de calor de um elemento da parede inferior.

2.3. Balanços de massa no secador

Os balanços de massa dentro do secador foram divididos em duas partes: os balanços de massa dos elementos da carga e do líquido (umidade), e os balanços de massa do ar e vapor d'água.

Os balanços de massa da carga seca e do líquido (umidade), Fig. (7), são bastante simples, uma vez que a massa da carga é em base seca, havendo variação ao longo do secador apenas na quantidade de líquido presente em cada volume. Esta variação da massa de líquido é justamente a massa evaporada em cada volume de controle.

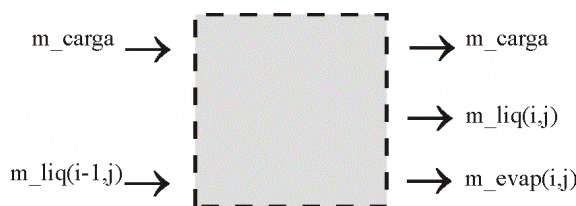


Figura 7. Balanço de massa da carga de tijolos.

Para que se possa determinar a quantidade de massa de líquido que evapora em cada volume de controle é necessário observar-se o fenômeno da evaporação mais detalhadamente e adotar-se algumas hipóteses simplificativas. A primeira hipótese considera que há continuamente uma interface entre a superfície do líquido presente na carga e o ar, e que nesta interface o ar encontra-se como saturado de vapor. Isto equivale a supor que a secagem ocorre de forma lenta, sem que a superfície da peça venha a tornar-se seca e que a mesma sofra contração. A segunda hipótese determina que toda a massa evaporada é proveniente do vapor encontrado na região saturada da interface e que o líquido evapora constantemente para manter esta região saturada. A terceira hipótese diz que quantidade de massa de líquido evaporada é proporcional à diferença de concentração de vapor no ar e na interface líquido-vapor saturada.

Primeiramente, é razoável considerar que na superfície de uma gota de líquido qualquer presente na carga haja uma interface entre o líquido e o ar, e que muito próximo desta interface o ar encontra-se saturado de vapor. Admite-se então que a massa evaporada seja proveniente desta região de vapor saturado e que sua quantidade seja proporcional à diferença de concentração de vapor no ar e na interface líquido-vapor. Assim o líquido evapora constantemente para

manter a região de interface saturada, independente da temperatura em que esta se encontre (desde que abaixo da temperatura de ebulição, pois acima desta o mecanismo propulsor da evaporação passa a ser outro). Tal concentração pode ser expressa de diversas formas, mas a mais conveniente de se trabalhar nesta modelagem é a absoluta, ou seja, na forma da fração de massa de vapor sobre massa de ar seco. A concentração expressa assim, como uma umidade absoluta, pode ser facilmente calculada para o volume de controle de ar, em função das próprias massas de ar seco e vapor d'água, e para a interface líquido-vapor, uma vez que esta se encontra saturada à pressão ambiente e sua temperatura é conhecida (sendo a mesma do elemento de carga). A taxa de massa evaporada é calculada conforme a Eq. (1), onde A_{carga} é a área do elemento de controle de carga, w_{sat_carga} e w_{sup_ar} são respectivamente as umidades absolutas, saturada da carga e superaquecida do ar, e $difusão$ é um coeficiente de proporcionalidade entre estas grandezas, que leva em conta aspectos do comportamento de meio poroso da argila.

$$m_{evap}(i,j) = difusao(i,j) A_{carga} (w_{sat_carga}(i,j) - w_{sup_ar}(i)) \quad (1)$$

O valor do coeficiente de difusão da massa evaporada no ar do secador consiste em um ponto crucial para o ajuste das curvas da simulação e atualmente realiza-se uma série de experimentos de secagem em estufa controlada para encontrar uma faixa valores adequados para esta variável. Sua influência no comportamento do secador contínuo será analisada a seguir.

O balanço de massa do ar possui muito mais termos, pois em cada volume de controle ocorre a entrada e saída de ar seco e vapor, longitudinalmente e transversalmente, além da entrada da massa evaporada (proveniente do líquido da carga no volume de controle). O esquema do balanço de massa do ar pode ser visto na Fig. (8).

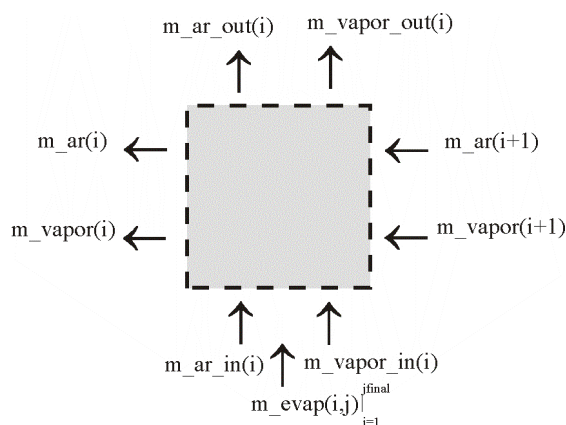


Figura 8. Balanço de massa do ar.

Entretanto as relações entre as massas que entram e saem do volume são bastante simples, sendo todas as entradas e saídas transversais já pré-determinadas como dados de entrada. A massa evaporada no volume já foi anteriormente calculada no balanço de massa da carga e da fase líquida (umidade). Assim, as entradas e saídas longitudinais de massa de ar seco e vapor d'água são resultantes da soma de todas as entradas e saídas de massa no volume de controle.

3. Resultados numéricos

Os principais resultados obtidos com a utilização do programa de simulação numérica são os perfis de temperatura de diversas regiões do secador, as parcelas de perdas de energia e as curvas de vazão de ar seco, vapor, líquido e evaporado, que servem para determinar as condições operacionais ideais de um secador.

Estes resultados são intimamente ligados ao tipo e modo de preparação da argila. A caracterização das relações entre a operação de secagem e estas variáveis vem sendo desenvolvida pela equipe de projeto, em paralelo a este trabalho. Na simulação estas complexas relações estão contidas no coeficiente de difusão da Eq. (1). Mesmo assim os dados da simulação numérica fornecem informações importantes sobre a tendência de comportamento de qualquer secador contínuo, quando da mudança de alguma variável operacional do mesmo, o que reforça a importância deste procedimento para a análise, projeto e ajuste de secadores.

Foi determinada uma curva de referência de secagem para o secador simulado no programa computacional, com as características e propriedades especificadas Tab. (2).

Tabela 2. Propriedades do secador simulado.

Calor Específico da Carga de Tijolos (J/kg K)	880
Calor Específico do Líquido (J/kg K)	4180
Calor Específico do Vapor d'água (J/kg K)	1900

Calor Específico do Ar Seco (J/kgK)	1010
Condutividade da Parede Lateral Esquerda (W/m ² K)	0,72
Condutividade da Parede Lateral Direita (W/m ² K)	0,72
Condutividade da Parede Superior (W/m ² K)	0,72
Condutividade da Parede Inferior (W/m ² K)	0,72
Fator de Forma da Terra (Incropera e De Witt, 2003)	1,4
Emissividade da Carga de Tijolos	1,0
Emissividade da Superfície Interna da Parede Lateral Esquerda	1,0
Emissividade da Superfície Externa da Parede Lateral Esquerda	0,90
Emissividade da Superfície Interna da Parede Lateral Direita	1,0
Emissividade da Superfície Externa da Parede Lateral Direita	0,90
Emissividade da Superfície Interna da Parede Superior	1,0
Emissividade da Superfície Externa da Parede Superior	0,90
Emissividade da Superfície Interna da Parede Inferior	1,0
Coeficiente de Difusão (kg/m ² s)	10 ⁻⁴
Entalpia da Mudança de Fase Líquido-Vapor da Água (J/kg)	2,50·10 ⁶

Com os resultados produzidos pelo programa de simulação numérica foram traçados diversos gráficos, os quais, depois de analisados e comparados uns aos outros, sugeriram uma condição de referência do funcionamento do secador, escolhida como aquela onde a menor vazão de ar quente é capaz de secar completamente a carga de tijolos. Esta condição de referência foi adotada como uma condição padrão e todas as análises comparativas de condições operacionais alternativas tomam-na como referência.

A vazão de ar quente utilizada nesta simulação é de 9,5 kg/s, ar este que carrega a umidade encontrada no ambiente para dentro do secador, 0,0939 kg/s de vapor. Este vapor representa no ambiente a 25°C exatamente 50% de umidade relativa, mas no ar quente apenas 1,87%. A vazão da carga de tijolos é de 0,0662 kg/s, o que é equivalente a uma produção de 22 vagonetas por dia, carregadas com 650 tijolos de 4,0 kg cada (base seca). A umidade dos tijolos na simulação é de 15 %, ou seja, uma vazão 0,00993 kg/s de líquido com a carga.

As curvas de vazão de vapor, líquido e vazão acumulada de evaporado são apresentadas na Fig. (9), onde se deve notar que as curvas de vazão de líquido e acúmulo de evaporado são coincidentes, pois lembrando que estas vazões percorrem o secador em direções opostas e percebendo que todo o líquido evapora até o final do secador, o acúmulo de evaporado será exatamente a vazão de líquido. Em outras palavras, toda a vazão de líquido que entra no secador pelo primeiro volume de controle deve evaporar e será a mesma vazão acumulada de evaporado a deixar o secador, também no primeiro volume de controle.

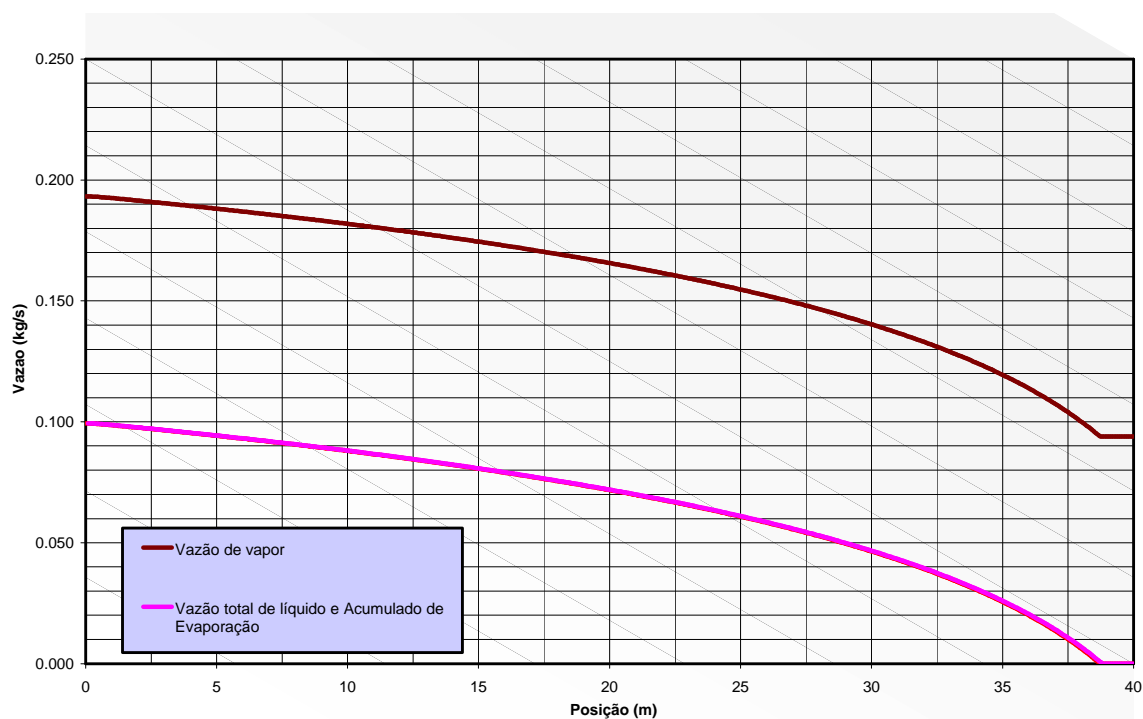


Figura 9. Vazões mássicas no interior do secador.

Uma outra variável importante para o controle do secador e para comparação entre a simulação numérica e as medições, é a umidade relativa do ar no interior do secador. A umidade relativa é uma propriedade de fácil medição e carrega consigo reflexos tanto da temperatura quanto da concentração de vapor do seu ambiente. Resultados para condições de diferentes vazões de ar quente são apresentados na Fig. (10). A curva de referência é a de vazão de 9,5 kg/s. Percebe-se nesta figura que a umidade relativa aumenta de forma não proporcional à diminuição da vazão de ar quente, pois além uma menor vazão de ar quente tornar-se saturada com uma menos vazão de vapor, ela ainda tende a se resfriar mais rapidamente por ter menor inércia.

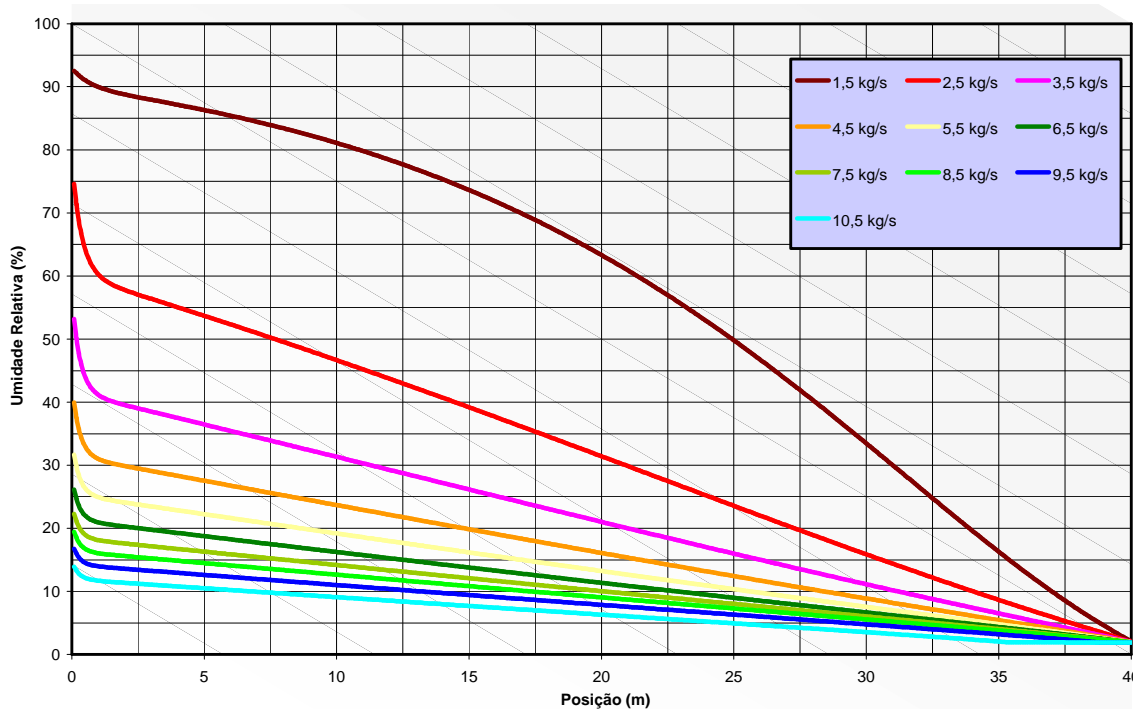


Figura 10. Umidade relativa do ar no interior do secador para diversas vazões de ar quente.

3.1. Balanço global de energia

No final da execução do programa de simulação, quando ocorrer a convergência do processo iterativo, deve-se proceder a um balanço global de energia, a fim de determinar se toda a energia que entra pelas fronteiras do sistema é igual, ou como se tratando de uma solução numérica, muito próxima, das quantidades que saem pelas fronteiras do sistema.

Portanto observam-se todas as entradas e saídas de energia e de massa que cruzam as fronteiras dos elementos mais externos do secador, ou seja, das paredes externas (esquerda, direita, superior e inferior), dos volumes inicial e final de carga, umidade, ar e vapor, assim como os fluxos transversais de ar seco e vapor d'água. As diferenças entre entradas e saídas devem ficar iguais ou muito próximas de zero. Naturalmente, em uma simulação numérica onde ocorra um processo iterativo de resolução do sistema de equação térmicas e fluidodinâmicas esta diferença nunca será zero, uma vez que existe uma tolerância da convergência a ser obedecida pelo programa de simulação, mas os valores do balanço global são um excelente indicativo da qualidade da simulação. Além disso, a análise dos valores do balanço global de energia fornece uma forma de se quantificar a eficiência energética da secagem, uma vez que se pode observar claramente qual a parcela de energia é destinada a cada parte do processo.

A Figura (11) mostra percentualmente energia consumida na mudança de fase líquido-vapor do líquido (umidade) presente na carga de tijolos em relação à perda total de energia, para as diversas vazões de ar quente especificadas. As curvas de maiores vazões demonstram que, naturalmente, a parcela de energia consumida na evaporação diminui continuamente após a secagem completa da carga. Percebe-se também nesta figura que para as vazões de 5,5 a 9,5 kg/s, esta parcela de energia encontra-se na faixa de 30,5 a 26,0 %, respectivamente. Estas vazões são justamente aquelas em cujas simulações a carga deixa o secador com uma umidade suficientemente pequena, seca o bastante para a posterior queima.

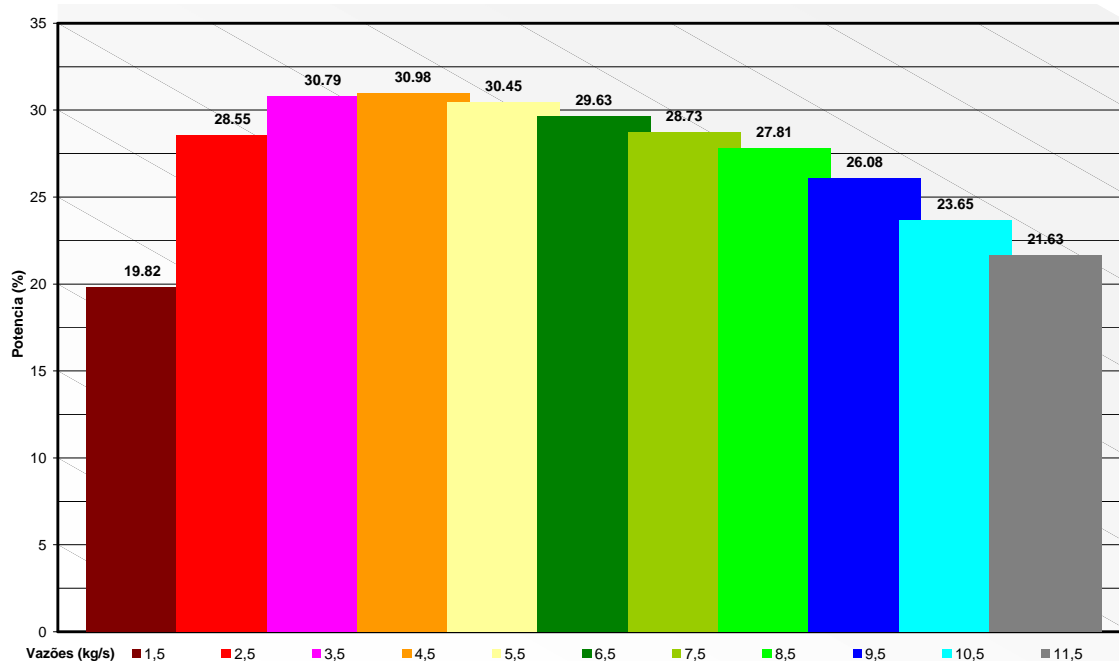


Figura 11. Parcela de potência (fluxo energético) consumida na evaporação.

A diferença de energia entre a entrada e saída do ar seco no secador para as diversas vazões de ar quente especificadas é mostrada na Fig. (12). Pode-se perceber uma leve tendência no valor desta diferença para vazões de ar capazes de secar completamente a carga de tijolos.

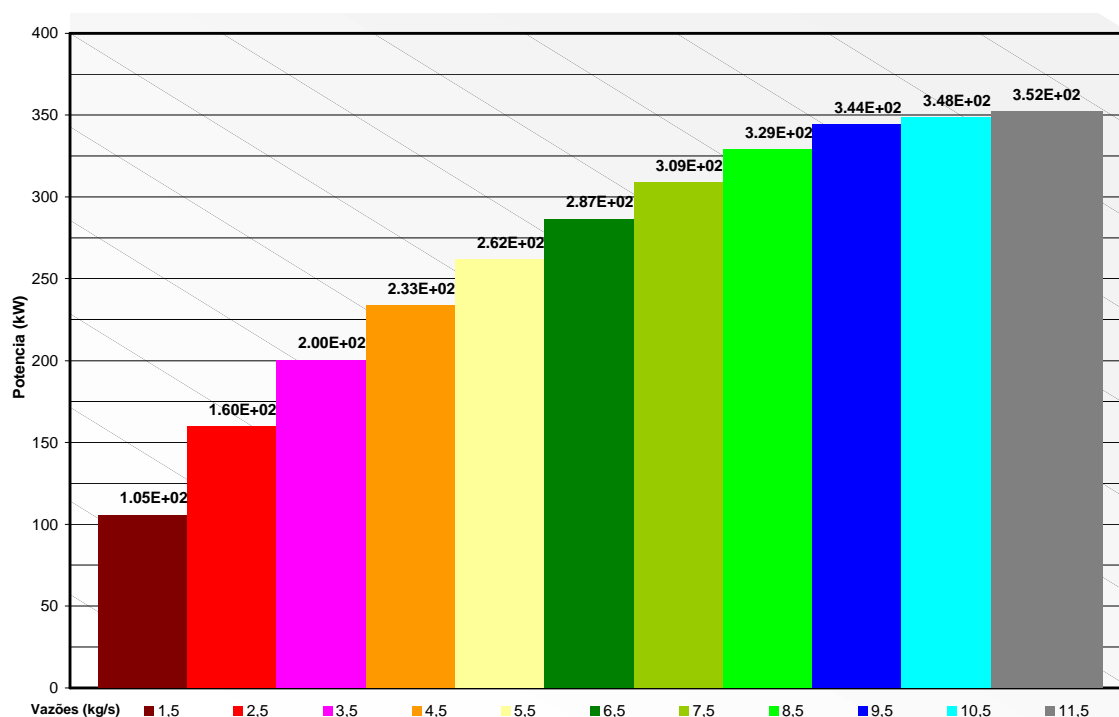


Figura 12. Diferença de taxas de energia entre a entrada e saída do ar seco no secador para diversas vazões de ar quente.

Analisando-se esta diferença de taxa de energia entre a entrada e saída do ar seco no secador, pode-se traçar um gráfico percentual da energia consumida com a evaporação do líquido em relação a esta diferença de taxa de energia, apresentado na Fig. (13), para as diversas vazões de ar quente especificadas nas simulações. Percebe-se neste gráfico, para as simulações com vazões maiores que 5,5 kg/s (aquelas capazes de satisfazer a secagem dos tijolos), que de 65,4 a 72,3 % da diferença de energia entre a entrada e saída do ar seco no secador ocorre pelo consumo com a mudança de fase líquido-vapor do líquido (umidade) da carga de tijolos.

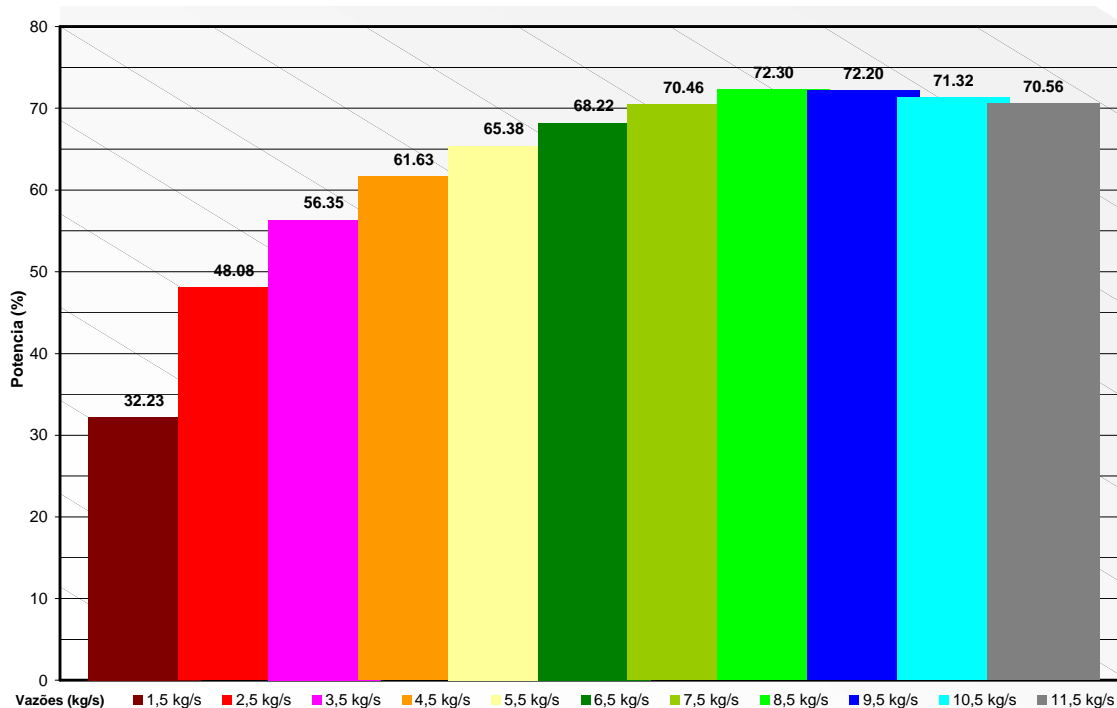


Figura 13. Parcela da diferença de taxa de energia entre a entrada e saída do ar seco no secador consumida na evaporação, para diversas vazões de ar quente.

3.2. O coeficiente de difusão

Foram simulados diferentes valores para o coeficiente de difusão. Estas simulações tomaram o caso de referência, no qual o coeficiente de difusão é $10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{s}$, e o seu valor foi alterado de 0,0 a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{s}$.

As curvas de umidade relativa do ar no interior do secador para os diversos coeficientes de difusão estabelecidos encontram-se na Fig. (14). Neste gráfico pode-se perceber que, para uma dada condição operacional, existem curvas limites para a umidade relativa no interior do secador. Estes limites são a curva em que nenhuma secagem ocorre, ou seja, difusão nula, e a curva em que a secagem completa ocorre somente no final do secador, ou seja, aquela em que a carga de tijolos deixa o secador no momento exato em que acaba de secar, neste caso a curva de difusão $1,00 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{s}$. Esta situação sugere que, conhecendo-se o comportamento do secador em questão pode-se desenvolver uma forma de determinar aproximadamente o coeficiente de difusão utilizando apenas medições da umidade relativa no interior do secador, o que serviria como um indicativo da qualidade do processo de mistura e extrusão das peças de argila.

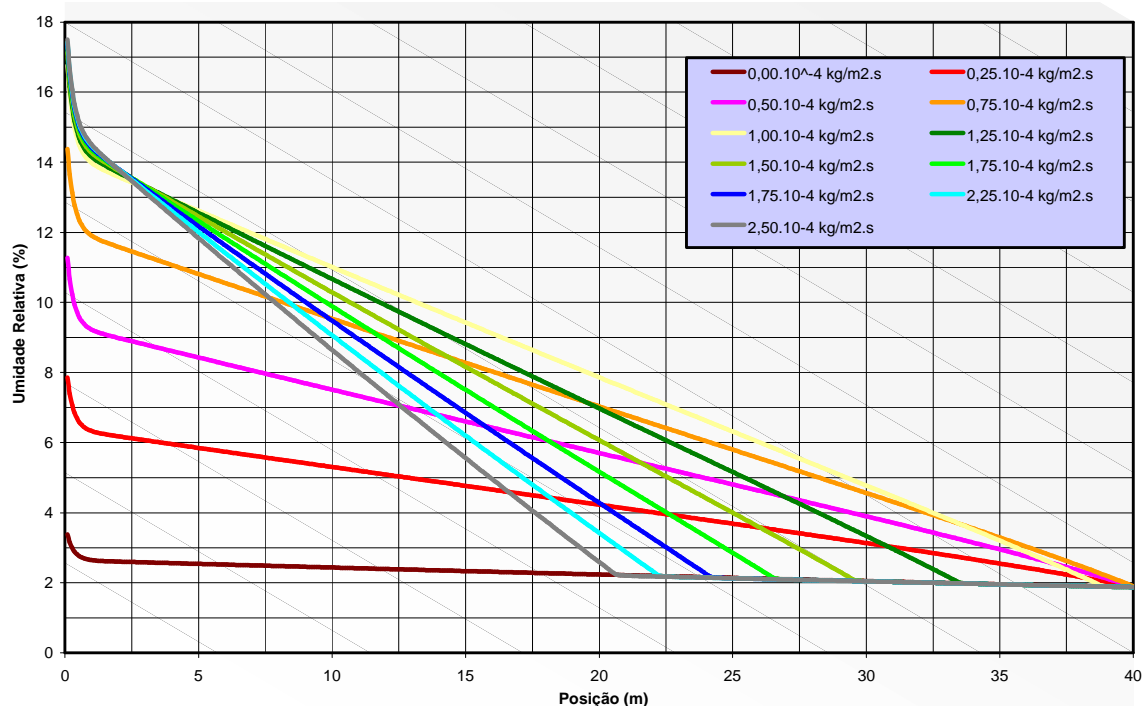


Figura 14. Umidade relativa do ar no interior do secador para diversos coeficientes de difusão.

4. Conclusão

A partir das curvas obtidas através dos dados fornecidos pelo programa de simulação é possível se observar às vazões de vapor que percorrem o secador bem como a distribuição de umidades relativas para as várias condições de operação. A análise destas curvas é importante para se implementar regulagens nos secadores que estabeleçam condições eficazes de secagem mantendo-se o custo energético desse processo dentro de limites aceitáveis.

Na Fig. (11) são apresentadas as condições de operação com maior aproveitamento energético do secador. As barras do gráfico representam percentualmente o quanto do montante de energia entrando no secador é consumido para a mudança de fase do líquido para vapor. A situação mais favorável sob este aspecto ocorre com uma vazão de ar quente de 4,5 kg/s. Neste ponto mais de 30 % da energia que entra no secador é utilizada para evaporação.

É interessante observar, a partir da Fig. (12), que a região de maior aproveitamento energético, indicada na Fig. (11) não coincide com a região de maior eficácia, isto é, a região a partir da qual existem as condições mínimas necessárias para a secagem completa das peças. Este fato ocorre pela incapacidade do ar quente a baixas vazões de retirar toda a umidade das peças. É necessária uma quantidade adicional de energia para se garantir a eficácia do processo, o que acontece com vazões a partir de 9,5 kg/s. Nesta região do gráfico percebe-se uma tendência assintótica do mesmo, pois não há mais umidade a ser retirada da carga.

Por fim, na Fig. (13), pode-se observar a condição ótima de operação do secador. As barras neste gráfico indicam quanto da energia consumida no interior do secador (evaporação e perdas), é utilizado efetivamente pelo processo de evaporação, ou seja, na condição de secagem completa da carga com o mínimo de vazão de ar quente. Como observado no início deste trabalho, este ponto corresponde às condições de referência escolhidas.

5. Agradecimentos

O presente artigo foi realizado com recursos do Projeto Multicliente PMC 73, 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).

O autor Rafael Fernando Hartke é bolsista 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 Heinig, Brusque-SC, onde o trabalho de medição foi realizado.

6. Lista de referências

EMPRESA JÚNIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA. *Determinação do Tempo de Secagem de Tubulação com Ar Superseco*. Relatório de Consultoria. Florianópolis: Ago. 1999.

- SENAI/CET TIJUCAS. *Curso de tecnologia em cerâmica vermelha – Módulo: massa, secagem, queima*. SENAI/CET Tijuca, 1996.
- SECTME. *Diagnóstico do setor de cerâmica vermelha em Santa Catarina*. Florianópolis: Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia, das Minas e Energia de Santa Catarina, 1990.
- C. M. F. VIEIRA, H. S. FEITOSA, S. N. MONTEIRO. *Avaliação da Secagem de Cerâmica Vermelha Através da Curva de Bigot*, Cerâmica Industrial, 8 (1), Janeiro/Fevereiro, (2003).
- D. A. BROSNAN, G. C. ROBINSON, *Introduction to Drying of Ceramics with Laboratory Exercises*, The American Ceramic Society (2003).
- MÁS, E. *Qualidade e Tecnologia em Cerâmica Vermelha*, Editora Pólo Produções LTDA, São Paulo, 2002.
- NICOLAU, V.P., HARTKE, R. F., LEHMKUHL, W. A., KAWAGUTI, W. M., JAHN, T. G., SANTOS, G.M. *Análise numérica e experimental de um forno túnel utilizado em cerâmica vermelha*. In: ENCIT 2002 – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. Caxambú, 2002.
- HARTKE, R. F. *Desenvolvimento de uma Ferramenta para Simulação de Secadores Contínuos Utilizados na Indústria Cerâmica Vermelha*. Relatório de Estágio Profissional em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Abril, 2003.
- INCROPERA, FRANK P., DE WITT, DAVID P. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 3ª Ed., 1990.

NUMERICAL ANALYSIS OF A TUNNEL DRYER IN THE STRUCTURAL CERAMICS INDUSTRY

Rafael Fernando Hartke
Laboratory of Combustion and Thermal Systems Engineering – UFSC
elemento@cet.ufsc.br

Willian Anderson Lehmkuhl
willian@cet.ufsc.br

Tales Gottlieb Jahn
tales@cet.ufsc.br

Vicente de Paulo Nicolau
vicente@lmpt.ufsc.br

Abstract

One of the most important stages in the ceramic production is the drying procedure. This stage must be synchronized with the burning process; otherwise the drying becomes a limitation for increasing the production. Surprisingly, very few studies on this topic exist yet. In a general way, the dryers are fed by a cheap energetic or by heat recovered from the kilns, which often use a more noble energetic. In this case, a poor balance between the amount of recovered energy and the amount of energy retired from the kiln can increase considerably the fuel consumption. Thus, the following question appears: Will the amount of available energy recovered in the kilns be enough to drive an efficient and synchronized drying process? The objective of this work is to present a study of the drying process and a numerical evaluation of main variables involved in the process, developing a tool that may serve the project and analysis of dryers. The present work has been developed along research activities and technological development for the application of natural gas in the structural ceramic industry.

Keywords: Structural ceramics, drying process, dryers, numerical simulation.