

## **Análise Numérica Comparativa de Combustíveis Utilizados em Fornos Túneis**

**Alessandro Pedro Dadam\*, Vicente de Paulo Nicolau,  
Tales Gottlieb Jahn, Rafael Fernando Hartke**

*LabCet, Depto. de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina  
CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil*

*\*e-mail: alessandro@labcet.ufsc.br*

**Resumo:** Este trabalho trata de um estudo numérico comparativo entre três combustíveis, os mais utilizados pelas indústrias cerâmicas que utilizam forno túnel em suas linhas de produção. As simulações apresentam resultados interessantes, indicando as principais diferenças entre os combustíveis, e evidenciando a influência de cada um na temperatura da carga no interior do forno. Ainda outras características como a variação do excesso de ar, da umidade presente no combustível e temperatura do ar de combustão, foram analisadas.

**Palavras-chave:** *forno túnel, gás natural, óleo BPF, serragem, conversão, cerâmica vermelha, simulação numérica*

### **1. Introdução**

A utilização de combustíveis alternativos em fornos túneis, principalmente na indústria de cerâmica vermelha, é uma constante, principalmente por tratar-se de produtos de baixo valor agregado. É este fato que influencia a escolha dos combustíveis utilizados nos fornos fazendo com que a redução do custo influa muitas vezes na sobrevivência da própria empresa. Atualmente a biomassa, na forma de resíduo de madeira, como a serragem, é o combustível mais utilizado nestes fornos. Entretanto, algumas indústrias ainda utilizam lenha, e outras o óleo combustível, o GLP e algumas o gás natural.

Ainda que alguns produtos suportem o custo da utilização de combustíveis mais nobres como o gás natural e o óleo, sempre há dúvidas de ordem técnica, questionando se este irá substituir o anterior de forma eficiente e econômica, justificando o investimento em um novo sistema de queima. Também há muitas dúvidas no setor industrial acerca da capacidade de irradiação das chamas geradas em cada caso, fazendo crer que os mais radiantes são bem mais eficientes, sem levar em conta a quantidade de energia gerada.

Desta forma este trabalho traz um estudo numérico teórico comparativo do comportamento térmico de um forno túnel operando com três combustíveis distintamente. Os combustíveis estudados são: gás natural, óleo BPF A1 e biomassa na forma de serragem.

Este estudo foi realizado com o auxílio de uma ferramenta numérica que simula um forno túnel<sup>2</sup>. Criada em linguagem *Fortran*, esta ferramenta é baseada em balanços térmicos, utilizando a técnica de volumes finitos<sup>3</sup>, para a discretização dos elementos do forno.

Para a obtenção dos resultados pode-se 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. Com os dados do forno e um determinado volume de combustível, ou mesmo uma mistura de dois combustíveis, obtém-se a curva de queima desejada.

As características do forno foram mantidas constantes durante todas as simulações para facilidade de comparação e encontram-se na Tabela 1. Foi escolhido um forno relativamente pequeno, de 63,3 metros de comprimento com uma seção útil de carga de 0,68 por 0,85 metros, enquanto a produção ficou estabelecida em 0,19 kg/s (0,68 ton/hora), de produtos queimados, para uma temperatura máxima dos gases no interior do forno ao redor de 1.100 °C, utilizando a serragem como combustível e um excesso de ar de combustão de 1,5.

As variações encontradas nas curvas a seguir ocorrem em função das alterações das condições de combustão como: variação do excesso de ar, tipo de combustível, quantidade de combustível, umidade presente no combustível e temperatura do ar de combustão<sup>2</sup>.

### **2. Combustíveis**

A escolha dos combustíveis se deu pelo histórico e grau de utilização na indústria cerâmica. A biomassa por ser o combustível mais utilizado e contar ainda com uma reserva significativa em certas regiões do país; o óleo que teve na década de 70 um incentivo muito grande de seu consumo, e o gás natural e este por ser um combustível novo na matriz energética do país, e portanto em fase de expansão, necessitando de estudos para a adaptação do seu uso no mercado consumidor.

Para o estudo comparativo utilizou-se uma composição típica sugerida por Bazzo, 1995<sup>1</sup>, levando-se em conta a sua fração mássica ou volumétrica, de acordo com cada combustível. As Tabelas 2, 3 e 4 mostram estas composições, sendo que para a biomassa (no caso a serragem), o poder calorífico superior (PCS) é calculado em base seca e posteriormente no cálculo do poder calorífico inferior (PCI) é contabilizada a perda referente a umidade existente no combustível e pela água formada na reação de combustão.

A Tabela 5 apresenta as propriedades dos combustíveis calculadas pelo programa, a partir das composições apresentadas nas Tabelas 2, 3 e 4. No cálculo destas propriedades e das simulações apresentadas neste trabalho a temperatura de entrada do combustível é considerada a ambiente, no caso 35 °C, mesmo para o óleo BPF A1, que necessita de aquecimento. Este aquecimento se faz necessário para o transporte e pulverização do óleo nos queimadores.

### **3. Processo de Conversão**

Este processo exige um conhecimento amplo do forno e das características do novo combustível. Ao se introduzir um novo combustível as variáveis de queima sofrem mudanças, influenciando no fluxo de gases no interior do forno e conseqüentemente na sua curva de temperatura, impondo desequilíbrios e forçando uma modificação da regulação de todo o conjunto. Em muitos casos a conversão é realizada com o forno em produção e o principal problema reside em

se atingir rapidamente um novo ponto ótimo de regulagem do forno, evitando perdas acentuadas de produtos e danos ao próprio forno.

Assim, para a conversão é necessário realizar um estudo prévio para levantar as principais características de funcionamento do forno, e fazer o correto dimensionamento do sistema para a queima do novo combustível. Também características inerentes ao forno e carga devem ser avaliadas, como proximidade da fornalha e da chama em relação à carga, carregamento em pacotes ou contínuo, permeabilidade do carregamento decorrente da forma de empilhamento, tipo de produto, se a queima é superior, lateral ou mista, dimensões do

**Tabela 1.** Dimensões características do forno estudado.

Item	Dimensão (m)
Largura útil da carga	0,68
Altura útil da carga	0,85
Comprimento total 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

**Tabela 2.** Composição mássica da serragem 50% umidade.

Componente	C	H	S	O	cinzas	umidade
%	0,245	0,030	0	0,220	0,005	0,500

**Tabela 3.** Composição mássica do óleo BPF A1.

Componente	C	H	S
%	0,83	0,10	0,06

**Tabela 4.** Composição volumétrica do gás natural.

Componente	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
%	0,9200	0,0600	0,0200	0,0031	0,0137

**Tabela 5.** Propriedades dos combustíveis.

Combustível	Serragem 0% de umidade	Gás Natural	Óleo BPF A1
PCI (kJ/kg)	8.001	49.564	42.869
PCI (kcal/kg)	1.912	11.843	10.243
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	336	0,7768	1013
Razão entre a vazão de ar estequiométrico e a vazão de combustível (kg ar/kg comb)	2,9	17,2	13,3
Estado físico a temperatura ambiente	Sólido	Gasoso	Líquido

**Tabela 6.** Valores para os combustíveis, com excesso de ar e consumo específico idênticos.

Combustível	Serragem 50% de umidade	Serragem seca	Gás natural	Óleo BPF A1
Vazão de combustível (kg/s)	0,0811	0,0688	0,0111	0,0128
Vazão do ar de combustão (kg/s)	0,354	0,300	0,284	0,256
Vazão dos gases da combustão (kg/s)	0,435	0,334	0,296	0,268
Acréscimo de vazão dos gases (em relação ao óleo BPF) (%)	62	25	10	
Excesso de ar de combustão	1,5	1,5	1,5	1,5
Temperatura média dos gases da combustão que entram no forno (°C)	1.090	1.408	1.585	1.744
Consumo Específico (kg de produto queimado) (kcal/kg)	722	722	722	722

forno, estrutura da vagoneta e mobília utilizada. Estes dados somados a um estudo energético, deverão resultar na escolha de um sistema de queima adequado à situação e, portanto, cada caso deve ser estudado individualmente.

## 4. Resultados

Os combustíveis estudados no presente trabalho possuem características distintas, começando por seu estado físico: um combustível é gasoso, o outro é líquido e o terceiro é sólido. Em consequência a forma de manuseio e os sistemas de queima diferem significativamente de um para o outro, devendo estes aspectos ser considerados na escolha do combustível. Entretanto, a análise no presente trabalho resume-se ao desempenho térmico de cada combustível, suprimindo as diferenças acima citadas.

### 4.1. Caso 1: Mesma quantidade de energia e mesmo excesso de ar

Inicialmente simulou-se uma queima em que se mantém a mesma quantidade de energia introduzida pelo combustível e o mesmo valor do excesso de ar de combustão, de forma que o consumo específico ficou constante para todos os casos. Os valores usados são indicados na Tabela 6, incluindo o volume de combustível, o volume de ar e o volume de gases resultantes da combustão. Incluiu-se na análise o caso de serragem com 50% de umidade para comparação com a serragem seca. Como resultado da análise pode-se notar primeiramente a grande diferença de volume de gases produzidos pelos diversos combustíveis. Tomando o óleo BPF como referência, por ser o responsável pelo menor volume de gases de combustão, tem-se que a serragem úmida responde por um acréscimo de 62%, a serragem seca por 25%, enquanto que o gás natural utiliza um acréscimo de 10% nas condições simuladas. A comparação entre os fluxos de ar e de gases é feita em base mássica, pois as temperaturas diferem bastante, dificultando qualquer comparação em base volumétrica.

A Figura 1 apresenta curvas de temperatura para um ponto situado no interior da carga, para os diversos casos da Tabela 6. A curva relativa ao óleo atinge valores mais elevados, seguida das curvas para o gás natural, serragem seca e serragem úmida. Como a quantidade de energia é a mesma, a diferença se encontra no volume de ar utilizado na queima, bem maior no caso da serragem úmida. Também neste caso é necessária a evaporação de toda a umidade

presente e o vapor gerado deve ser aquecido até a temperatura dos gases de combustão.

A Figura 2 mostra as curvas para os gases circulantes dentro do forno, também para os 4 casos da Tabela 6. A mesma seqüência da Figura 1 é repetida aqui, com a diferença de que os gases estão em temperaturas superiores à da carga, na região de maior temperatura, na zona de queima. De um modo geral, pode-se notar que no início do forno, na zona de pré-aquecimento, como também na zona de queima, a temperatura dos gases é maior do que a da carga, pois os gases de combustão é que aquecem esta última, por convecção e por radiação. Já na zona de resfriamento a carga é refrigerada por ar injetado do exterior, estando a carga mais aquecida que este. Observa-se também que a curva resultante da queima de serragem úmida é mais plana, com um pico menos acentuado, pois o maior volume de gases circulantes causa uma maior troca convectiva com a carga, fazendo com que esta se aqueça tão rapidamente quanto nos demais casos para temperaturas até 600 °C.

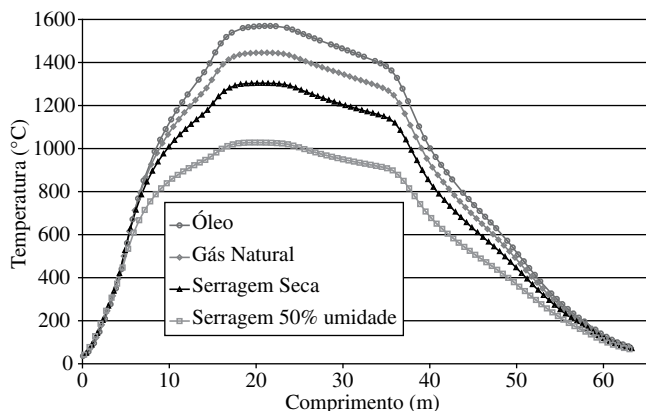


Figura 1. Temperatura central da carga no interior do forno para diferentes combustíveis.

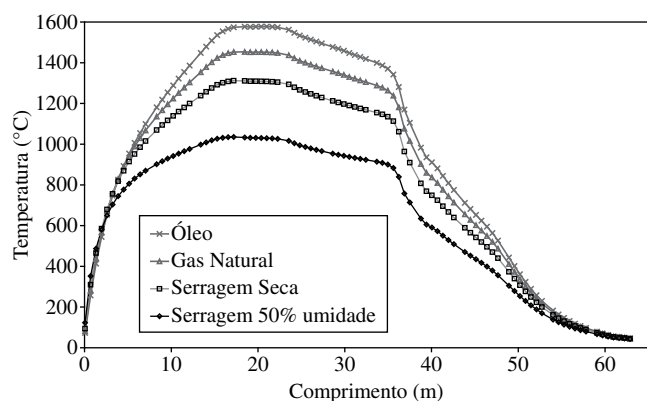


Figura 2. Temperatura dos gases do interior do forno, para diferentes combustíveis.

#### 4.2. Caso 2: Mesma temperatura de queima e mesmo excesso de ar

Os valores utilizados e os resultados da simulação estão na Tabela 7. A temperatura de queima está por volta de 1030 °C, sendo necessário um menor volume de gás natural, seguido de óleo e finalmente um maior volume de serragem, para se atingir esta temperatura. A maior quantidade de energia é gerada pela serragem, pois está associada a um maior volume de ar de combustão. A menor quantidade vem do óleo combustível, pelo menor volume de ar necessário. O gás natural é usado em menor taxa, comparado ao óleo, mas tem um poder calorífico maior.

Com os dados apresentados na Tabela 7, a Figura 3 apresenta a distribuição de temperatura ao longo do forno para um ponto central no interior da carga. As taxas de energia fornecidas pelos diferentes combustíveis foram variadas de modo a se obter praticamente a mesma temperatura máxima, que ocorre no início da zona de queima.

O efeito do maior volume de gases gerados com a queima da serragem se faz notar por uma curva que se destaca na região de pré-aquecimento, em relação às curvas para o gás natural e para o óleo. Isto advém de uma troca convectiva mais eficiente no caso da serragem, preparando melhor a carga para a queima, de forma a ter uma subida de temperatura menos íngreme ao se aproximar da zona de queima.

#### 5. Excesso de Ar

O excesso de ar é a porção de ar fornecida além da quantidade estequiométrica, necessária em uma reação de combustão. A quantidade estequiométrica de ar, aquela fornecida pela reação química, seria suficiente para a realização da reação de combustão; entretanto para que esta se realize de maneira completa, outros parâmetros devem estar de acordo, como a temperatura, gradientes de concentração da mistura e forma da câmara de combustão. Um excesso de ar de 1,25 significa que está sendo utilizada uma quantidade adicional de 25% de massa de combustível, além do valor necessário determinado pelo

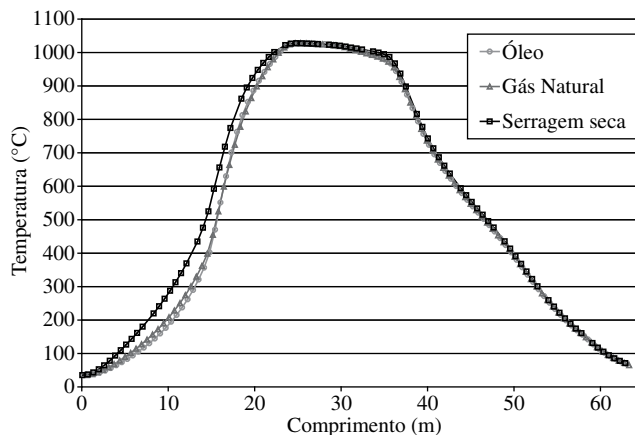


Figura 3. Temperatura da carga para diferentes combustíveis com mesmo excesso de ar e a mesma temperatura máxima.

Tabela 7. Valores para diferentes combustíveis, com a mesma temperatura de queima e mesmo excesso de ar.

Combustível	Serragem Seca	Gás Natural	Óleo BPF A1
Vazão de combustível	0,02842	0,00414	0,00466
Vazão do ar de combustão (kg/s)	0,123	0,106	0,093
Vazão dos gases da combustão (kg/s)	0,138	0,110	0,098
Excesso de ar de combustão	1,5	1,5	1,5
Energia Gerada pelo Combustível (kW)	227	205	200
Diferença (relação à serragem) (%)		10	12
Temperatura máxima da carga (°C)	1031	1034	1033

balanço estequiométrico da reação. Assim para garantia da ocorrência da reação, evitando-se a chamada combustão incompleta, adiciona-se um determinado excesso de ar. No entanto quando se tem um valor além do necessário, energia também é desperdiçada para aquecer o volume de ar em excesso. Desta maneira o valor deve ser criteriosamente regulado para não haver perdas de energia, pelo primeiro ou pelo segundo motivo. Na Tabela 8 são encontrados valores usuais de excesso de ar indicados pela literatura para os combustíveis estudados neste trabalho.

A Figura 4 mostra as curvas de temperatura para o elemento central da carga, sendo o forno alimentado com os combustíveis estudados e com os excessos de ar indicados na Tabela 8. Para o óleo usou-se um excesso de ar de 1,10<sup>4</sup>, e para o gás natural usou-se 1,12<sup>1</sup>. Para a serragem foi usado o valor de 1,25<sup>4</sup>. Neste caso usou-se a mesma taxa de energia para os três combustíveis e estes valores são idênticos aos valores usados na Tabela 6, ou seja 722 kcal/kg, mantendo-se também o mesmo fluxo de carga através do forno. Os fluxos de gases e combustível são apresentados na Tabela 9.

Os resultados da Figura 4 são muito próximos aos da Figura 1, ou seja, a maior temperatura da carga é atingida com a queima de óleo, seguida da curva relativa ao gás natural. O uso do mesmo valor de taxa de energia para a serragem implica em uma temperatura menor, em função do volume de ar utilizado.

Mantendo-se um excesso de ar de 25% para a serragem com 50% de umidade, obtém-se uma temperatura ao redor de 1.255 °C, com uma taxa de energia de 550 kW. Ajusta-se então os valores de excesso de ar para o gás natural e para o óleo combustível para se obter a mesma temperatura ou temperaturas próximas, mantendo-se a mesma taxa de energia, conforme a Tabela 10. Como resultado, o excesso de ar para o gás natural fica em 1,92 (quase 100%) e em 2,12 para o óleo BPF A1 (acima de 100%). Observa-se também que os volumes dos gases da combustão passam a ser muito próximos, o que era esperado, pois estando o forno na mesma temperatura, com a mesma geração de energia e o mesmo volume de carga escoando, restaria apenas o volume de gases a ser igualado. A Figura 5 mostra

**Tabela 8.** Excesso de ar de combustão para a fornalha ou queimador conforme literatura.

Combustível	Excesso	Autor
Óleo Combustível	1,10	Vlassov <sup>4</sup>
Óleo Combustível	1,17	Bazzo <sup>1</sup>
Gás Natural	1,07	Vlassov <sup>4</sup>
Gás Natural	1,12	Bazzo <sup>1</sup>
Serragem	1,25	Vlassov <sup>4</sup>

**Tabela 9.** Valores usados para a simulação com excessos de ar dados na literatura.

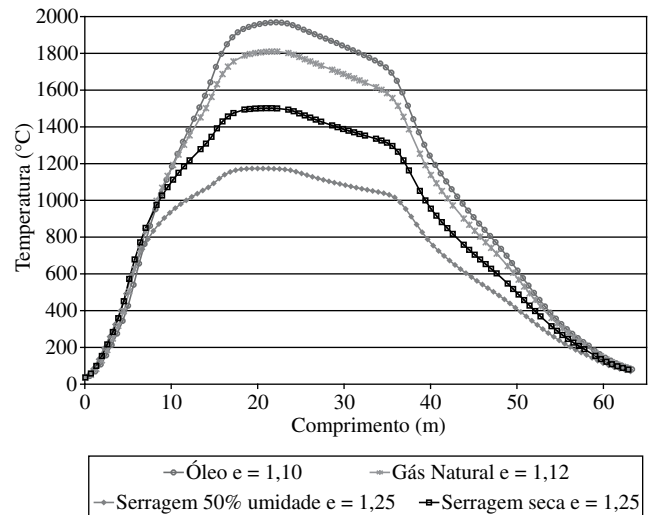
Combustível	Serragem 50% de umidade <sup>4</sup>	Serragem 0% de umidade <sup>4</sup>	Gás Natural <sup>1</sup>	Óleo BPF A1 <sup>4</sup>
Vazão de combustível (kg/s)	0,0811	0,0688	0,0111	0,0128
Vazão dos gases da combustão (kg/s)	0,376	0,284	0,225	0,200
Vazão do ar de combustão (kg/s)	0,295	0,250	0,213	0,187
Excesso de ar de combustão	1,25	1,25	1,12	1,10
Temp. média da combustão (°C)	1.255	1.649	2.075	2.326
Energia gerada pelo combustível (kW)	550	550	550	550

**Tabela 10.** Valores usados para a obtenção dos perfis de temperatura da Figura 5.

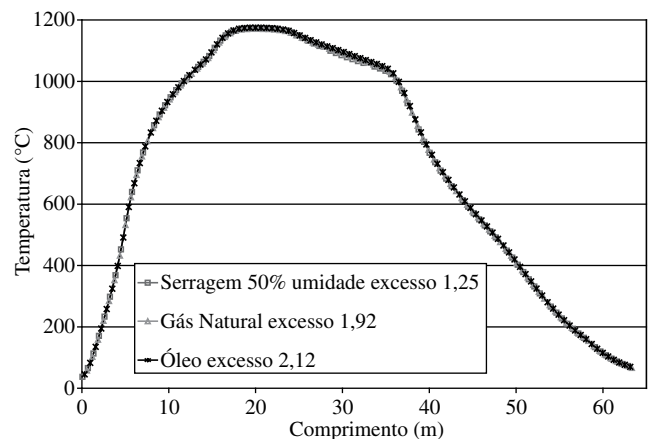
Combustível	Serragem 50% de umidade	Gás Natural	Óleo BPF A1
Vazão de combustível (kg/s)	0,0811	0,0111	0,0128
Vazão dos gases da combustão (kg/s)	0,376	0,375	0,374
Vazão do ar de combustão (kg/s)	0,295	0,364	0,361
Excesso de ar de combustão	1,25	1,92	2,12
Temperatura média - gases da combustão (°C)	1.255	1.256	1.261
Energia gerada pelo combustível (kW)	550	550	550

a equalização das curvas relativas ao centro da carga no interior do forno, para os três combustíveis utilizados.

Ao se fazer uma comparação entre as curvas da Figura 5 e as correspondentes da Figura 1, onde o excesso para todas as curvas é igual a 1,5, conclui-se que as diferenças de temperaturas são causadas pelos diferentes volumes de ar de combustão utilizados. Estes volu-



**Figura 4.** Temperatura da carga para excessos de ar recomendados pela literatura.



**Figura 5.** Curvas com diferentes excessos para atingir a mesma temperatura no interior da carga, conforme a Tabela 10.

mes de ar são responsáveis pela redução das temperaturas na região de queima, onde ocorre a combustão. Entretanto são responsáveis também pelo transporte de energia à região de pré-aquecimento da carga e certamente representam perda de energia, pois saíram do forno a uma temperatura maior do que a temperatura de entrada do ar de combustão. A Tabela 11 mostra a diferença da energia gerada com um mesmo combustível para diferentes excessos de ar, para atingir a mesma temperatura média dos gases da combustão, em relação a um excesso de ar base.

A Figura 6 ilustra a influência do excesso de ar em um mesmo combustível, no caso o gás natural sobre a temperatura central da carga. O excesso igual ao da literatura corresponde ao valor de 1,12<sup>1</sup>. É importante notar que para um excesso mais baixo, pode-se atingir a mesma temperatura com uma redução no consumo de combustível.

A Figura 7 apresenta as curvas de temperatura para o elemento central da carga para os mesmos valores do excesso de ar da Figura 6. Entretanto estas curvas são resultados de simulações onde se tem a mesma temperatura máxima de queima para a carga, como mostra a Tabela 12. Com a equalização das curvas em um mesmo patamar de temperatura, pode-se avaliar a diferença do consumo de energia em relação à variação do excesso de ar. Para os casos estudados em relação à curva com excesso de ar de 1,5, chegou-se a uma economia de 46,2% utilizando o excesso de 1,125 e de 48,9% de economia para a queima estequiométrica.

Entretanto a observação da Figura 7 mostra que na região referente ao pré-aquecimento para as curvas com excesso de ar de 1,125 e 1, os gradientes de aquecimento sofridos pela carga são muitos fortes, função do menor volume de ar gerado na combustão. Ou seja, quanto maior a quantidade de gases gerada durante a queima, maior será a troca durante o pré-aquecimento; isto ocorre em função do forno túnel ter a sua transferência de energia baseada na convecção.

A observação das figuras e tabelas leva a conclusão de que o excesso de ar é na maioria das vezes um dos responsáveis pelo consumo excessivo nos fornos, ao lado de fornos mal isolados e construídos com materiais inadequados.

Entretanto, nem sempre é possível alcançar uma atmosfera com alta temperatura no interior do forno, obtida a partir de um baixo excesso de ar. Esta escolha vai ser determinada por vários detalhes a serem observados, como o caso do empacotamento da carga, determinante para a redução da diferença de temperatura entre o centro e a periferia da carga. Conforme o empacotamento tem-se uma carga mais ou menos impermeável ao escoamento de gases. Deste ponto de

vista, um maior excesso de ar será benéfico (embora haja um maior consumo de energia).

## 6. Umidade do Combustível.

A umidade pode ser encontrada em alguns combustíveis, mais especificamente nos combustíveis sólidos, principalmente na biomassa, que contém a umidade como parte de sua própria composição.

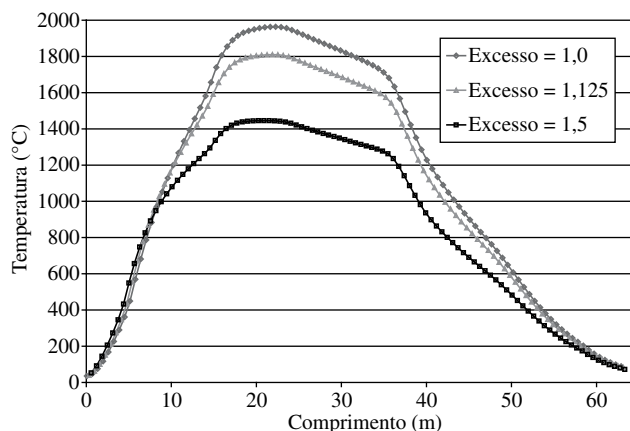


Figura 6. Temperatura da carga para diversos excessos para a combustão do gás natural.

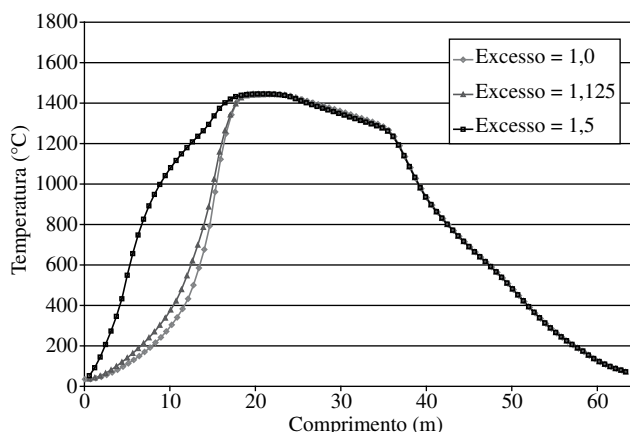


Figura 7. Temperatura do centro da carga para a mesma temperatura máxima de queima.

Tabela 11. Estimativa de perda de energia com o aumento do excesso do ar de combustão.

Combustível	Serragem 50% de umidade	Gás Natural	Óleo BPF A1
Excesso de ar de combustão	1,50	1,92	2,12
Excesso de ar base	1,25	1,50	1,50
Temperatura média dos gases da combustão para o cálculo (°C)	1.255	1.585	1.744
Diferença de energia estimada em relação ao menor excesso (kW)	89	152	220
Diferença de energia estimada em relação ao menor excesso (%)	17	22	29

Tabela 12. Valores usados para a obtenção das curvas da Figura 7.

Excesso	1,5	1,125	1
Combustível kg/s	0,0111	0,0059	0,0057
Vazão do ar de combustão kg/s	0,2844	0,1148	0,0969
Vazão dos gases da combustão kg/s	0,2958	0,1207	0,1027
Energia gerada pelo combustível (kW)	550	296	281
Diferença em relação a energia para excesso = 1,5 (%)	-	46,2	48,9
Temperatura máxima do centro da carga (°C)	1446	1443	1446



Desta maneira um estudo relativo à variação do teor de umidade na serragem foi realizado, a fim de se observar a sua influência sobre o perfil de temperatura da carga ao longo do forno.

A Tabela 13 apresenta os valores referentes ao estudo da influência do teor de umidade presente na serragem. Neste caso o excesso de ar foi mantido constante e igual a 25%. A vazão mássica de serragem foi mantida em 292 kg/hora (0,0811 kg/s), para os três casos, sendo que no caso da serragem mais úmida tem-se uma menor taxa líquida de fornecimento de combustível, já que parte é ocupada pela água. Pode-se notar que houve um aumento do volume de gases produzido pela serragem com maior teor de umidade, e que também esta influencia diretamente na quantidade de energia fornecida pelo combustível, que chega a 18% comparando o combustível com 0 e 50% de umidade. Independentemente da economia, o controle da umidade faz com que o forno trabalhe de forma mais constante, aumentando a qualidade e diminuindo as perdas do produto.

Os resultados das simulações realizadas com a variação da umidade da serragem sobre a temperatura da carga são mostrados na Figura 8. Como seria de se esperar, um menor teor de umidade resulta em uma maior temperatura da carga no interior do forno. Buscando-se uma menor temperatura com a serragem seca, atinge-se um menor consumo de energia. O trabalho para o controle de umidade deve iniciar já na chegada do combustível no ponto de consumo. Um secador pode ser utilizado para retirar toda a umidade ou a pelo menos uniformizar a mesma.

## 7. Temperatura do Ar de Combustão

Na maioria dos processos tem-se certa sobra de energia térmica que é simplesmente descartada para o ambiente. Desta forma um aproveitamento desta energia no aquecimento do ar de combustão torna-se uma alternativa interessante, como forma de proporcionar uma economia de combustível. A Figura 9 mostra a comparação das curvas de temperatura para diversas temperaturas de aquecimento do ar de combustão. Nesta pode-se observar uma elevação da temperatura de queima da carga do forno, mostrando o aumento de energia disponibilizada pela mesma quantidade de combustível.

A Tabela 14 apresenta os valores relativos à Figura 9, podendo-se observar que a energia fornecida pelo combustível vai sofrendo um aumento à medida que o ar de combustão tem sua temperatura

aumentada. Para um aumento de 65 °C tem-se uma economia de 4% de combustível, chegando a 18%, com um aumento de 265 °C.

O aumento de temperatura do ar de combustão não deve ser realizado de forma indiscriminada, sob pena de perda da economia.

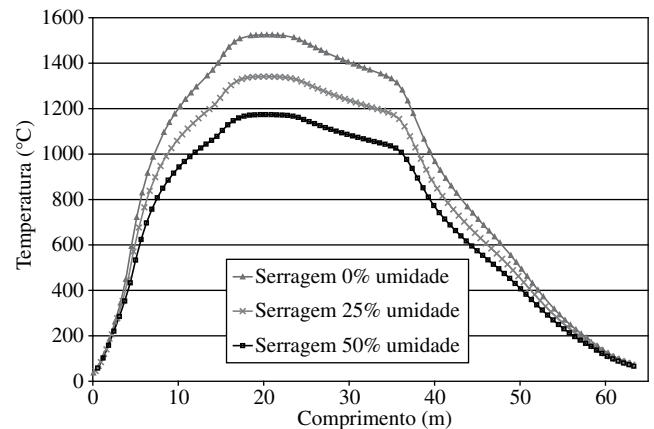


Figura 8. Variação da temperatura da carga em relação à umidade da serragem.

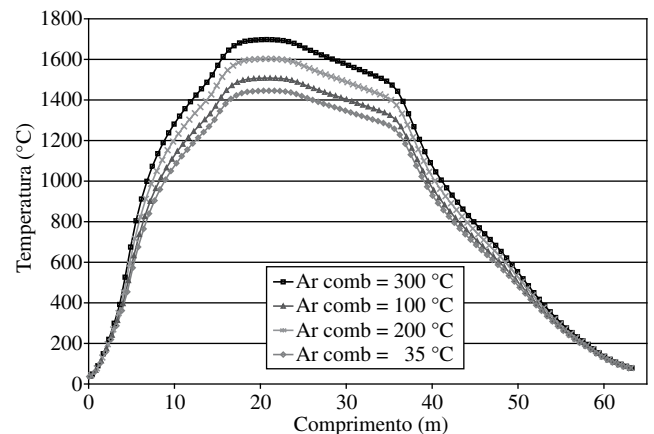


Figura 9. Influência da temperatura de entrada do ar de combustão para a queima de gás natural.

Tabela 13. Comparação da variação do teor de umidade da serragem no forno.

Umidade (em massa) (%)	Serragem		
	0	25	50
Temperatura máxima da carga (°C)	1,525	1,341	1.174
Excesso de ar de combustão	1,25	1,25	1,25
Vazão mássica de serragem base úmida (kg/s)	0,0811	0,0811	0,0811
Vazão mássica de serragem base seca (kg/s)	0,0811	0,0608	0,0406
Vazão mássica água associada (kg/s)	0	0,203	0,0406
Vazão do ar de combustão (kg/s)	0,295	0,295	0,295
Vazão dos gases da combustão (kg/s)	0,335	0,355	0,376
Energia gerada pelo combustível (kW)	649	600	550
Diferença (relação a 50%) (%)	18	9	-

Tabela 14. Valores referentes ao estudo do aumento da temperatura de entrada do ar de combustão.

	Gás Natural			
	35	100	200	300
Temperatura ar de combustão (°C)	35	100	200	300
Aumento de Temperatura do Ar de combustão (°C)	0	65	165	265
Temperatura máxima da carga (°C)	1446	1508	1604	1698
Excesso de ar de combustão	1,5	1,5	1,5	1,5
Energia gerada pelo combustível (kW)	550	575	613	651
Diferença (relação a 35°C) (%)	-	4	11	18

Um estudo prévio deve ser realizado para adequação do sistema de queima, como avaliação dos ventiladores e válvulas que por ventura existam no sistema de queima. Para o aproveitamento dos resíduos térmicos devem ser realizados estudos para a determinação da quantidade e da viabilidade do aproveitamento deste. Em muitos casos é necessário o projeto de um trocador de calor para que este faça o reaproveitamento desta energia. Em outros casos o ventilador do ar de combustão insuflará ar aquecido e, para tanto, deve ser regulado para acertar o fluxo de massa necessário à realização da reação de combustão, sob pena de falta de ar para a queima.

## 8. Conclusões

Na análise comparativa feita, considerou-se apenas o poder calorífico do combustível e o volume de ar necessário para a queima. Não se questionou a maior ou menor dificuldade de queima e de regulação de um combustível em relação a outro, nem as características de abastecimento e movimentação desses combustíveis.

A serragem necessita de um volume maior de ar para a queima (maior excesso de ar), considerando-se a reação estequiométrica. Para um mesmo excesso de ar, necessita-se gerar mais energia com a serragem para manter a mesma temperatura de queima, do que com o gás natural e com o óleo, conforme a Tabela 7. Usa-se mais óleo do que gás natural, e este utiliza mais ar, mais possui um PCI maior.

O excesso de ar de combustão deve ser observado com cuidado para que não haja consumo adicional de combustível em função de um elevado volume de ar de combustão, sobretudo no caso da serragem, de queima mais difícil.

O modelo usado mostra que não há diferença entre queimar um combustível ou outro, do ponto de vista das trocas radiativas. Gases aquecidos são produzidos pela queima no interior do forno ou nas fornalhas e transportados para o interior do forno. A chama produzida pelo óleo irradia mais na região visível do espectro eletromagnético do que a chama produzida pelo gás natural, mas no interior do forno ambas atingem a carga e as paredes, aquecendo-as. Estas atingem uma temperatura elevada e irradiam calor entre si, não havendo diferença crucial entre os dois combustíveis neste aspecto. Portanto, como se trata de um ambiente confinado, de pequenas dimensões, as paredes se aquecem e mantêm uma elevada troca radiante, compensando a diferença na irradiação das chamas. Não há, portanto, necessidade de considerar o gás natural menos eficiente, sugerindo que tenha que gerar muito mais energia do que o óleo por causa da irradiação da

chama, como às vezes se comenta no meio industrial. A diferença está no poder calorífico, no volume de ar necessário à queima e na qualidade da queima.

Outro aspecto analisado foi o da presença de umidade no caso da serragem, em que um teor de 50% implica em 18% de aumento no consumo de energia, para o caso analisado. Sabe-se que por falta de estoque e por ação das intempéries, a serragem dificilmente é consumida seca.

A utilização do ar de combustão pré-aquecido consiste em uma forma de racionalizar o uso da energia térmica, principalmente nos fornos cerâmicos onde existe facilidade em instalar esse pré-aquecimento, e os resultados na redução do consumo de combustível são evidentes, além de não interferir nas condições de funcionamento do forno.

Finalmente, os resultados apresentados mostram que qualquer substituição de um combustível por outro deve ser feita de forma criteriosa, levando-se em consideração as características produtivas e construtivas do forno.

## 9. Agradecimentos

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

Os autores T. G. Jahn; e R. F. Hartke são bolsistas do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás Natural-PRH09-ANP/MME/MCT.

Os autores agradecem a Cerâmica Forgiarini, Criciúma-SC, cujo forno foi usado como modelo para os cálculos, bem como o consultor Valmir Bortolotto.

## Referências

1. Bazzo, E. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 1995, 216 p.
2. Dadam, A. P., **Análise Térmica de um forno túnel utilizado na indústria cerâmica vermelha**. 2005. 125 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
3. Maliska, C. R., **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995, 424 p.
4. Vlassov, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. 1. ed. Curitiba: UFPR, 2001, 185 p.