

ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA DE UM FORNO TÚNEL PARA CERÂMICA

Alessandro Pedro Dadam

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis - SC
alessandro@labcet.ufsc.br

Vicente de Paulo Nicolau

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis - SC
vicente@emc.ufsc.br

Resumo. A tecnologia existente para o projeto de fornos túneis é praticamente toda empírica, não havendo estudos relevantes que estabeleça diretrizes básicas na concepção de um forno novo ou na modificação de um já existente. Partindo desta premissa, vêm-se desenvolvendo ferramentas que permitem simular o funcionamento térmico de fornos e secadores, de forma a auxiliar no projeto de equipamentos mais eficientes e de menor custo. Assim, este trabalho consiste em desenvolver e aplicar uma ferramenta de simulação no auxílio ao projeto e à construção de fornos túneis. O forno estudado é um forno túnel, destinado à queima de produtos de cerâmica diversos, que permite a utilização simultânea de dois combustíveis, o gás natural e a serragem. Ao baixo custo desta última, será associada a facilidade de regulagem e a qualidade da queima do gás natural. Os resultados das análises térmicas desenvolvidas neste trabalho foram utilizados no projeto e na construção de um forno túnel. Estes dados, gerados pelas simulações, abrangem os perfis de temperatura das paredes, gases e carga ao longo do forno e todo o balanço energético envolvido.

Palavras Chave: Forno túnel, eficiência energética, simulação numérica, cerâmica.

1. Introdução:

As exigências do mercado mundial para a economia de energia e controle ambiental vêm crescendo nos últimos anos, e em consequência a indústria enfrenta novos desafios para se adequar à nova realidade deste mercado. Esta adequação passa por um completo rearranjo dos processos produtivos das empresas, desde a preparação da obtenção da matéria prima até a expedição e entrega do produto, com a adoção de novas tecnologias e atualização dos equipamentos existentes.

No caso particular das cerâmicas os fornos, elementos de essencial importância no processo produtivo, são em geral projetados, implantados e regulados de forma empírica, sem que se conheça a priori o seu comportamento e os efeitos de possíveis alterações nas suas regulagens.

No caso específico dos fornos tipo túnel, aparentemente uma tecnologia já dominada pela indústria cerâmica mundial, muito ainda tem-se a desenvolver com relação a controle, regulagem e adequação de novos projetos. A tendência dos fornos túneis mais modernos é que estes sejam projetados e construídos com melhor isolamento térmico nas paredes, e também privilegiando um revestimento da base cerâmica das vagonetas, diminuindo a inércia térmica do conjunto. Desta maneira, podem-se obter ciclos de queima mais rápidos, respeitando sempre os limites impostos pelas características de queima de cada material da carga.

Desta forma este trabalho trata do desenvolvimento de uma ferramenta numérica para auxílio no projeto térmico e também nas regulagens de fornos túneis. Outros autores também desenvolveram trabalhos de modelagem de fornos completos, os quais são citados na seqüência.

Abbakumov e Mociu (1981) propuseram um modelo que considera as equações do balanço de energia e balanço de massa dos gases e da carga, somente na zona de queima do forno. Yu (1994) apresentou um modelo que descreve os processos dinâmicos de um forno túnel. O modelo é baseado nas equações do balanço de energia e do balanço de massa, e considera a condução transiente de calor ocorrendo na carga e nas vagonetas, nas três zonas do forno. Segundo Yu (1994), os processos dinâmicos de um forno túnel são controlados justamente pela condução transiente bidimensional na carga e nas vagonetas. O modelo considera uma taxa de entrada de carga, calculado pelo intervalo de tempo no qual uma vagoneta, carregada de produtos ainda não queimados, é empurrada para o interior do forno e, simultaneamente, outra vagoneta, carregada de produtos queimados, é empurrada para fora do forno. Os perfis de temperatura dos gases e de concentração de oxigênio na zona de queima são conhecidos de acordo com os produtos a serem fabricados e de acordo o tipo e dimensões do forno, similarmente ao modelo de Abbakumov e Mociu (1981).

Santos (2001), realizou um estudo em que simula um forno contínuo tipo túnel. Seu trabalho foi baseado em um único modelo de forno, onde construiu um programa específico para o mesmo. Seus resultados numéricos foram comparados com dados experimentais, apresentando boa concordância. Ainda em seu trabalho, Santos (2001),

diferentemente de Yu (1994), usou como entrada do programa a quantidade de combustível e de ar de combustão, para obtenção da curva de temperatura dos gases e da carga, mantendo o aquecimento da estrutura do forno. A partir das simulações foram propostas e implantadas várias alterações no forno, como mais isolamento e alongamento da zona de resfriamento, obtendo resultados satisfatórios de economia e produtividade, relativos ao equipamento da empresa onde realizou as medições.

2. Forno Túnel

Estes são fornos em que a queima se faz de forma contínua, sem interrupção para descarga ou carregamento das peças. Ou seja, enquanto um lote de peças está chegando ao final da queima, outro lote está iniciando, sem descontinuidade do processo.

Nestes fornos as perdas de energia direcionadas ao aquecimento da estrutura tornam-se negligenciáveis, uma vez que o forno opera praticamente em regime permanente. Assim torna-se importante para a economia de energia, a observação dos fluxos de calor pelas paredes e a taxa de energia transportada através do conjunto carga-vagoneta para o exterior do forno, após o resfriamento.

A Fig. 1 apresenta um esquema de um forno túnel, dividido em três regiões, conforme as fases do tratamento térmico sofrido pela carga: pré-aquecimento, queima e resfriamento. Além da movimentação da carga, o esquema mostra os fluxos de gases de combustão e do ar de resfriamento, bem como um diagrama esquemático da distribuição de temperatura ao longo do forno.

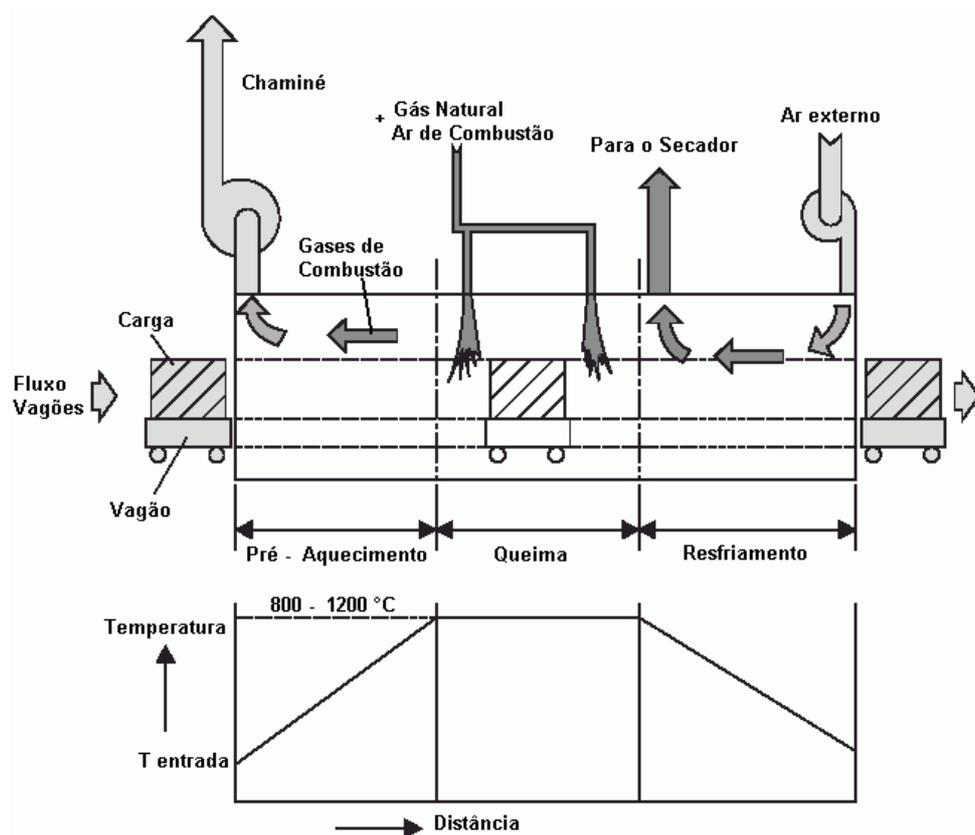


Figura 1: Esquema de um forno túnel (Caddet, 1993).

A Tab. 1 apresenta as dimensões características do forno utilizado como exemplo para a obtenção dos resultados deste trabalho. Estas são as dimensões de um forno projetado e construído em uma indústria cerâmica do sul de Santa Catarina. A simulação também poderia ter sido realizada com outros dados ou em um forno de tamanho diferente, sem nenhum problema, face à generalidade das equações.

Tabela 1: Dimensões características do forno estudado.

Item	Dimensão [m]
Largura útil carga	0,68
Altura útil carga	0,85
Comprimento do forno	63,30
Comprimento da zona de pré-aquecimento	14,70
Comprimento da zona de queima	21,85
Comprimento da zona de resfriamento rápido	3,55
Comprimento da zona de resfriamento	23,20
Espessura da parede do pré-aquecimento	0,65
Espessura da parede da zona de queima	0,85
Espessura da parede das zonas de resfriamento	0,50

3. O Programa Computacional

O programa computacional construído em linguagem *Fortran*, baseado em balanços de massa e energia segundo a técnica de volumes finitos (Maliska, 1995). Nesta análise é possível variar todos os parâmetros do forno como isolamento das paredes, fluxo de massa da carga, dimensões do forno e seus componentes, injeções de ar e retiradas de gases, entre outros parâmetros. Assim, se pode adequar o programa ao forno que se deseja estudar, seja para a simulação para casos de regulação ou na simulação para o projeto de um novo forno. Com os dados do forno já estabelecidos, escolhe-se o volume de combustível, o qual vai sendo variado até atingir a curva de queima desejada.

Portanto trata-se de uma ferramenta que permite realizar a previsão do comportamento do forno incluindo o consumo energético, a curva de queima, que é a distribuição longitudinal de temperatura da carga, a distribuição de temperatura dos gases do forno, as taxas de resfriamento e aquecimento dos gases e da carga, as perdas de energia de todos os componentes estruturais do forno e as taxas de energia transportadas pelo escoamento.

Um grande avanço desta ferramenta é a possibilidade de obtenção dos gradientes transversais de temperatura no interior do pacote da carga, e a implementação das reações termoquímicas sofridas pela carga durante o processo de queima.

A partir da realização dos balanços foi constatado que a energia fornecida pela queima de combustível é consumida basicamente em cinco destinos principais:

- Produtos: energia carregada na saída do forno pelo material queimado, vagonetas e suportes das peças, incluindo-se energia consumida na evaporação da umidade residual e nas reações endotérmicas no interior da argila.
- Chaminé: é a energia presente nos gases de exaustão;
- Perdas de calor: perdas por convecção e radiação para o ambiente através das paredes e por condução pelo piso;
- Secagem: energia reaproveitada para o processo de secagem;
- Aquecimento da estrutura: aquecimento do teto, piso e paredes. Esta parcela é mais significativa apenas quando ocorre mudança no regime de funcionamento do forno.

- Fisicamente o modelo pode ser representado segundo a Fig. 2 e considera as seguintes trocas de calor na execução dos balanços térmicos em cada elemento:

Troca de calor entre elementos da carga: Condução e radiação.

- Troca de calor entre elementos da carga – elementos da vagoneta: Condução e radiação.
- Troca de calor entre elementos da carga – parede interna: Radiação.
- Troca de calor entre elementos da carga – gases do forno: Convecção interna e lateral (somente nos elementos periféricos).
- Troca de calor entre elementos da vagoneta: Condução.
- Troca de calor entre elementos inferiores da vagoneta – base do forno: Radiação.
- Troca de calor entre elementos inferiores da vagoneta – gases circulantes na base do forno: Convecção.
- Troca de calor entre elementos internos – elementos externos da parede: Condução.
- Troca de calor entre elementos da parede interna – gases do forno: Convecção.
- Troca de calor entre elementos da parede externa – ambiente: Convecção e radiação.

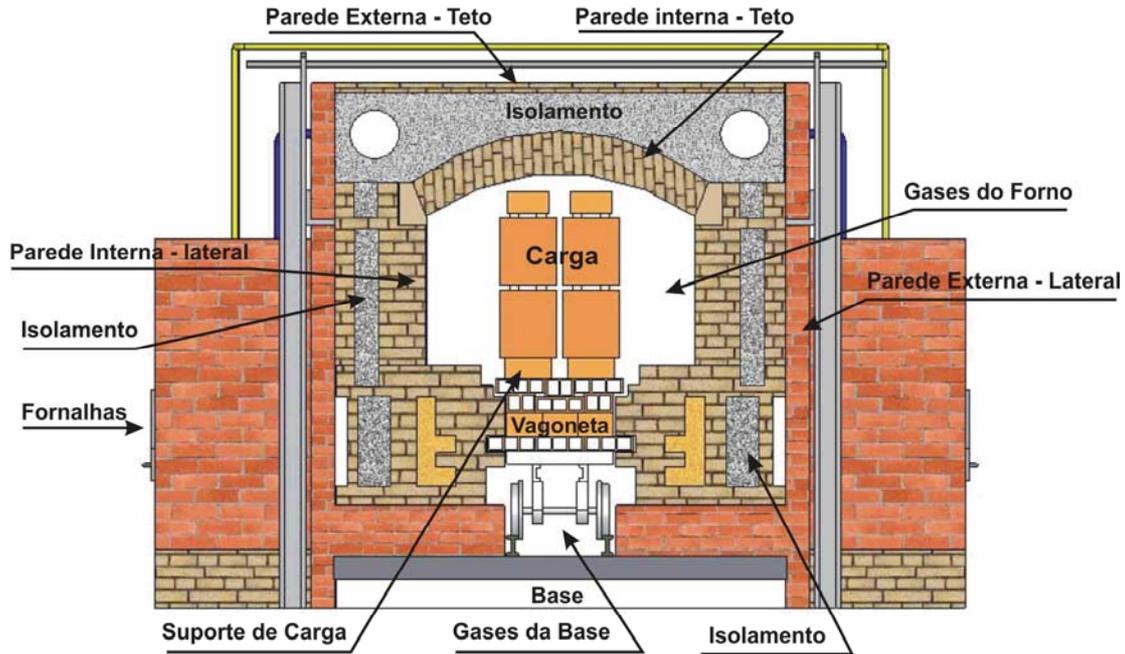


Figura 2: Representação da seção transversal do forno e da carga.

As equações foram escritas para cada elemento do forno, baseadas em balanços semelhantes ao apresentado pela Eq. (1), que representa, de forma genérica, o somatório de todas as trocas mencionadas anteriormente (Incropera e De Witt, 2003).

$$q_k'' \cdot A_k + q_c'' \cdot A_c + q_r'' \cdot A_r + \dot{E}_g + \dot{E}_t = 0 \quad (1)$$

Onde:

q_k'' representa o fluxo de calor condutivo, que atravessa cada uma das fronteiras do elemento, conforme a sua posição no interior do forno, dado em $[W/m^2]$;

q_c'' representa o fluxo de calor convectivo, que atravessa uma ou mais fronteiras do elemento, dado em $[W/m^2]$;

q_r'' representa o fluxo de calor radiativo trocado com superfície vizinha, conforme a posição do elemento, dado em $[W/m^2]$;

A_k , A_c , A_r são, respectivamente, as áreas de troca por condução, convecção e radiação, definidas conforme cada caso, dadas em $[m^2]$;

\dot{E}_g representa a taxa de energia, por unidade de volume, gerada ou consumida por um elemento, conforme as reações sofridas pela massa, dada em $[W]$;

\dot{E}_t Representa a taxa de energia transportada pela massa que entra e que sai do volume de controle, $[W]$.

Com base na formulação matemática originada a partir da equação apresentada acima, o programa computacional foi redigido. A Eq. (2) apresenta, como exemplo, a forma como os elementos do forno foram discretizados, segundo a técnica de volumes finitos (Maliska, 1995). Esta equação apresenta a discretização de um elemento de carga da vagoneta do forno.

$$\begin{aligned}
 0 &= k_{ec} \cdot (A_{sec} / Y_{ec}) \cdot (T_{ec}(ix, iy - 1, iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 1^\circ \\
 &+ k_{ec} \cdot (A_{sec} / Y_{ec}) \cdot (T_{ec}(ix, iy + 1, iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 2^\circ \\
 &+ k_{ec} \cdot (A_{iec} / X_{ec}) \cdot (T_{ec}(ix - 1, iy, iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 3^\circ \\
 &+ k_{ec} \cdot (A_{iec} / X_{ec}) \cdot (T_{ec}(ix + 1, iy, iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 4^\circ \\
 &+ h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot A_{iec} \cdot (T_{gf}(iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 5^\circ \\
 &+ h_{eec}(ix, iy, iz) \cdot A_{eec} \cdot (T_{gf}(iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 6^\circ \\
 &+ \sigma \cdot (A_{rsec} / ((1/\epsilon_{ec}) + (1/\epsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix, iy - 1, iz) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 7^\circ \\
 &+ \sigma \cdot (A_{rsec} / ((1/\epsilon_{ec}) + (1/\epsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix, iy + 1, iz) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 8^\circ \\
 &+ \sigma \cdot (A_{riec} / ((1/\epsilon_{ec}) + (1/\epsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 9^\circ \quad (2) \\
 &+ \sigma \cdot (A_{riec} / ((1/\epsilon_{ec}) + (1/\epsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix + 1, iy, iz) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 10^\circ \\
 &+ \sigma \cdot (A_{rtec} / ((1/\epsilon_{ec}) + (1/\epsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix, iy, iz - 1) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 11^\circ \\
 &+ \sigma \cdot (A_{rtec} / ((1/\epsilon_{ec}) + (1/\epsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix, iy, iz + 1) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 12^\circ \\
 &+ \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz - 1) - T_{ref}) & 13^\circ \\
 &- \dot{m}_{ecout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz) - T_{ref}) & 14^\circ \\
 &+ \dot{m}_{Reações}(ix, iy, iz) Q_{Reações}(ix, iy, iz); & 15^\circ
 \end{aligned}$$

Na Eq. (2) os quatro primeiros termos correspondem às trocas de calor por condução com os elementos vizinhos; o 5º e o 6º termos representam o aquecimento da carga pelos gases circulantes, através da troca por convecção interna e externa; do 7º ao 12º termos tem-se as parcelas de troca de calor com as superfícies vizinhas por radiação; o 13º e o 14º termos correspondem, respectivamente, à entrada e à saída de energia transportada com a massa da carga; o último termo refere-se às taxas de energia envolvidas nas reações inerentes às transformações sofridas pelas massas cerâmicas. Os termos referentes a Eq. (2) encontram-se descritos na Tab. 2.

Tabela 2: Nomenclatura referente aos termos da Eq. (2).

Alfabeto Latino		
A	Área	[m ²]
c _p	Calor específico	[J/kg·K]
h	Coefficiente de troca convectiva	[W/m ² ·K]
k	Condutividade térmica	[W/m·K]
\dot{m}	Fluxo de massa	[kg/s]
Q	Energia referente às reações da argila	[J/kg]
T	Temperatura	[K]
X	Dimensão na direção x	[m]
Y	Dimensão na direção y	[m]
a _{iec}	Área interna dos elementos de carga	[m ²]
Z	Dimensão na direção z	[m]
Alfabeto Grego		
ε	Emissividade	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² ·K ⁴]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
δ	Espessura da base do forno	[m]
Índices		
(iz)	Número de um elemento qualquer da malha do forno, na direção z	
(ix, iy, iz)	Número de um elemento qualquer na malha da carga	
ixL	Número máximo de elementos na direção x	

iyL	Número máximo de elementos na direção y
izL	Número máximo de elementos na direção z
Subscritos	
ec	Elemento da carga
ecin	Elemento da carga que entra no volume de controle
ecout	Elemento da carga que sai do volume de controle
fec	Frontal do elemento da carga
gf	Gases do forno
iec	Interna do elemento de carga
lec	Lateral do elemento de carga
Reações	Reações da argila com a temperatura
ref	Referência
sec	Superior do elemento de carga

A Fig. 3 apresenta o fluxograma relativo a este programa, o qual permite observar o fluxo de informações e a interação das subrotinas com o programa principal.

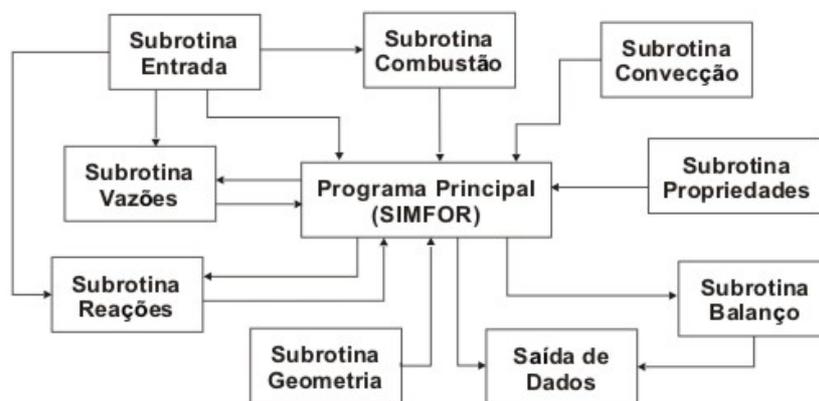


Figura 3: Fluxograma do programa computacional.

Na Tab. 3 encontram-se valores referentes ao tempo computacional relativo a cada malha e o equipamento utilizado para a simulação. Estes são tempos médios para as curvas mostradas na Fig. 4, com dedicação total do computador à execução do programa. Pode-se observar que mesmo com um computador mais robusto, o tempo computacional foi ainda de 12,2 horas. Com computadores mais robustos existentes atualmente no mercado, a discretização poderia ser ampliada para a área da parede e teto, para utilizar modelos de radiação mais detalhados.

Tabela 3: Tempo computacional utilizado nas simulações para diferentes tamanhos de malha para a carga.

Malha da carga	Tempo Médio [horas]	Processador [Mhz]	Memória RAM [Gb]
500x65x65	12,2	AMD 2.200+	1,5
500x50x50	6,0	AMD 2.000+	1,0
500x40x40	3,2	AMD 2.000+	1,0
500x25x25	1,3	AMD 2.000+	1,0
500x5x5	0,1	AMD 2.000+	1,0

4. Análise térmica do forno:

Com o programa computacional fez-se a simulação de um forno que foi construído para a produção de revestimentos cerâmicos extrudados, constituindo elementos de cerâmica vermelha. Com esta simulação se pode estudar diferentes condições operacionais para o forno, sendo que alguns dos valores das grandezas utilizadas como entrada nas simulações encontram-se na Tab. 4. Uma particularidade do forno estudado é a utilização simultânea de dois combustíveis, a serragem e o gás natural. A Tab. 4 apresenta dados das simulações para cinco níveis de produção diária do forno, dada em termos de área de revestimento cerâmico extrudado ou em termos de massa cerâmica

produzida. O consumo de cada combustível, bem como os relativos percentuais em termos de energia produzida, também estão indicados na Tab. 4.

Tabela 4: Simulações de diversas condições operacionais do forno.

Produção	[m ² /dia]	500	750	1000	1250	1500
Produção	[kg/s]	0,13	0,19	0,25	0,31	0,38
Gás Natural - GN	[m ³ /s]	0,00190	0,00195	0,00195	0,00195	0,00210
Excesso de ar - GN		1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Serragem	[kg/s]	0,065	0,070	0,110	0,130	0,155
Excesso de ar - serragem		1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Percentual de GN	[%]	12,1	11,6	7,7	6,6	6,0

A Fig. 4 apresenta as curvas de temperatura simuladas para o elemento central da carga, para os diversos níveis diários de produção (a produção está indicada em tamanho de área coberta pelo piso por dia). Nela pode-se observar que a curva para o nível de produção de 500 m²/dia, em função do escoamento do fluxo de gases e do baixo fluxo de massa de carga, tem-se uma taxa de aquecimento e resfriamento acentuada, ao contrário do nível de 1.500 m²/dia, que tem uma taxa de aquecimento e resfriamento mais lentos. Este comportamento das curvas da Fig. 4 se deve ao fato de que as trocas térmicas no sentido longitudinal em um forno túnel são em sua essência convectivas. Estes fortes gradientes longitudinais, ou rampas, de temperatura imposta sobre a carga podem acarretar danos ao material, indicando que para o forno utilizado os valores extremos se aproximam dos limites máximo e mínimo de produção.

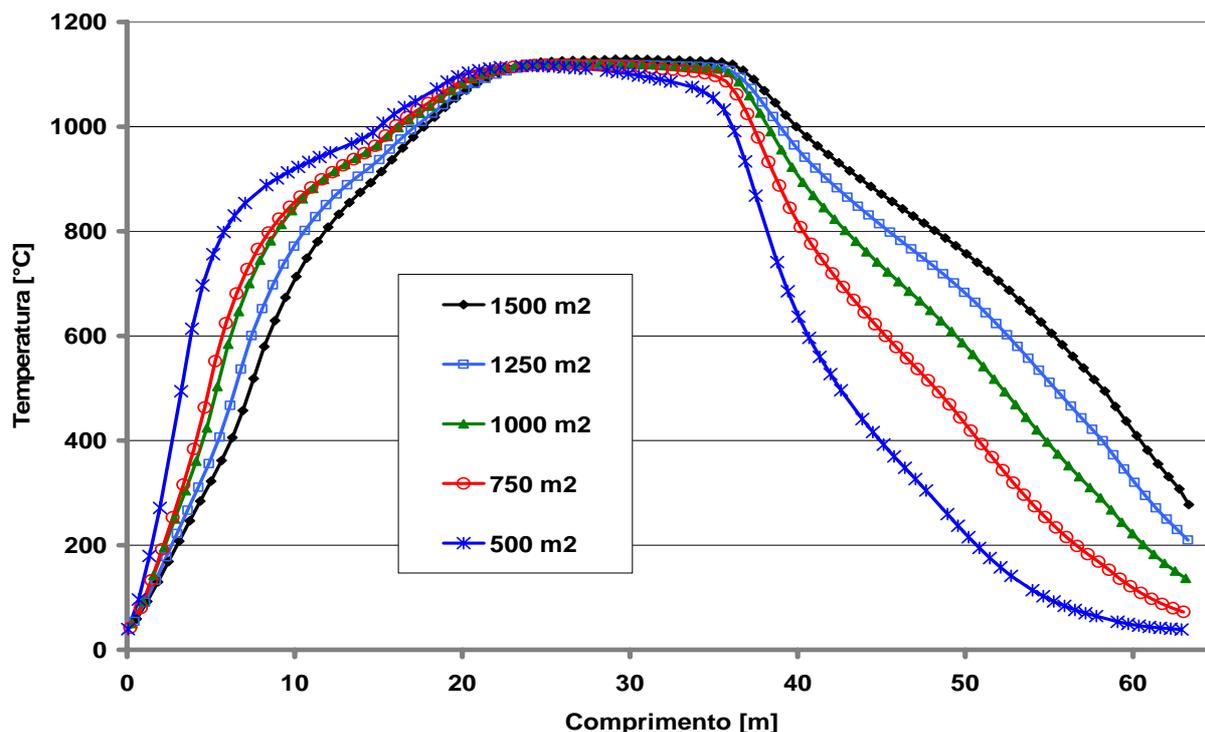


Figura 4: Temperaturas simuladas da carga para diversos níveis de produção diária do forno.

Além de se avaliar os gradientes de temperatura no interior da carga ao longo de todo o forno, deve-se ter cuidado especial com a região de resfriamento em torno da temperatura crítica de transformação do quartzo, 573°C, importante etapa causadora de trincas e rachaduras por dilatação nos produtos.

A Fig. 5 mostra um corte transversal da carga realizado a 60 metros da entrada do forno, no final da zona de resfriamento, com a região central tendo uma temperatura levemente elevada de 130°C e a periferia com 60°C.

Para o processo, o ideal seria a carga sair à temperatura ambiente ao final do forno, com o calor residual sendo recuperado para o processo de secagem. As simulações permitem avaliar se o resfriamento está adequado, ou se há necessidade de novas regulagens ou implementações de novos pontos de injeção de ar de resfriamento ou retirada de gases do interior do forno.

Os gradientes mostrados nas Fig. 4 e 5 podem ser quantificados e avaliados se estão ou não acentuados de acordo com testes realizados em laboratório para determinação dos limites toleráveis que podem ser suportados pelo material da carga.

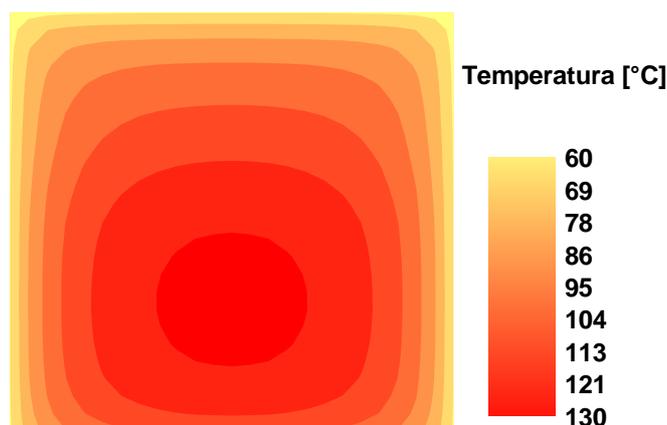


Figura 5: Perfil de temperatura transversal da carga, na região de resfriamento.

Por sua vez, a Tab. 5 apresenta os valores relativos ao tempo de queima e taxas de resfriamento do material no interior do forno para diferentes valores de produção. Para se triplicar o valor da produção diária deve-se triplicar a velocidade da carga, passando-se de 30 para 90 vagonetas/dia. A duração do ciclo de queima é afetada da mesma forma. A temperatura máxima da carga sofre pouca alteração. O tempo de permanência da carga em temperaturas acima de 1.100°C varia de 3,30 para 6,43 horas. O gradiente de temperatura no resfriamento da carga por volta de 573°C sofre uma duplicação com a triplicação da produção. No resfriamento rápido, região vizinha à zona de queima, onde se injeta um volume de ar frio para baixar rapidamente a temperatura até um valor próximo aos 573°C, os gradientes são maiores, mas a relação entre os valores já não se aproxima da duplicação quando se consideram as produções extremas. Esta análise mostra que o comportamento do conjunto é bastante complexo, não havendo uma relação linear entre tempo de permanência ou valores de gradientes com a produção, sendo a análise de grande valia para a determinação dos vários fatores que influem na regulação do forno e para a obtenção de uma curva de queima adequada.

Tabela 5: Valores de velocidades e taxas de resfriamento, referentes aos níveis de produções simulados.

Produção	Vagonetas	Velocidade da Carga	Ciclo Total	Temperatura Máxima da Carga	Tempo para T>1.100 °C	dT/dt médio para T=573 °C	dT/dt médio Resfriamento Rápido
[m ² /dia]	[diária]	[m/s]	[hora]	[°C]	[hora]	[°C/s]	[°C/s]
500	30	0,00042	42,9	1.116	6,43	-0,024	-0,038
750	45	0,00063	28,6	1.118	5,98	-0,022	-0,043
1000	60	0,00083	21,4	1.122	4,87	-0,028	-0,044
1250	75	0,00104	17,2	1.120	3,75	-0,040	-0,044
1500	90	0,00125	14,3	1.129	3,30	-0,048	-0,050

Adicionalmente, sabe-se que a velocidade limite de operação do forno é imposta pelas peças que estiverem mais frias, no interior do empilhamento. A uniformização de temperatura da carga é necessária para evitar que uma parte da mesma fique queimada demais, enquanto outra ainda reste crua. Além disso, a vagoneta deve ser composta por materiais isolantes e de baixa inércia térmica, evitando assim o consumo excessivo de combustível para o aquecimento desta.

A massa cerâmica sofre diversas transformações durante seu processo de queima, tanto endotérmicas quanto exotérmicas, e algumas são de grande importância no cálculo do consumo energético do forno e no controle de qualidade dos produtos. Assim, uma avaliação criteriosa do tipo de peça a ser queimada e do empilhamento desta deve ser realizada para determinar a curva de queima e resfriamento a ser utilizada no forno.

O empilhamento da carga exerce uma importante influência sobre o gradiente de temperatura no interior desta. Empilhamentos muito compactos dificultam o escoamento dos gases pelo interior da carga, e conseqüentemente, as trocas térmicas, retardando assim tanto o seu aquecimento, quanto seu resfriamento. Curvas simuladas de temperatura do interior da carga para diversos empilhamentos são apresentadas na Fig. 6, onde se percebe que os empilhamentos menos compactos, ou seja, aqueles com mais canais internos para passagem dos gases do forno, respondem rapidamente ao aquecimento na seção inicial do forno e ao resfriamento na seção final deste. Isto é muito desejável,

pois permite uma maior homogeneização da temperatura da carga, além de um maior aproveitamento do calor residual desta para o secador.

Este estudo foi realizado utilizando-se uma variável referente à área interna da carga (*aiec*), que representa a forma do carregamento para certo tipo de produto. O cálculo de *aiec* é então realizado a partir do produto que se deseja queimar, sendo que para o caso estudado utilizou-se a simulação com tijolos. Assim conhecendo-se o volume de um tijolo e o volume total do carregamento, pode-se determinar o número de peças que compõem o carregamento do forno. Em seguida, pode-se determinar a área interna total do carregamento através da área interna de cada peça, multiplicando esta última pelo número de peças. Para se saber o valor da área interna de cada volume da malha, basta dividir a área interna total do carregamento pelo número de volumes da malha, evitando-se erros no caso de um refino maior ou menor da malha relativa à carga. Os valores de *aiec* apresentados na Fig. 6, representam a porção da área interna da carga que efetivamente fica exposta ao escoamento.

Para *aiec* assumindo o valor de 0,01 tem-se uma baixa difusão de calor para o interior da carga. Este valor indica que apenas 1% da área interna da pilha de material transportada sobre a vagoneta fica exposta ao escoamento. É um valor baixo, mas não muito raro na prática, onde, em nome da estabilidade do conjunto, as peças são montadas de forma a resultar em uma boa amarração para a pilha. Assim, poucos canais restam abertos na pilha para permitir o livre escoamento dos gases e neste caso a transferência de calor deve ocorrer praticamente por condução. Já no caso de um valor superior a 0,5 passa-se a ter forte influência da convecção e a curva se distancia bastante da primeira. Estas últimas curvas são muito semelhantes à curva obtida para os gases circulantes no forno, indicando que os vários pontos da carga respondem rapidamente, pois têm um maior contato com estes gases. Uma área interna elevada não significa apenas uma carga porosa, mas uma carga bastante permeável, com diversos canais que permitam que os gases circulem facilmente. Furos como os existentes nos tijolos ou blocos só serão benéficos se forem alinhados nas várias peças no sentido transversal ou no sentido longitudinal. Furos bloqueados pelos tijolos vizinhos, colocados de forma transversal aos primeiros, serão resistências ao fluxo de calor, implicando em maiores resistências térmicas e retardo nos processos de aquecimento e de resfriamento.

Na Fig. 6 as curvas relativas à carga com maior área interna apresentam, no início do forno, uma maior troca com os gases e, portanto, rapidamente têm suas temperaturas elevadas, tendendo às temperaturas dos gases do forno. Em conseqüência, quanto maior a área interna da carga, mais eficiente será a troca de calor entre esta e os gases circulantes, alterando bastante o formato em relação às curvas relativas às cargas com menores áreas internas. Este fato também é observado nas outras regiões do forno como no resfriamento, onde as curvas de carga com menor área interna, portanto mais compactas, retêm mais energia em seu interior, saindo do forno com temperaturas mais elevadas. Este fato é indesejado, pois provoca uma retenção de energia na carga, energia esta que poderia ser aproveitada para o secador.

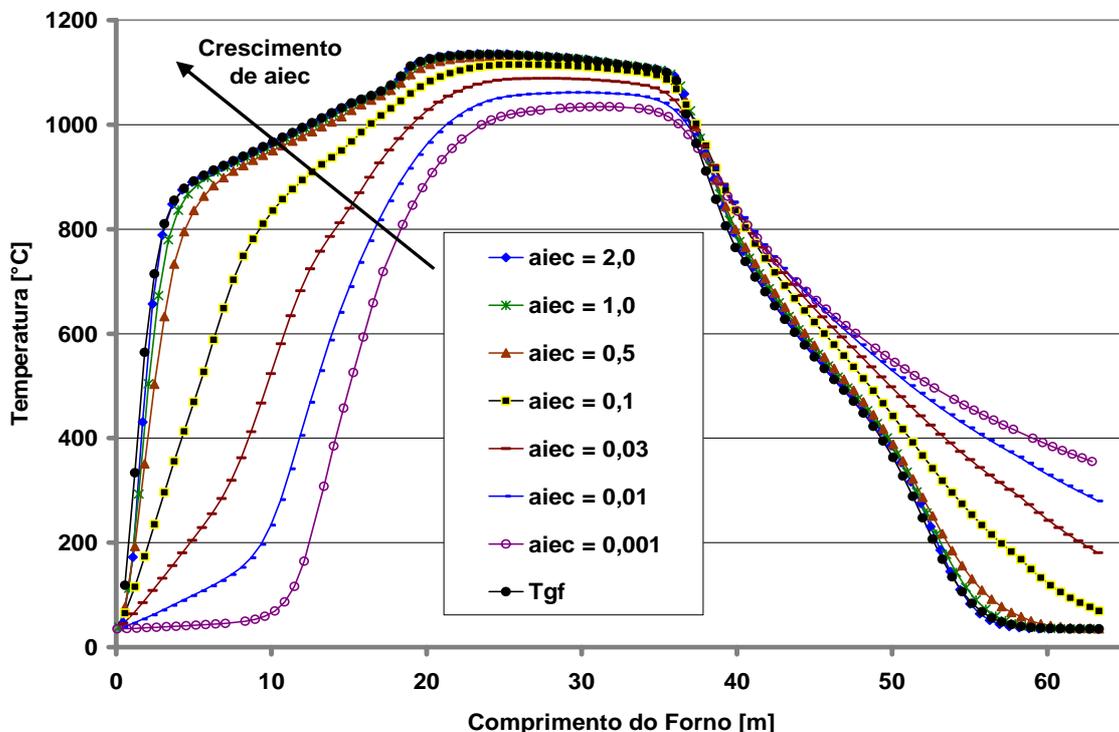


Figura 6: Curvas de temperatura do interior da carga para diversos empilhamentos.

Deste modo uma avaliação da forma do carregamento, associada ao tipo de peça a ser queimada, bem como uma avaliação da curva de queima e resfriamento, considerando o tipo de massa a ser usada, deve ser realizada para determinar qual valor a ser utilizado para a simulação do forno. Conforme os resultados das simulações, alterações podem ser feitas na forma de carregamento para alteração do valor da área interna da carga, e, em consequência, alteração da curva de queima simulada.

Nestas simulações a taxa de produção e o consumo de combustível foram mantidos constantes, segundo a Tab. 4, para um nível de produção de 750m² de pisos/dia, de forma a se poder avaliar a questão da recuperação de energia para o secador, na forma de ar quente e as perdas referentes à carga, registradas na Tab. 6.

Tabela 6: Comparação da recuperação de energia para o secador (*Fluxo rec secador*), perdas com a saída da carga do forno (*Fluxo carga out*), e saída da vagoneta (*Fluxo carro out*), em relação à energia total introduzida no forno, para diferentes valores da área interna da carga (*aiec*).

Área interna carga (aiec)		0,001	0,01	0,03	0,1	0,5	1,0	2,0
Fluxo carga out	[%]	6,23	4,80	2,91	0,84	0,03	0,00	0,00
Fluxo carro out	[%]	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00
Fluxo rec secador	[%]	7,42	8,42	9,67	11,10	11,50	11,51	11,51

Na Tab. 6 nota-se que à medida que a área interna do elemento aumenta, as perdas pela vagoneta, *Fluxo carro out*, e pela carga, *Fluxo carga out*, vão diminuindo e a recuperação para o secador, *Fluxo rec secador*, aumentando, como seria de se esperar. Quando a área interna do elemento atinge a relação igual a 0,1, as perdas pela carga e pela vagoneta já são inferiores a 1%. Este fato ocorre em função do escoamento de ar frio, que é injetado no interior do forno, trocar mais calor com a carga, pois quanto maior a área interna do elemento de carga, menor resistência é encontrada pelo escoamento e maior a área de contato, melhorando a troca térmica por convecção.

Pela Tab. 6 pode-se observar ainda a existência de um ponto limite, ao redor de *aiec* igual a 0,1, além do qual áreas internas maiores, resultam apenas em pequenos ganhos na recuperação de energia para o secador, não justificando o seu uso.

5. Balanço térmico e efeito do isolamento térmico

O balanço térmico permite mapear a destinação da energia introduzida no forno através da queima do combustível e, assim, oferece subsídios para a atuação tanto no projeto, para a introdução de obras de melhorias, quanto na regulagem, buscando a racionalização do uso desta energia térmica.

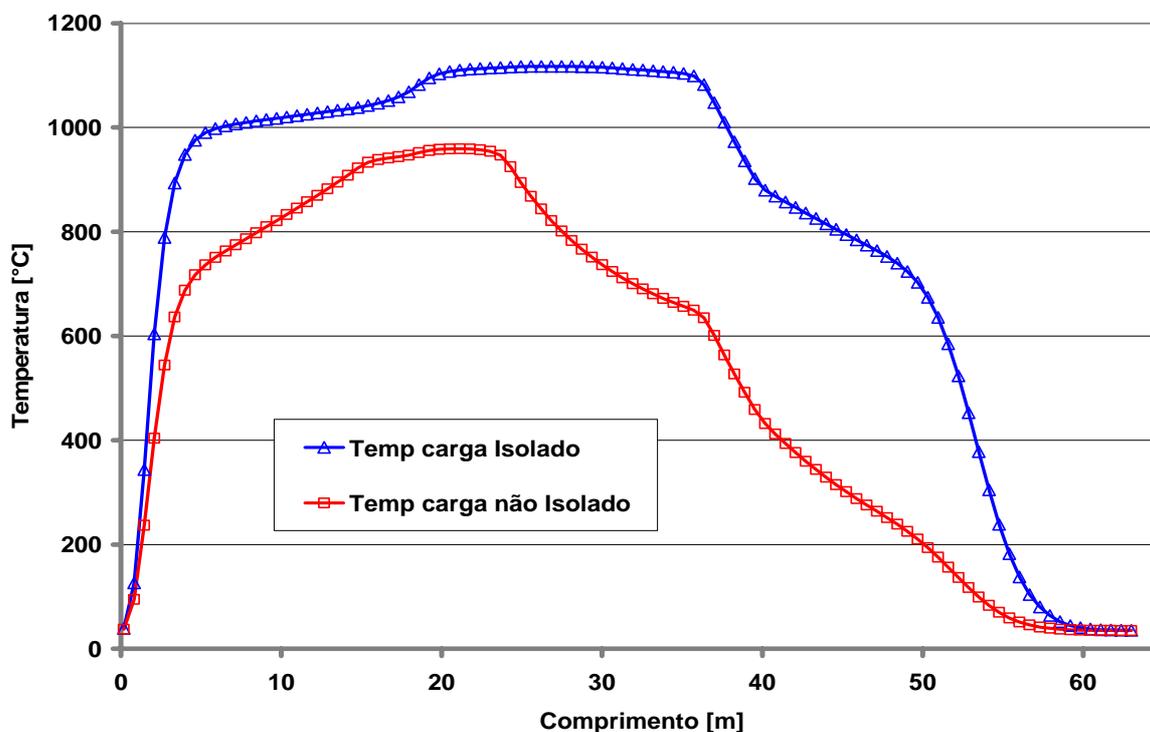


Figura 7: Temperatura do elemento central da carga, para as paredes do forno isoladas e não isoladas, produção de 750m² de pisos/dia.

A Tab. 7 mostra as taxas de distribuição de energia no forno obtidas através de um balanço térmico feito no programa de simulação, para um nível de produção de 750m² de pisos/dia. As propriedades dos materiais das paredes foram modificadas, ou seja, para o caso com isolamento toda parede foi construída com isolamento, enquanto que para o caso sem isolamento, toda a parede foi construída apenas com material refratário. Para estas simulações foi mantido o mesmo consumo de combustível e parâmetros dimensionais do forno, conforme Tab. 4. As distribuições de temperatura ao longo do forno são apresentadas na Fig. 7.

Como o consumo de combustível foi mantido constante nos dois casos, o forno não isolado, com as paredes de refratário, não atingiu a mesma temperatura de queima alcançada pelo forno com paredes o isoladas. A diferença entre as curvas mostra o efeito positivo da economia de energia que pode ser conseguido através do isolamento. Para se conseguir a mesma curva de queima com paredes não isoladas, mais combustível deve ser adicionado ao forno.

Na Tab. 7, a saída de energia associada aos gases de combustão ocorre após cada volume de gás avançar em contra-corrente com a carga, até a entrada do forno. A mesma não significa diretamente uma perda de energia, pois estes gases podem ser usados em um secador secundário, para secagem final e/ou pré-aquecer a carga. A parcela de recuperação para o secador provém do resfriamento da carga, feito com ar externo, sendo este ar enviado ao secador primário.

A taxa de energia residual presente na vagoneta e na carga, quando estas deixam o forno, é bastante baixa, fruto de um resfriamento eficiente, com boa ventilação. Este bom aproveitamento está demonstrado na Fig. 7 em que a temperatura final da carga é de cerca de 35°C, bem próxima da temperatura ambiente.

Tabela 7: Comparação das taxas de energia entre os casos com o forno isolado e sem isolamento.

	Isolado		Sem Isolamento	
	[kW]	[%]	[kW]	[%]
Perda pela abóbada	14,22	2,4	113,90	18,8
Perda pelas paredes laterais	53,06	8,8	164,38	27,2
Perda pela base do forno	27,81	4,6	18,50	3,1
Perda através da carga	0,05	0,0	8	0,0
Perda através das vagonetas	0,008	0,0	1	0,0
Gases de combustão	388,19	64,2	266,76	44,1
Recuperação para o secador	114,70	19,0	34,84	5,8
Gasto com reações	2,69	0,4	2,69	0,4
Energia proveniente do combustível	604,83	100,0	604,83	100,0

Analisando a Tab. 7 pode-se comprovar a grande perda pelas paredes e pela abóbada do forno, para o caso sem isolamento, resultando em uma baixa quantidade de energia que pode ser recuperada para o secador.

Outra constatação da Tab. 7, são os elevados valores de energia associada aos gases de combustão, principalmente no caso do forno isolado, onde se tem um valor correspondente a 64,2 % de toda a energia introduzida no forno através da queima do combustível. Esta energia está disponível, mas envolve uma grande quantidade de vapor d'água proveniente da combustão, da umidade residual das peças e ainda, como resultado da eliminação da água de constituição durante a reação da caulinita. Esta composição torna o aproveitamento destes gases mais difícil, pois a combinação de vapor d'água e gases da queima gera ácidos (na presença de enxofre), que podem corroer as partes metálicas de outros equipamentos e das vagonetas. Portanto, o aproveitamento destes gases pode ser feito, com o cuidado de que não sejam atingidas as condições para a condensação do vapor d'água contido nos mesmos.

Também a partir do balanço térmico, simulações foram realizadas para avaliar a influência de outras importantes variáveis de projeto e regulação do forno, como por exemplo, a influência das temperaturas do ar de combustão e de entrada da carga sobre o consumo de combustível. Os resultados apontam para uma economia de 9,6% de combustível, no caso do ar de combustão ser injetado a uma temperatura de 150°C, como mostra a Tab. 8. Com o aquecimento da carga na entrada a 150°C, a economia de combustível chega a 3,6%, conforme a Tab. 9.

Tabela 8: Economia de energia com o aumento da temperatura de entrada do ar de combustão.

Temperatura de entrada do ar de combustão	[°C]	100	150	200
Economia	[%]	5,4	9,6	13,8

Tabela 9 Economia de energia com o aumento da temperatura de entrada da carga.

Temperatura de entrada da carga	[°C]	100	150	200
Economia	[%]	2,1	3,6	5,3

6. Conclusão

Este trabalho mostra a eficiência de uma ferramenta numérica, tanto na regulagem, quanto no projeto de fornos túneis. Com esta se pode estudar a influência de variáveis isoladas sobre o comportamento do forno, mantendo-se as demais variáveis como constantes. Deste modo pode-se verificar qual o efeito de determinada regulagem a ser adotada no forno, sem que o mesmo esteja ainda operando, ou sem a necessidade de alterações de suas características, quando já estiver em operação. Portanto, o uso de modelos de simulação alia as características de facilidade de utilização e baixo custo operacional, além de representar um bom instrumento didático e de pesquisa, embora nem sempre acessível aos construtores e aos operadores dos fornos. Como exemplos têm-se os estudos da influência da temperatura de entrada do ar de combustão e da temperatura de entrada da carga na curva de temperatura do forno e a conseqüente economia de combustível.

Outro ponto estudado refere-se à influência do valor da área interna da carga na troca de calor com os gases circulantes do forno. Apesar da utilização de modelos simplificados, a partir de uma certa relação entre a área interna da carga e a sua área externa, pode-se perceber que as trocas térmicas se tornam bastante eficientes, reduzindo os gradientes de temperatura na carga. Estes resultados estão sendo seguidamente levados aos ceramistas e comentados com os mesmos, indicando a necessidade de abrir canais nas partes inferior e intermediária da pilha de material, facilitando o escoamento de gases e a troca de calor.

Através da realização dos balanços térmicos no programa de simulação, pode-se determinar a destinação de toda a energia térmica fornecida ao forno, incluindo a taxa de energia disponível para a utilização em outras etapas do processo, como a secagem ou diretamente no próprio forno, para o aquecimento do ar de combustão. No processo de secagem pode-se estimar se a taxa de energia originária do forno e disponível no processo é suficiente, ou se há ainda a necessidade da introdução de outras fontes auxiliares de energia.

Especificamente em relação ao programa de simulação devido ao seu grande comprimento e às próprias dimensões da seção transversal, a discretização do forno como um todo requer um grande número de elementos, aumentando o tempo de computação. Programas mais complexos, disponíveis no mercado, não conseguem simular todo o conjunto do forno com a precisão de detalhes, como o escoamento de gases no interior das peças cerâmicas.

7. Agradecimentos

O presente artigo foi realizado com recursos do Projeto Finep CTPetro P027, aprovado no âmbito da RedegásEnergia – Rede de Excelência do Gás Natural, envolvendo as empresas parceiras: Petrobrás S.A., Transportadora do Gasoduto Bolívia-Brasil (TBG) e a Companhia de Gás de Santa Catarina (SCGÁS).

Os autores agradecem também o consultor Walmir Bortolotto, bem como o proprietário e funcionários da Cerâmica Forgiarini, Criciúma-SC, onde o forno descrito foi construído.

8. Referências

- Abbakumov, V. G.; Mociu, E. F. *Mathematical model, computation method and insurance of the temperature distributions in the firing zone of a tunnel kiln*. Refractories, n. 2, p. 19-25, 1981.
- Caddet. Insulated carts for tunnel kilns in brick manufacture, 1993. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies.
- Dadam, A. P., Análise Térmica de um forno túnel utilizado na indústria cerâmica vermelha. 2005. Dissertação de mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 125p.
- Incropera, F.P. e De Witt, D.P., 2003, “Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa”, LTC Editora, 5ª Ed. Rio de Janeiro, Brasil, 700p.
- Maliska, C. R., 1995. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 424 p.
- Santos, G. M., *Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha*. 2001. Dissertação de mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - UFSC, Florianópolis, Brasil.
- Yu, B.. *Dynamic modeling of a tunnel kiln*. Heat Transfer Engineering, v. 15, n. 2, p. 39-52, 1994.

NUMERICAL THERMAL ANALYSIS OF A TUNNEL KILN USED IN CLAY CERAMICS.

Alessandro Pedro Dadam

Department of Mechanical Engineering
Federal University of Santa Catarina
Florianopolis – SC - Brazil
alessandro@labcet.ufsc.br

Vicente de Paulo Nicolau

Department of Mechanical Engineering
Federal University of Santa Catarina
Florianopolis – SC - Brazil
vicente@emc.ufsc.br

Abstract

The existing technology used in a tunnel kiln project is practically empirical, and have no studies that propose a basic line for the new kiln conception or a kiln modification. For this reason numerical tools were developed to simulate the thermal behavior of kilns and dryers in order to obtain more efficient equipments and with low cost. So, this work consists in a development and to apply numerical tools in the conception and in the operation of tunnel kilns. The kiln is a specific one used to burning some type of ceramics, and allows the use of two fuels simultaneously, natural gas and wood sawdust. To the low cost of the wood sawdust, will be associated the easy adjusting and the burning quality of the natural gas. The thermal analysis results were used in the project and in the building of a tunnel kiln. The results of the simulation include the temperature field through the walls, gas and load temperature profile along de kiln and a complete balance including all energy fluxes involved in the process.

Keywords: Tunnel kiln, Energy efficient, Numeric simulation, Ceramic.