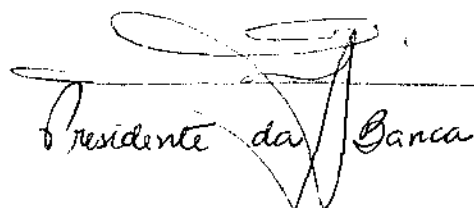


Maria Eugenia Corria Aradas

***AValiação DE UM FORNO INTERMITENTE DE
CERÂMICA VERMELHA USANDO BAGAÇO DE CANA COMO
COMBUSTÍVEL***

Paracar

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Maria Eugenia Corria Aradas e aprovada pela Comissão Julgadora em 17 de abril de 1996. Campinas, 08 de agosto de 1996.


Presidente da Banca

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola
Departamento de Construções Rurais**

Abril 1996

Maria Eugenia Corria Aradas

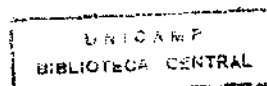
**AVALIAÇÃO DE UM FORNO INTERMITENTE DE CERÂMICA
VERMELHA USANDO BAGAÇO DE CANA COMO
COMBUSTÍVEL**

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez

**Dissertação apresentada para cumprimento
parcial dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Agrícola
na área de concentração de Construções Rurais.**

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola
Departamento de Construções Rurais**

Abril 1996



UNIDADE	30
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	C817a
V. E.	
F. ASSO B.º	27.23
PROC.	667/92
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R. 1.11,00
DATA	03/12/96
N.º CPD	C.M.00095365.8

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C817a Corria Aradas, Maria Eugenia
Avaliação de um forno intermitente de cerâmica
vermelha usando bagaço de cana como combustível /
Maria Eugenia Corria Aradas.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Luís Augusto Barbosa Cortez.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Bagaço de cana. 2. Cerâmica. 3. Combustão. 4.
Energia - Fontes alternativas. I. Cortez, Luís Augusto
Barbosa. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Ao meu marido

**Aos meus Pais,
à Liyi, Alex
e Eduardito.**

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luís Augusto Barbosa Cortez, por me aceitar como aluna e pela sua orientação.

Ao professor Electo E. Silva Lora pela valiosa colaboração e assessoramento efetivo durante todo o trabalho.

À Comissão de Pós-graduação da FEAGRI pela colaboração econômica para o desempenho deste trabalho.

À Família Rosa, em especial a Colomé e Dona Célia pelo apoio e carinho.

Ao Engenheiro Laiete Soto Messias, pela importante ajuda oferecida em assessoramento e materiais.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo pela concessão da bolsa de mestrado.

À minha amiga Leila, sempre presente.

À Aninha, Marta, Anésio, Deise, Vanessa e Rose pela colaboração.

Aos meus colegas: Edgardo, Eduardo, Ivan, Esther, Junior, Mariela, Yamília, Williams, Mário, Paulo e Zé Ricardo, Thomaz, Camilo, Alexander, Richard e a todos os amigos que pela sinceridade de sentimentos sentem-se aqui incluídos.

À minha irmã, Susana.

Obrigado!

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
RESUMO.....	v
SUMMARY.....	vi
I. INTRODUÇÃO.....	1
II. OBJETIVOS.....	2
III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1.- Fornos para a queima de cerâmica estrutural ou vermelha	3
3.1.1.- Classificação dos fornos cerâmicos.....	3
Fornos de Campanha.....	3
Forno de Abóbada.....	4
Forno de Tijolos de Torre Vertical - VSBK (Vertical Shaft Brick Kiln)	5
Forno Anelado de Hoffmann	8
Forno Túnel:	10
3.1.2.- Tipos de fornos mais difundidos no Brasil e no mundo.	10
3.2.- Disponibilidade e caracterização dos tipos de biomassa que podem ser usados nos fornos cerâmicos.....	11
3.2.1.- Bagaço de cana-de-açúcar.....	14
3.3.- Fundamentos da combustão do bagaço de cana-de-açúcar e outros resíduos agro-industriais.	16
3.3.1.- Resultados de pesquisas sobre a combustão do bagaço de cana-de-açúcar.	18
3.3.2.- Particularidades do processo de avaliação e modelagem de fornos intermitentes de cerâmica vermelha.....	20
Objetivos do programa de simulação:	21
Fundamentos do programa de simulação (figura 14):.....	21
Dados necessários para o programa:.....	22

3.4.- Experiências na utilização do bagaço de cana e outros resíduos em fornos cerâmicos.	22
3.4.1.- Experiências Europeias.	22
Utilização de serragem (GIORDANI et al, 1986).	23
Utilização do bagaço de azeitona (GIORDANI & ZANI, 1988).	25
Figura 16: Alimentador para bagaço de azeitona. (GIORDANI & ZANI, 1988).	26
Utilização da serragem num forno intermitente na Guiana Francesa. (MESTIVIER & COUDAMY, 1987).	26
3.4.2.- Resultados de pesquisas realizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).	27
Cerâmica São Luiz Ltda (IPT, 1985).	28
Cerâmica Divisa Ltda (IPT, 1987).	29
3.4.3.- Experiências em escala industrial em olarias brasileiras.	34
Cerâmica de Alagoas (NETO & LYRA, 1983).	35
3.5.- Comportamento da argila durante a queima.	35
IV. METODOLOGIA	39
4.1. Descrição física e de operação da instalação.	40
4.2.- Levantamentos realizados na instalação.	43
4.2.1- Iniciais:	44
4.2.2- Durante um ciclo completo: pré-aquecimento e queima:	44
4.3.- Cálculo das perdas de calor.	45
4.3.1- Perdas de calor ao meio ambiente com os gases de exaustão, q_2 .	45
4.3.2- Perdas de calor por combustão química incompleta, q_3 .	46
4.4.- Avaliação energética do forno intermitente.	47
4.5.- Avaliação do desempenho da fornalha.	49
4.5.1.- Tensão térmica da superfície da grelha, Q_A :	49
4.5.2.- Tensão térmica volumétrica do forno, Q_v :	49
4.5.3.- Taxa de carregamento, Q_c :	50
4.6.- Instalações e Equipamentos.	50
V. MEDIÇÕES E RESULTADOS	51
5.1.- Medições Realizadas.	51

Tijolos.....	51
Gases.....	53
5.2.- Cálculo das perdas.....	56
5.2.1.- Perdas com os gases de exaustão.....	56
5.2.2.- Perdas por combustão química incompleta.....	56
5.3.- Resultados.....	57
5.3.1.- Balanço de energia.....	57
5.3.2.- Balanço econômico.....	58
5.3.3.- Propriedades mecânicas dos tijolos.....	59
VI. CONCLUSÕES.....	60
VII. RECOMENDAÇÕES.....	61
VIII. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	62
APÊNDICES	
Apêndice I.- Resultados dos testes com bagaço de cana.....	I
Apêndice II.- Resultados dos testes no forno da Cerâmica Nossa Sra. Auxiliadora operando com lenha.....	IX

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forno intermitente de campanha	4
Figura 2: Forno circular de abóbada.	5
Figura 3: Forno de abóbada retangular acoplado. a.- seção, b.- acoplado.....	5
Figura 4: Estrutura do forno VSBK.	7
Figura 5: Forno de Trincheira de Bull.....	8
Figura 6: Operação de um forno Hoffmann.	9
Figura 7: Forno de Zig-zag.	9
Figura 8: Evolução do consumo anual de lenha na indústria cerâmica e os preços deste insumo energético no Estado de São Paulo de 1977 a 1992.....	12
Figura 9: Variação das temperaturas t_1 e t_3 com a época de colheita.....	15
Figura 10: Processo de combustão de energéticos com alto teor de voláteis.	17
Figura 11: Relação de ar primário e secundário para a combustão de biomassa.....	18
Figura 12: Queimador tipo vórtex para alimentação de bagaço.....	19
Figura 13: Variação da temperatura de combustão e dos teores de CO_2 e CO com o coeficiente de excesso de ar. a) teórico; b) industrial.....	20
Figura 14: Esquema ilustrativo dos fundamentos do modelo de simulação.....	21
Figura 15: Queimador e moinho para serragem do forno Túnel.	24
Figura 16: Alimentador para bagaço de azeitona.	26
Figura 17: Instalação de termopares para medição de temperaturas.....	30
Figura 18: Fornalha de volume variável com grelha basculante para diferentes biomassas.	31
Figura 19: Disposição dos termopares para indicação de temperaturas após reformas.....	32
Figura 20: Interligação dos fornos para recuperação de gases quentes.	34
Figura 21: Contração do tijolo após a secagem natural (ao sol).	36
Figura 22: Representação gráfica dos processos de transformação da argila durante a queima.....	37
Figura 23: Representação gráfica das várias características de produtos argilosos durante a queima.	38
Figura 24: Esquema de operação dos seis fornos.....	40
Figura 25: Sistema de alimentação do bagaço no forno.	41

Figura 26: Disposição dos tijolos dentro do forno.	42
Figura 27: Vedação do forno com argila.	42
Figura 28: Começa a queima no forno 4 e os gases são recirculados para o forno 1.	43
Figura 29: Pontos onde foram medidas temperaturas, fluxos de ar e combustível e realizados análises de gases.() Localização de termopares.	45
Figura 30: Volume de controle dos processos de pré-aquecimento e queima.	47
Figura 31: Instalação dos aparelhos usados.	50
Figura 32: Comportamento da temperatura da carga: a) durante o pré-aquecimento; b) no processo de queima.	52
Figura 33: Temperatura dos gases de combustão durante a queima no forno 1 e pré-aquecimento do forno 3. Tgs - temperatura dos gases na saída do forno 1; Tgs2 - temperatura dos gases na saída do forno 3; Tge - temperatura dos gases na entrada do forno 1 (saída da fornalha).	53
Figura 34: Concentrações de O ₂ e CO nos gases da combustão à saída do forno, em %.	54
Figura 34: Coeficiente de excesso de ar durante o processo de queima.	55
Figura 35: Consumo de combustível (bagaço), em kg.	55
Figura 37: Perdas com o gás de exaustão (q ₂) na saída do forno em pré-aquecimento, em %.	56
Figura 38: Perdas por combustão química incompleta (q ₃), em %.	57
Figura 39: Resultados das quantidades de calor aproveitadas ou perdidas durante todo o processo.	57
Figura A1: Disposição dos termopares no forno.	XI
Figura A2: Empilhamento da carga dentro do forno.	XII
Figura A3: Combustão da lenha durante o processo de pré-aquecimento, com as portas das fornalhas e os cinzeiros abertas.	XIII
Figura A4: Comprtamento das temperaturas da carga, dos gases de combustão e dos gases de saída (exaustão).	XIV
Figura A5: Concentrações de O ₂ e CO nos gases de exaustão.	XIV
Figura A6: Portas de fornalhas e cinzeiros “fechadas” durante a queima.	XV
Figura A7: Coeficiente de Excesso de Ar durante todo o ciclo (pré-aquecimento e queima).	XV
Figura A8: Consumo de combustível (lenha), em kg/h.	XVI

Figura A9: Perdas com os gases de exaustão, q_2 em % (valores médios em intervalos de 4 horas).....	XVII
Figura A10: Comportamento das perdas por combustão química incompleta, q_3 em % (valores médios para intervalos de 4 horas).....	XVII
Figura A11: Balanço geral das perdas para todo o processo.	XVIII

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Perfil da Indústria de Cerâmica Vermelha no Brasil no período 1992-1993.....	11
Tabela 2: Obtenção de lenha em florestas nativas e de reflorestamento por região do país em 1989.	12
Tabela 3: Composição elementar (média) de diversas biomassas.....	13
Tabela 4: Composição imediata de diversas biomassas em base seca e seu poder calorífico superior (PCS). V- voláteis, A- cinzas, F- carbono fixo.	13
Tabela 5: Disponibilidades de alguns dos resíduos agrícolas usados como biomassa no Brasil em 1992.....	14
Tabela 6: Equações para determinar o poder calorífico do bagaço de cana, considerando os teores de sacarose, cinzas e umidade.	15
Tabela 7: Máxima velocidade de combustão e temperaturas obtidas nas pesquisas de queima de bagaço seco em leito fixo.....	18
Tabela 8: Resultados dos testes de queima de bagaço em suspensão.....	19
Tabela 9: Resultados das medições feitas no forno antes e após das reformas.	29
Tabela 10: Temperatura máxima da carga e características dos produtos obtidos.....	34
Tabela 11: Propriedades físico-mecânicas dos tijolos (ILO,1984)	39
Tabela 12: Balanço econômico do forno para diferentes biomassas, em US\$ / 1000 tijolos.	58
Tabela 13: Resultados dos ensaios físico-mecânicos dos tijolos coletados nos três pontos onde se registraram as temperaturas.....	59

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se a avaliação de um forno cerâmico intermitente de chama invertida onde queima-se só bagaço de cana, em substituição total da lenha. Este fato o diferencia de outros fornos testados, em especial pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), nos quais na etapa inicial queimava-se lenha, e o bagaço era submetido á processos de secagem, moagem etc. Esta característica torna mais econômica a queima do bagaço de cana-de-açúcar.

Outro aspecto a ser destacado na instalação é a remodelação feita empiricamente pelo proprietário, que aproveita os gases de exaustão do forno em queima para pré-aquecer o forno que vai ser queimado continuamente. A avaliação efetuada permitiu determinar o valor das perdas com o calor sensível dos gases ($Q_2 = 4 \%$), que se mostraram muito menores do que os valores obtidos para fornos sem esta recuperação.

Foi desenvolvida uma metodologia de avaliação especificamente para fornos intermitentes, baseada na Primeira Lei da Termodinâmica. O processo é dividido em “n” intervalos para os quais determina-se o consumo de combustível e as perdas de calor. A eficiência global é determinada como sendo a relação entre o calor útil total (evaporação da umidade e cozimento dos tijolos), e o consumo de combustível em todo o processo.

O ciclo completo demora aproximadamente 90 horas, desde a carga até a descarga dos tijolos. Como resultado obteve-se uma eficiência média de 68 %, valor considerado elevado para um forno deste tipo, queimando biomassa.

Os tijolos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão e absorção de água, mostrando que estão dentro das normas estabelecidas.

SUMMARY

In this work the evaluation of a ceramic inverted flame intermittent kiln with total substitution of firewood by *in nature* sugar cane bagasse (50 % of moisture h.b.) is presented. In this kiln is burned only bagasse, differently from other ones tested by the IPT (Institute of technological research), in which in the initial stage firewood is burned and bagasse was subjected to processes of drying, milling, etc. This characteristic makes more economic bagasse burning.

Another aspect to highlight of the installation it is the owner empirically done retrofitting, that use the burning kiln exhaust gases in order to preheat the kiln next to the burned. Our evaluation allowed to determine the value of the losses with the exhaust gases enthalpy ($Q_2 = 4\%$), that resulted much lower than for other ceramic kilns without heat recovery.

It was developed a test methodology based on the First Law of Thermodynamics, specifically for intermittent ovens. The process is divided in "n" intervals, for each one of which are determined the fuel consumption and heat losses. The global efficiency is determined as the relation between the useful total heat (evaporation of the moisture and bricks firing) and the consumption of fuel in the whole process.

The complete cycle delays approximately 90 hours, from the load until the discharge of the bricks. As a result an average efficiency of 68 % was obtained, considered a high value this type of kilns burning biomass.

The obtained bricks were also subjected to test of resistance to compression and water absorption using bagasse as fuel, in order to determine if they accomplish the established norms.

I. INTRODUÇÃO.

A indústria cerâmica nacional tem na atualidade uma produção cerâmica equivalente a aproximadamente 2,837 bilhões de dólares (ABC, 1994), dos quais 70% são de tijolos e telhas.

Até 1974, no Brasil, nos fornos cerâmicos de tipos Túnel, Hoffman e intermitente de chama invertida utilizou-se o petróleo como combustível. A partir de então, com a crise energética começaram alguns estudos para substituir este combustível. Particularmente na indústria de cerâmica vermelha, foi substituído quase todo o combustível fóssil pela lenha. Atualmente, nas regiões próximas aos grandes centros urbanos, a lenha oferece certa dificuldade na aquisição devido à menor oferta. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (1994) a produção de lenha de 1977 a 1992 baixou de 102.886×10^3 t para 88.534×10^3 t, o que leva a crer que no futuro poderá haver o risco de um aumento significativo do preço deste energético, além do impacto ecológico que ocasiona o desmatamento.

Por estas razões é que se tem estudado as várias possibilidades de substituição da lenha por outros combustíveis. As alternativas de substituição da lenha na indústria de cerâmica estrutural são várias, que podem surgir com as disponibilidades quantitativas, como o bagaço de cana-de-açúcar, cuja produção aumentou no Brasil de 1977 a 1992, segundo o B.E.N. de $26\ 850 \times 10^3$ t para $61\ 923 \times 10^3$ t.

Já foram feitos vários testes com este objetivo, como os do IPT (1985, 87¹, 87²), o da cerâmica Porangaba (NETO & LIRA, 1983) e outras em que foi substituído parcialmente o consumo de óleo ou lenha, por bagaço de cana.

No caso da Fazenda do Pinhal, no município de Boituva, SP, onde desenvolveu-se este projeto, a substituição da lenha que vinha sendo utilizada como combustível foi total, ou seja, se queima exclusivamente bagaço num forno cerâmico. O bagaço utilizado nesta olaria provém de uma destilaria existente na mesma fazenda. Ele é queimado num forno intermitente de chama invertida, representativo desta indústria no país e principalmente no Estado, sendo utilizado como sai da destilaria (50 % de umidade b.u.), o que o diferencia dos outros testes feitos até agora, em que o bagaço era submetido a processos de secagem, moagem, etc. Outro aspecto a destacar na instalação de Boituva, é a remodelação feita empiricamente por o seu proprietário, que reaproveita os gases de exaustão para a secagem dos tijolos.

II. OBJETIVOS.

Objetivo Geral:

Pretende-se neste trabalho realizar uma análise técnico-econômica, do ponto de vista energético, da utilização do bagaço de cana como combustível na indústria de cerâmica vermelha, para o caso específico da olaria “Fazenda do Pinhal” no município de Boituva, interior do Estado de São Paulo.

Objetivos Específicos:

1. Determinar a eficiência energética de um forno intermitente para a produção de tijolos usando bagaço de cana como combustível;
2. Avaliar os parâmetros de qualidade do produto final (resistência à compressão e absorção de água) obtidos utilizando o bagaço de cana;
3. Comprovar se os parâmetros construtivos do forno (volume e superfície da grelha) permitem a manutenção da temperatura requerida na saída da fôrnilha com alta eficiência da combustão quando é usado o bagaço-de-cana como combustível.

III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.- Fornos para a queima de cerâmica estrutural ou vermelha.

É conhecida por cerâmica estrutural aquela que compreende as produções de telhas e tijolos, portanto uma das modalidades mais antigas desta indústria que surgiu praticamente com o homem naquelas regiões onde faltava a pedra e sobrava a argila. Os tijolos da antiguidade eram feitos de uma massa de argila, seca ao sol, na que se acrescentavam quantidades menores de areia e palha, que conformavam a estrutura da massa. Foram os romanos, pelas necessidades crescentes de construção nas suas grandes cidades, os que primeiro estabeleceram uma atividade industrial com desenvolvimento próprio na fabricação de tijolos.

Desta época até nossos dias, a indústria da cerâmica estrutural ou vermelha tem evoluído muito, apesar de ainda se encontrarem olarias com instalações e tecnologias muito antigas, que continuam produzindo ao lado de modernas indústrias de grande porte.

3.1.1.- Classificação dos fornos cerâmicos

Os fornos para a queima de cerâmica estrutural podem ser classificados da seguinte forma:

- Fornos Intermitentes: Fornos de campanha, fornos de abóbada.
- Fornos Semi-contínuos com zona de queima móvel: Forno Hoffmann e seus derivados.
- Fornos Contínuos com zona de queima fixa: Fornos Túnel.

Fornos de Campanha

Dentre estes fornos encontra-se o mais antigo e conhecido, o forno chamado de "formigueiro", que apesar de ser antigo não deixou de ser empregado, mesmo em grandes fábricas, em tempos de muita demanda se deixam para queima de tijolos maciços queimando os furados em instalações mais modernas. A construção destes fornos consiste em colocar uma série de tijolos já queimados, formando um quadro de 10-15 m de lado, e assim até a sexta camada após a qual se começa a colocar tijolos não cozidos perpendicularmente aos outros, chegando a alcançar uma altura de aproximadamente 6 m, como mostra a figura 1. Nos orifícios inferiores se coloca o combustível que pode ser lenha, palha ou qualquer outro. Ao

começar a combustão vão-se fechando com argila aqueles pontos onde aparecem escapamento excessivos de gases da combustão.

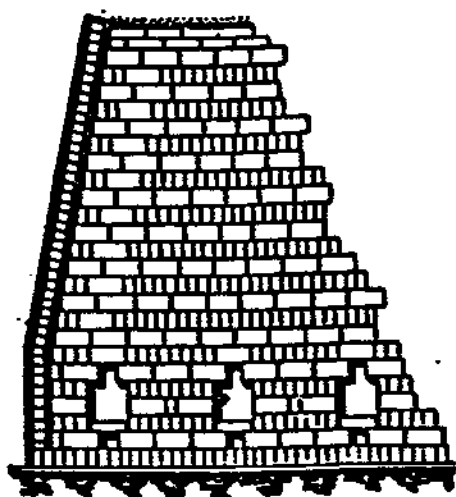


Figura 1: Forno intermitente de campanha. (BENDER & HÄNDLE).

Estes fornos podem chegar a produzir de 300 000 a 800 000 tijolos, mas a sua eficiência não é boa, tem-se ao redor de 40% de tijolos bem queimados e formados e até 10 % de perda total de material.

Forno de Abóbada

A principal característica destes fornos, e que constitui uma vantagem é que o combustível e seus resíduos não estão em contato imediato com o produto, pois a combustão se produz numa fornalha separada por uma parede. Os gases sobem até o teto em forma de abóbada, atravessando logo os produtos (tijolos) para entrar no conduto que os conduzem à chaminé.

A forma circular destes fornos, figura 2, permite que eles tenham de 4 até 8 fornaldas, regulando assim de maneira independente os processos de pré-aquecimento, queima e resfriamento do produto, garantindo uma boa qualidade, embora com um elevado consumo de combustível.

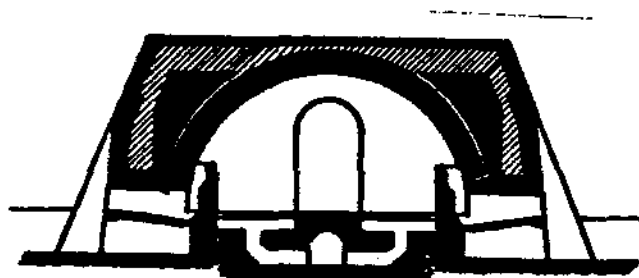


Figura 2: Forno circular de abóbada. (REVERTÉ).

Para economizar combustível, criou-se uma modalidade dos fornos de abóbada, consistindo em ligar vários deste tipo mais com câmara retangular. Os processos de pré-aquecimento, queima e resfriamento se fazem de forma ordenada, ou seja, quando se queima numa câmara, os gases são conduzidos à outra onde começa a etapa de pré-aquecimento, e a seguir vão à chaminé, reaproveitando o calor destes ao diminuir o período do processo com combustível (figura 3).

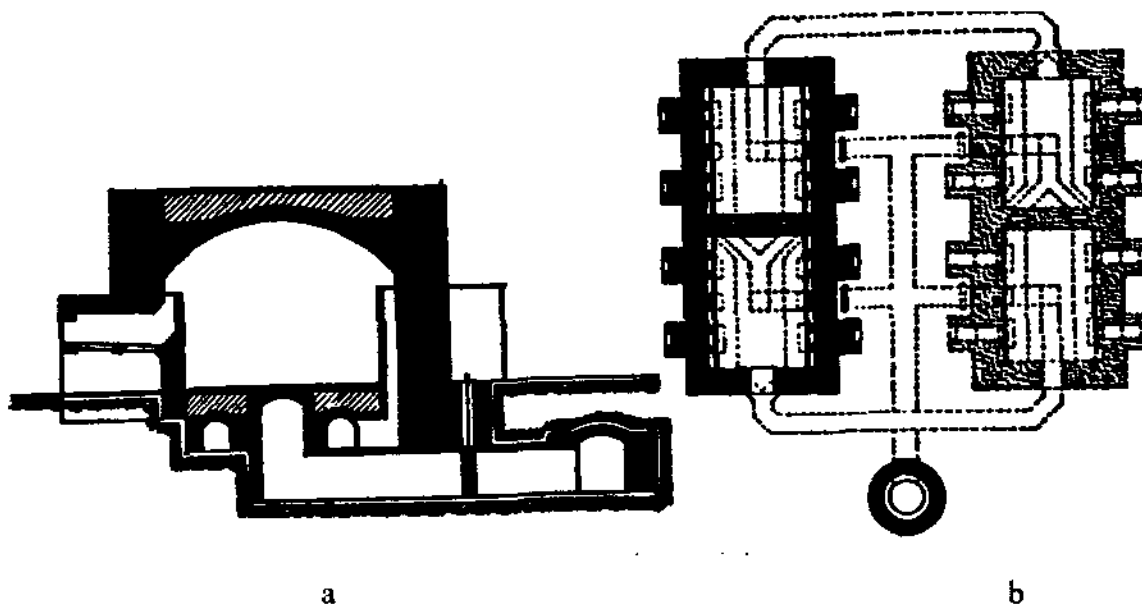


Figura 3: Forno de abóbada retangular acoplado. a.- seção, b.- acoplado. (REVERTÉ).

Forno de Tijolos de Torre Vertical - VSBK (Vertical Shaft Brick Kiln)

Em 1991, um projeto financiado pela Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), realizou a prova de um novo tipo de forno no Nepal. O forno foi

desenvolvido na China, onde atualmente existem mais de 2 500 unidades em operação. A GTZ mostrou também a operação deste forno no Paquistão.

A operação destes fornos consiste em encher uma rede de vigas de aço com 4 camadas de tijolos cozidos, entre os quais são depositados briquetes de carvão e acima destas colocam-se outras camadas de tijolos crus, entre cada uma delas dispersa-se uma camada de carvão em pó. A rede desce até a zona de fogo onde são queimados os briquetes com auxílio de estopa com querosene. O fluxo de ar em sentido inverso permite que os tijolos crus das camadas superiores vão se esquentando e secando e o carvão em pó se acende. As redes com os tijolos cozidos são retiradas pela parte inferior da torre.

Dados de operação do VSBK em Peshawar, Paquistão (NORSKER & FUYIN, 1993):

- Produção em 24 horas: 3858 tijolos;
- Uso médio de energia: 1,13 MJ/kg de tijolo;
- Temperatura de queima: 920 - 980 °C;
- Quebras dos tijolos: 7 -11 %;
- Resistência à trituração: 13,443 kN / m.

Estes fornos, apesar de trabalhar com carvão, pela sua construção permitem indicar sua utilização com resíduos de biomassa pulverizada como combustível, tal e conforme sugerido pela GTZ (NORSKER, 1994). Este forno apresenta um baixo uso de energia e reduzido impacto ambiental. A estrutura básica do forno aparece na figura 4.

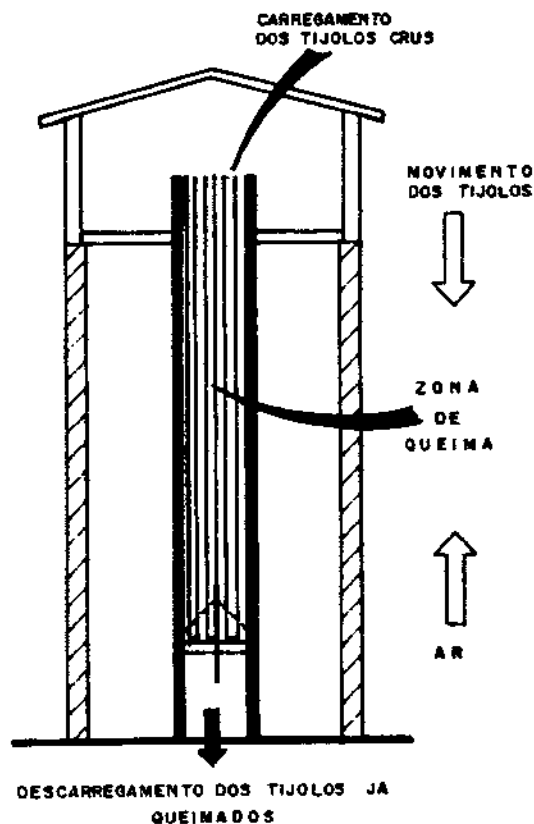


Figura 4: Estrutura do forno VSBK. (NORSKER & FUYIN, 1993).

Outro forno interessante pela sua construção é o forno de Trincheira de Bull, idealizado pelo engenheiro inglês W. Bull em 1876 e que pode-se encontrar na Índia (ILO, 1984). Este forno, baseado talvez no forno Hoffmann pode ser, assim como este, circular ou helicoidal.

Para a sua construção se faz uma trincheira de aproximadamente 6 metros de largura e de 2 a 2,5 m de profundidade (figura 5). As câmaras são formadas pelos próprios tijolos a serem cozidos, situados de maneira que permitem a passagem dos gases e a distribuição do combustível. O fogo movimenta-se progressivamente ao redor do forno. A exaustão dos gases é feita por duas chaminés de metal de 16 m de altura com bases largas e que também se movimentam.

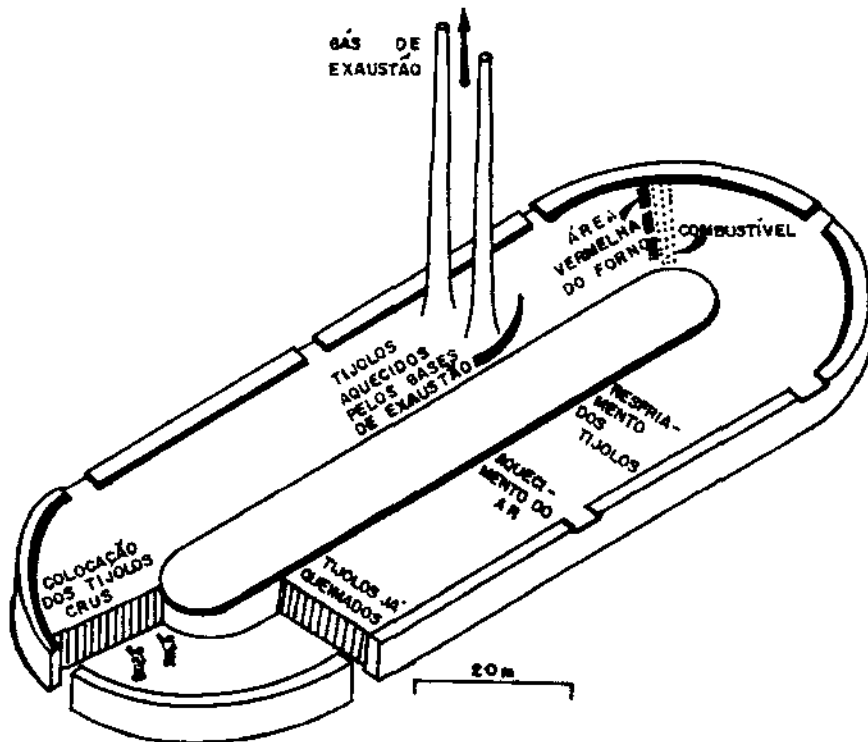


Figura 5: Forno de Trincheira de Bull. (ILO, 1984).

Forno Anelado de Hoffmann

Consiste numa série de fornos intermitentes, ligados lateralmente e aquecidos uns após os outros. Isso permite dirigir os gases de combustão do forno sendo queimado para o forno adjacente, o qual seria o próximo a ser queimado, e assim pré-aquecer a carga seguinte até a temperatura máxima de queima. Além disso, os gases, após passarem através dessa câmara, podem ser usados para pré-aquecer outros fornos ou câmaras antes da queima na temperatura máxima. O ar injetado na câmara durante o período de resfriamento, é aproveitado como ar de combustão devido a sua elevada temperatura.

A figura 6 mostra a operação de um forno Hoffmann. A forma anelada evita a interrupção no ciclo quando é alcançada a câmara final. Devido ao alto grau de pré-aquecimento não são necessárias fornalhas nem grelhas. A queima é feita de uma forma simples, despejando-se o combustível através dos orifícios do topo. A eficiência térmica destes fornos é alta.

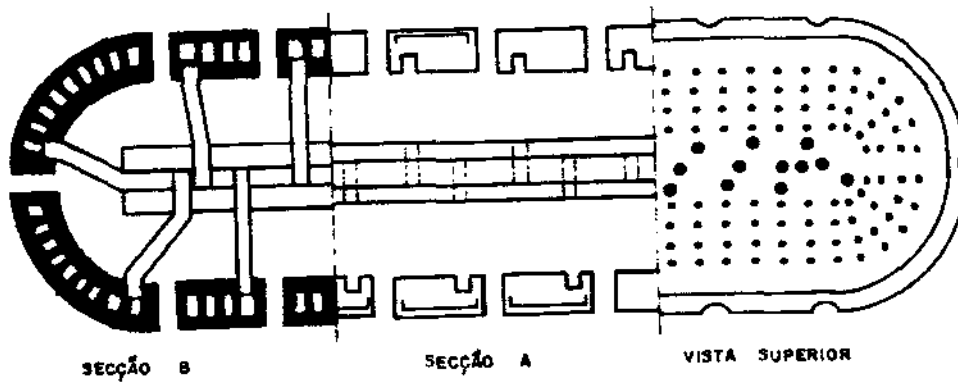


Figura 6: Operação de um forno Hoffmann. (BENDER & HÄNDLE).

Uma variedade do forno Hoffmann é o forno de zig-zag, criado por Jacob Bühler em 1868 (BENDER & HÄNDLE). Este tipo de construção permite acomodar um canal longo em áreas comparativamente pequenas, o que permitiu elevar a taxa de deslocamento do fogo de 5 - 7 metros em 24 horas com tiro natural, à 20 - 30 m com o sistema de Bühler. A figura 7 mostra um corte de um forno zig-zag, que pode consistir de 4, 8, 12, 16 ou 20 câmaras. As larguras das câmaras é de aproximadamente 1 - 2 metros e a sua altura de 2 metros. Este tipo de forno se emprega geralmente para pequenas produções.

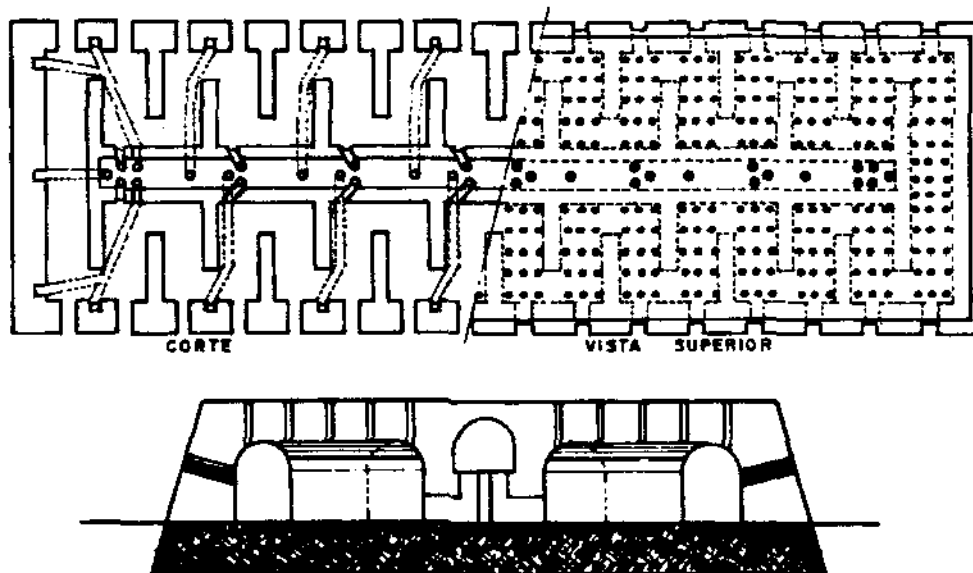


Figura 7: Forno de Zig-zag. (BENDER & HÄNDLE).

Forno Túnel:

A concepção deste forno responde à idéia de construir uma zona de fogo fixa, e passar por ela os produtos a queimar. Essa alternativa tem vantagens significativas:

- a) A estrutura do forno em qualquer ponto permanece com a mesma temperatura por um longo tempo, mantendo-se livre de deformações provenientes de uma variação periódica de temperatura;
- b) As peças são empilhadas sobre os carros e podem ser carregadas e descarregadas fora do forno em lugar conveniente;
- c) Notável economia de mão-de-obra na carga e descarga.

3.1.2.- Tipos de fornos mais difundidos no Brasil e no mundo.

Conforme apresentado no início, a queima de produtos cerâmicos é uma atividade muito antiga. Os fornos cerâmicos, segundo a classificação feita em 3.1.1, podem encontrar-se em todo o mundo. Na Itália, Áustria, Alemanha, Suíça, França e Espanha, os fornos Hoffmann e seus derivados são os mais comuns, porém nos últimos anos os fornos Túnel tem sido muito usados.

Na Europa setentrional (Bélgica, Holanda, Dinamarca, Suécia) junto com o Hoffmann, são bastante comuns os fornos intermitentes de câmaras retangulares, usados na maioria dos casos na queima de tijolos e telhas.

Na Inglaterra os fornos intermitentes representam cerca de 60 % do total. Nos Estados Unidos são encontrados poucos fornos Hoffmann. Em sua grande maioria, as cerâmicas tem fornos intermitentes e Túnel (RUSSO).

A indústria de cerâmica vermelha no Brasil apresenta uma grande predominância de fornos tipo intermitente de chama invertida, com uma pequena incidência do tipo Hoffmann e Túnel. Na região Nordeste existe uma pequena predominância dos fornos de campanha (QUEIROZ et al, 1982).

No Estado de São Paulo, onde também predomina este tipo de forno, embora apresentem concepções similares, constata-se variações significativas na sua geometria (circulares ou retangulares), no número de fornalhas e nas suas dimensões, dependendo da capacidade produtiva. Em levantamento realizado nas regiões dos municípios de Itú, Campinas, Jundiaí e adjacências, onde se concentra o maior número de indústrias

representativas do setor (IPT, 1985), verificou-se que o forno circular é preponderante. A tabela 1 apresenta o perfil da indústria de cerâmica vermelha no período de 1992 - 1993.

Tabela 1: Perfil da Indústria de Cerâmica Vermelha no Brasil no período 1992-1993.

	Unidades	Quantidades	
		1992	1993
No. de estabelecimentos	unidades	10 686	11 000
Capacidades instaladas:			
Tijolos	peças	-	$2,2 \cdot 10^9$
Telhas	peças	-	$402 \cdot 10^6$
Produção mensal de tijolos (convertidos em 9x19x19cm)	peças	$11,7 \cdot 10^9$	$1,76 \cdot 10^9$
Produção mensal de telhas (17 peças/1m ²)	peças	$309 \cdot 10^6$	$321 \cdot 10^6$
Consumo mensal de argila (tijolos e telhas)	t.	$5,2 \cdot 10^6$	$5,36 \cdot 10^6$
Uso mensal energia elétrica	kW h	$92,5 \cdot 10^6$	$95,8 \cdot 10^6$
Uso mensal de energia térmica	GJ	$95 \cdot 10^6$	$98,4 \cdot 10^6$
Consumo mensal de lenha	t.	-	$7,00 \cdot 10^6$
No. de empregados na indústria de cerâmica vermelha	unidades	312 600	396 600
Faturamento anual	US\$	-	$4,94 \cdot 10^9$

Fonte: ANICER. Associação Nacional da Indústria Cerâmica. (A.B.C., 1994).

3.2.- Disponibilidade e caracterização dos tipos de biomassa que podem ser usados nos fornos cerâmicos.

Com a crise do petróleo dos anos 70, a grande maioria das indústrias cerâmicas substituiu sua aparelhagem de B.P.F., que era até então usado, pela queima de lenha. Neste período o consumo de lenha aumentou significativamente no setor, tendo um pico nos anos 76-77, quando começou a descer, como mostra o gráfico da figura 8.

Estas variações do consumo e da demanda, foi acompanhado da alta de preços e a diminuição da disponibilidade, pois, apesar de ter-se desenvolvido uma campanha de reflorestamento intensa com árvores que apresentam um ciclo de corte curto (entre 5 e 10 anos), em comparação com uma floresta nativa (entre 50 e 80 anos), não foi o suficiente para substituir totalmente a exploração de matas nativas, como mostra a tabela 2.

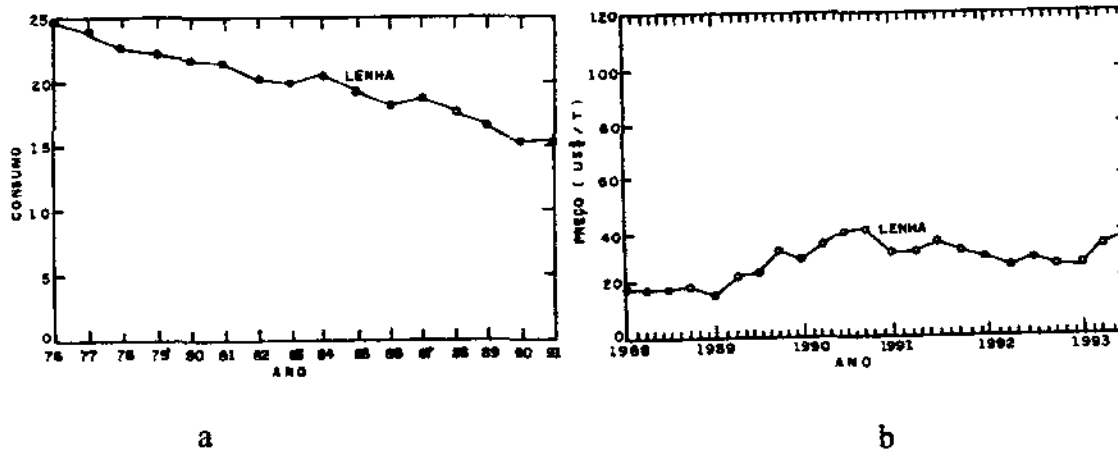


Figura 8: Evolução do consumo anual de lenha na indústria cerâmica e os preços deste insumo energético no Estado de São Paulo de 1977 a 1992 (BEZZON, 1994).

Tabela 2: Obtenção de lenha em florestas nativas e de reflorestamento por região do país em 1989.

Lenha (10 ⁵ t)	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centroeste	Brasil
Nativa	4,95	20,90	6,96	8,00	4,14	44,95
Plantada	0,01	0,24	5,29	3,13	0,54	9,21

Fonte: IBGE, Instituto Brasileiro de Estatística e Geografia.

Todas estas condições, fazem necessário a busca de combustíveis alternativos. Entre estes combustíveis encontram-se os resíduos agrícolas, que nos últimos anos vem desenvolvendo um papel importante no setor de cerâmica estrutural.

Dentre os combustíveis alternativos mais importantes, pela sua disponibilidade e pelas suas características, temos:

- Bagaço de cana-de-açúcar;
- Serragem;
- Casca de arroz;
- Ramas e cavacos de algodão;
- Capim Elefante.

As características destes resíduos e de árvores usadas como lenha, são apresentadas nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Composição elementar (média) de diversas biomassas.

Tipos de Biomassa	Composição Elementar em Base Seca (%)						Referências
	C	H	O	N	S	Cinzas (A)	
Pinus	49,45	5,99	44,36	0,06	0,03	0,30	[1]
Eucalipto	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,72	[1]
Bagaço de Cana	44,80	5,35	39,55	0,38	0,01	9,79	[1]
Serragem*	48,30	5,90	45,10	0,20	-	0,10	[2]
Casca de Arroz	40,96	4,30	35,86	0,40	0,02	18,34	[1]
Capim Elefante	46,10	6,80	43,20	-	-	3,90	[3]
Ramas de Algodão	47,05	5,35	40,77	0,65	0,21	5,89	[1]

*Mistura de Peroba Rosa e Pinus.

[1] JENKINS 1990

[2] SÁNCHEZ 1994

[3] BEZZON 1994.

Tabela 4: Composição imediata de diversas biomassas em base seca e seu poder calorífico superior (PCS). V- voláteis, A- cinzas, F- carbono fixo.

Tipo de Biomassa	Composição Imediata de Biomassa em Base Seca (%)			
	V	A	F	PCS (MJ/kg)
Pinus	82,54	0,29	17,70	20,02
Eucalipto	81,42	0,79	17,82	19,42
Bagaço de Cana	73,78	11,27	14,95	17,33
Serragem*	84,20	0,60	15,20	18,00
Casca de Arroz	65,47	17,89	16,67	16,14
Capim Elefante	79,11	3,90	17,00	17,20
Ramas de Algodão	73,29	5,51	21,20	17,36

Fontes: As mesmas da tabela 3.

A disponibilidade destes resíduos (tabela 5) tem como problema fundamental a sua verificação, pois dificilmente são feitas pesquisas para quantificá-los, como é feito com outros insumos energéticos como o petróleo, carvão mineral, gás natural etc., onde se quantificam recursos e reservas. Portanto, torna-se necessário estimar-se a disponibilidade dos resíduos, considerando de razoável aceitação estas estimativas, já que o objetivo é obter uma ordem de grandeza do potencial real desses resíduos.

Tabela 5: Disponibilidades de alguns dos resíduos agrícolas usados como biomassa no Brasil em 1992.

Nome do resíduo	Colheita do produto agrícola (10^6 t)	Coefficiente de resíduo	Disponibilidade do resíduo (10^6 t)
Bagaço de cana	270,67	0,30	81,20
Casca de arroz	9,96	0,18	1,79
Capim Elefante	-	-	16,70

* Rendimento em t. matéria seca / ha / ano.

3.2.1.- Bagaço de cana-de-açúcar.

Além da composição elementar citada acima, o bagaço está constituído por:

- Umidade b.u.: 48 - 52 %, dependendo do sistema de moagem;
- Sacarose e impurezas: 2 - 5 %;
- Cinzas: 1 - 7 %, os maiores valores sendo apresentados quando do corte mecanizado.

Outra importante característica do bagaço de cana, é a temperatura de fusão das cinzas. No caso de ocorrência, este fenômeno pode provocar a aglomeração de escória na fornalha. HORST (1983) apresenta a relação entre a temperatura de início de deformação t_1 e de fusão t_3 , das cinzas do bagaço cubano, com respeito à época do ano em que foi colhida a cana, na figura 9 (dados obtidos para as condições de Cuba). Observa-se os menores valores de t_1 e t_3 durante a época das chuvas (abril-maio), por causa do incremento de matérias estranhas, que provoca uma escorificação mais intensa nas fornalhas.

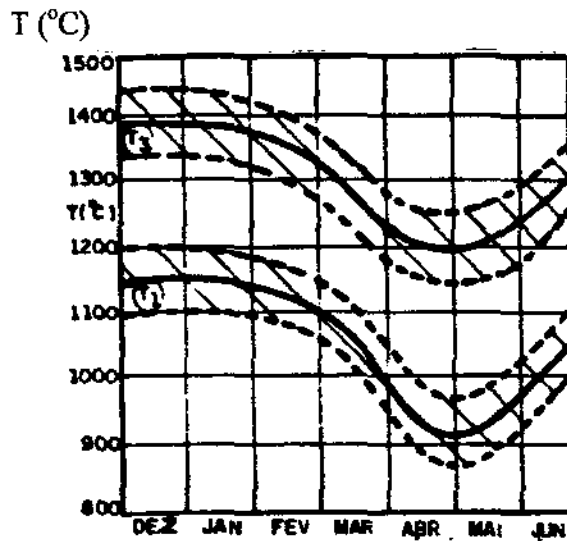


Figura 9: Variação das temperaturas t_1 e t_3 com a época de colheita. (HORST, 1983).

É válido destacar que o valor do PCS apresentado na tabela 4, é um valor médio, pois este parâmetro depende muito do conteúdo de umidade e de cinzas presentes no bagaço. Devido a isso se tem uma série de equações determinadas de maneira empírica para determinar o PC. Estas equações são apresentadas na tabela 6.

No trabalho de SOBRAL & BARBOSA (1987), assinala-se que o conteúdo de sacarose não é significativo em relação ao poder calorífico superior do bagaço. Chegou-se à conclusão de que somente a equação proposta por eles (6), e a equação de Horst (1), estimam valores semelhantes aos da análise calorimétrica. ROQUE et al (1980) demonstram a influência significativa da variedade de cana-de-açúcar sobre os valores do poder calorífico do bagaço de cana.

Neste trabalho utilizou-se, para determinar o poder calorífico do bagaço de cana, a equação de Mendelejev, baseada na composição elementar do bagaço de cana em massa de trabalho (úmida):

$$PCI^t = 339 C^t + 1\,030 H^t - 109 (O^t - S^t) - 24 W^t$$

sendo: W - conteúdo de umidade no bagaço.

Tabela 6: Equações para determinar o poder calorífico do bagaço de cana, considerando os teores de sacarose, cinzas e umidade.

Nº	Equação	Unidades	Bibliografia
1	Fórmula de Van der Horst $PCI^t = 17\,791 - 42 A\check{c}^t - 200,8 W^t$	kJ / kg	Hugot, 1972
2	Fórmula de Hessey $PCI^t = 18\,092 - 51,5 A\check{c}^t - 205,2 W^t$	kJ / kg	“ “
3	Fórmula de BAGUANT $PCI^t = 41,64 - 6,9 A\check{c}^t - 47,64 W^t$	kcal / kg	Harrel & BAGUANT, 1992
4	Fórmula de Don $PCI^t = 18\,309 - 207,6 W^t - 196,05 A\check{c}^t$	kJ / kg	Don, 1969
5	Fórmula de Upadhiaya $PCI = 17\,802 [1 - (W^t - A^t) / 100]$	kJ / kg	Upadhiaya, 1991
6	Fórmula de PLANALSUCAR $PCS = 4\,450 - 43,27 W^t - 25,23 A^t$	kcal / kg	Sobral & Barbosa, 1987
7	Fórmula para colheita mecanizada $PCI = 18\,303 - 31,15 A\check{c}^t - 207,3 W^t - 196,1 A^t$	kJ / kg	Meade-Chen, 1977

$A\check{c}^t$ = teor de sacarose em peso, expresso em massa de trabalho;

A^t = Teor de cinzas em peso, expresso em massa de trabalho;

W^t = Teor de umidade em peso, expresso em massa de trabalho.

3.3.- Fundamentos da combustão do bagaço de cana-de-açúcar e outros resíduos agro-industriais.

O processo de combustão de combustíveis com alto teor de voláteis, como a madeira, bagaço de cana, serragem, etc., é ilustrado esquematicamente na figura 10 (HELLWING, 1985).

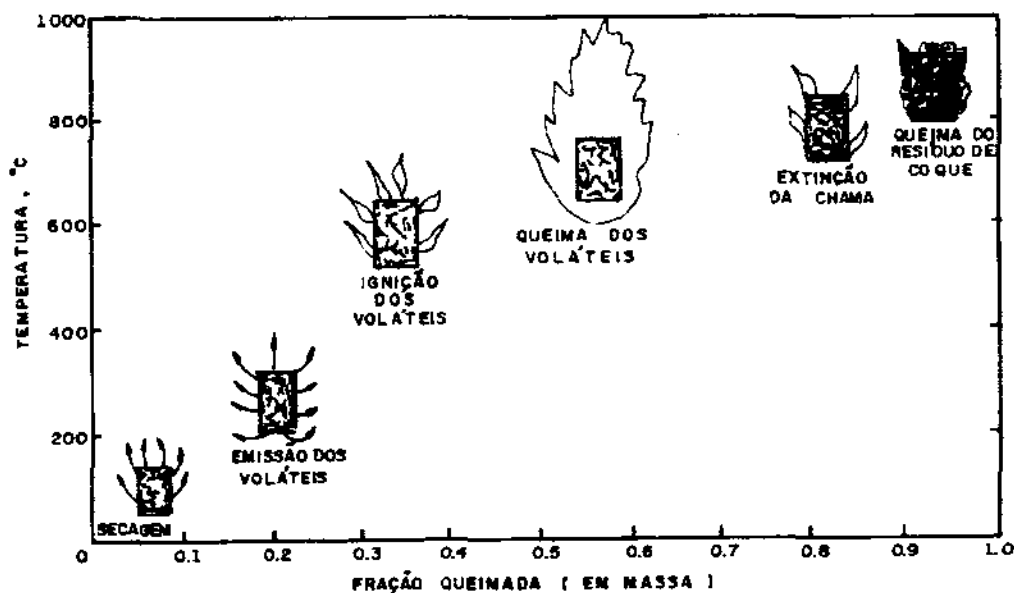


Figura 10: Processo de combustão de energéticos com alto teor de voláteis. (HELLWING, 1985).

As etapas fundamentais, portanto, são:

- secagem;
- emissão, ignição e combustão dos voláteis (hidrocarbonetos C_nH_m , dióxido de carbono CO_2 , monóxido de carbono CO e hidrogênio H_2);
- queima do resíduo de coque.

Hellwing demonstra que mais das duas terças partes dos pontos de calor liberado durante a combustão correspondem à queima dos voláteis, assim é necessário alimentar o ar em dois locais: ar primário para a combustão do carbono sólido, e ar secundário para os produtos gasosos (figura 11). A coluna $C \rightarrow CO_2$ corresponde ao processo em camada fina, sem zona de redução, e a coluna $C \rightarrow CO$ ao processo de camada grossa. Neste último caso a fração de ar secundário deve ser maior, pois a chama acima da camada é produzida pelos voláteis e o CO obtido pela redução do carbono do combustível.

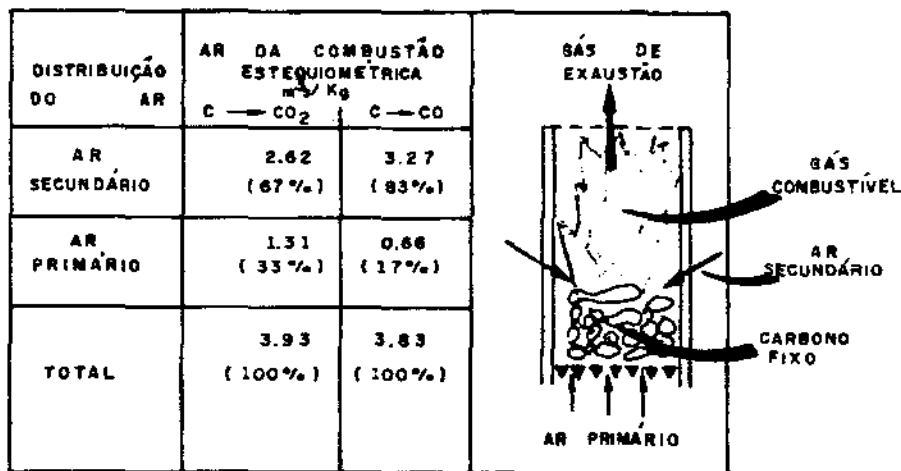


Figura 11: Relação de ar primário e secundário para a combustão de biomassa. HELLWING, 1985).

3.3.1.- Resultados de pesquisas sobre a combustão do bagaço de cana-de-açúcar.

STUBINGTON & FENTON (1984) pesquisaram a combustão do bagaço de cana seco (umidade de 10 %) em camada fixa, incluindo o bagaço *in natura* e peletizado. Os resultados mais importantes destas pesquisas resumem-se na tabela 7.

Tabela 7: Máxima velocidade de combustão e temperaturas obtidas nas pesquisas de queima de bagaço seco em leito fixo.

Combustível	Máxima velocidade de combustão ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Vazão de ar primário para a máxima velocidade de combustão ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Máxima temperatura do leito ($^{\circ}\text{C}$)
Fibra leve (bagaço <i>in natura</i>)	0,074	0,14	730
Fibra densa (bagaço enfardado)	0,063	0,19	805
Pelets pequenos (8mm x 15mm)	0,054	0,21	1170
Pelets grandes (90 mm x 200 mm)	0,014	0,21	950

Fonte: STUBINGTON & FENTON, 1984.

Na tabela 8 apresentam-se os resultados de estudos feitos sobre a queima de bagaço em suspensão numa câmara de combustão (CUNDY et al, 1983). O bagaço é alimentado por um queimador tipo vórtex (figura 12).

Tabela 8: Resultados dos testes de queima de bagaço em suspensão.

Parâmetros	16 % de umidade b.u.	9 % de umidade b.u.
Temperatura da fornalha ($^{\circ}\text{C}$)	841,0	845,0
Temperatura dos gases de saída ($^{\circ}\text{C}$)	517,0	541,0
Vazão de ar primário (kg/min)	1,5	1,5
Vazão de ar tangencial (kg/min)	2,9	3,0
Vazão de bagaço (kg/h)	62,0	56,2

Fonte: CUNDY et al, 1983.

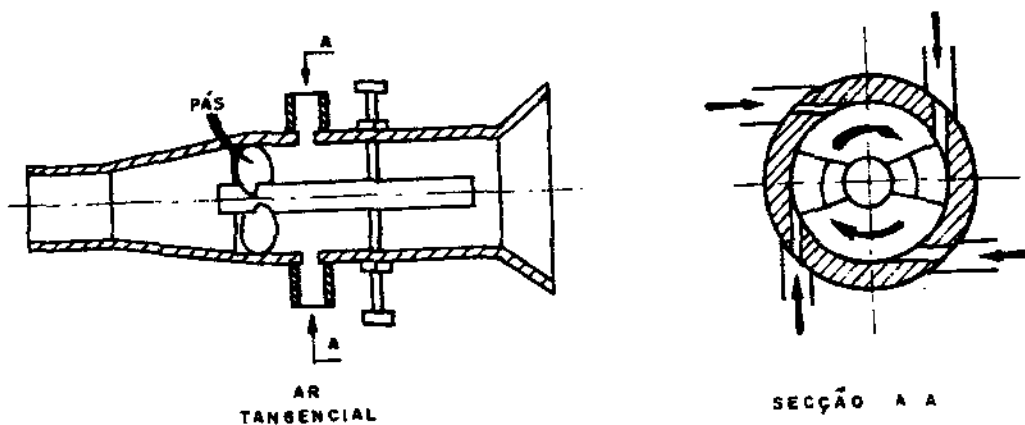


Figura 12: Queimador tipo vórtex para alimentação de bagaço. (CUNDY et al, 1983).

Os testes demonstraram a possibilidade de queima do bagaço seco pulverizado com uma relação entre as quantidades de ar real e teórica (coeficiente de excesso de ar) igual a 5 %. Geralmente nas fornalhas industriais este parâmetro tem valores acima de 30 %. Como conclusão fundamental do trabalho tem-se que a operação com baixo excesso de ar é possível só se:

- o bagaço é seco até uma umidade mínima de 16 %;
- o bagaço é pulverizado até que 60 % das partículas passe pela peneira de 600 μm .

Os resultados do estudo teórico feito por HAREL & BAGUANT (1992) sobre a variação da temperatura de combustão e os teores de CO_2 e CO presentes nos gases de combustão, com relação ao coeficiente de excesso de ar, aparecem representados na figura 13.

Dois casos foram analisados, a combustão industrial e a combustão teórica. Observa-se no caso da combustão industrial o deslocamento do ponto da combustão estequiométrica de

1 a 1,32 (excesso de ar), por causa da imperfeição de mistura ar - combustível. Durante a combustão industrial a temperatura de combustão é menor devido à transferência de calor dos gases às superfícies de aquecimento e as perdas de calor ao meio ambiente.

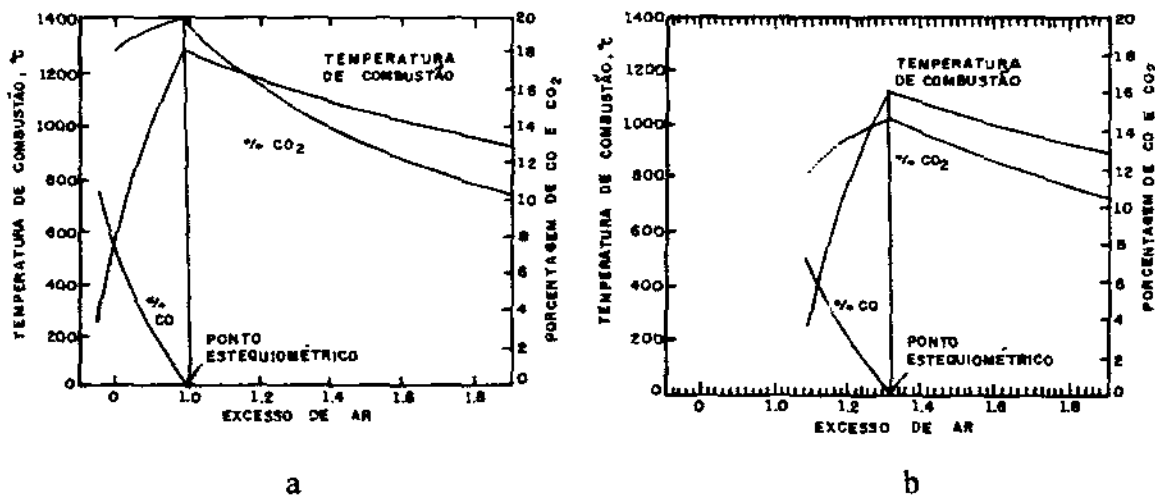


Figura 13: Variação da temperatura de combustão e dos teores de CO_2 e CO com o coeficiente de excesso de ar. a) teórico; b) industrial. (HAREL & BAGUANT, 1992).

3.3.2.- Particularidades do processo de avaliação e modelagem de fornos intermitentes de cerâmica vermelha.

O forno intermitente sempre é criticado pelo maior uso de energia na combustão que o forno Túnel. Porém a utilização de novas técnicas tem permitido um progresso decisivo na redução do consumo específico destes fornos com:

- utilização de paredes de fibras cerâmicas;
- utilização de vagões sobre uma superestrutura de solo vazado;
- recuperação térmica de gases e ar de resfriamento.

Existem poucos trabalhos sobre simulação de fornos intermitentes. Os processos de combustão e transferência de calor são não-estacionários, o que faz com que o sistema de equações do modelo seja complexo. O Serviço Térmico da Faculdade Politécnica de Mons, Bélgica, elaborou um simulador da operação de fornos cerâmicos intermitentes (MEUNIER & FONTAINE, 1987 e LYBAERT & MEUNIER, 1989). Os principais aspectos deste simulador são:

Objetivos do programa de simulação:

- Fazer a previsão do uso de energia em operação nominal, ou logo da modificação do ciclo de aquecimento ou da carga, ou para diferentes condições de operação;
- Avaliar as medições do ciclo realizadas *in situ*;
- Prever a relação da variação da vazão e temperatura dos gases à saída do forno visando a recuperação de calor;
- Prever a economia de energia em consequência da remodelação do forno;
- Prever a relação de variação da vazão de combustível ao longo do tempo;

Fundamentos do programa de simulação (figura 14):

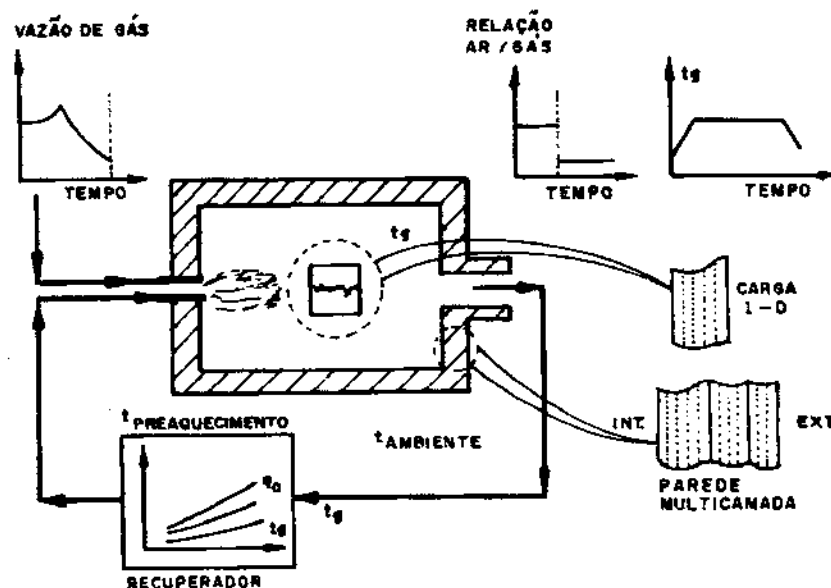


Figura 14: Esquema ilustrativo dos fundamentos do modelo de simulação. (LYBAERT & MEUNIER, 1989).

- O modelo considera o calor das reações que acontecem durante a queima do tijolo (evaporação, descarbonatação e combustão da matéria orgânica). Frequentemente estas reações tem pouca influência sobre o uso de energia, mas afetam a taxa de incremento da temperatura e o gradiente térmico da carga na faixa de temperatura na qual elas acontecem;
- A temperatura do gás dentro do forno é assumida uniforme e igual à temperatura de saída dos gases;

- O perfil de temperaturas nas paredes é obtido por meio da discretização da espessura de cada material em camadas elementares.

A equação de condução consiste num sistema de equações diferenciais integradas por algoritmo clássico.

Dados necessários para o programa:

- Características geométricas e termofísicas das camadas que constituem as paredes do forno;
- Características geométricas e termofísicas da carga;
- Ciclo de temperatura e teor de O₂ nos gases;
- Características do combustível (análise imediata e poder calorífico);
- Parâmetros de recuperação de calor;

O cálculo define a variação no tempo (durante o ciclo) das cargas (potências) térmicas a fornecer às paredes e à carga para seguir o ciclo de temperaturas e de excesso de ar imposto.

O balanço térmico permite determinar a lei de evolução da vazão de combustível. MEUNIER & FONTAINE (1987), mostram as equações fundamentais do modelo proposto. É também incluído um exemplo de aplicação do simulador para um forno de tijolos refratários.

3.4.- Experiências na utilização do bagaço de cana e outros resíduos em fornos cerâmicos.

Neste item aparecem resumidas algumas experiências da utilização de diferentes biomassas, como a serragem e o bagaço da azeitona na Guiana Francesa e na Europa respectivamente, assim como o bagaço de cana-de-açúcar em olarias brasileiras.

3.4.1.- Experiências Europeias.

Como foi apresentado no item 3.1.2, na Europa é predominante a existência de fornos Túnel e Hoffmann para a elaboração de cerâmica vermelha. É por isso que neste item serão também tratados estes fornos, apesar do objetivo do trabalho seja direcionado para os fornos intermitentes, mas consideram-se válidas estas experiências do ponto de vista de substituição de óleo combustível por recursos renováveis, e que estão também a disposição no Brasil.

Na Itália, de acordo com DI CESARE et al (1986) atualmente operam 513 indústrias produtoras de tijolos, às quais corresponde uma potencialidade anual de aproximadamente $24,3 \cdot 10^3$ t. do produto. É esta indústria uma das mais interessadas do condicionamento econômico de aproveitamento energético e de fontes alternativas de energia, pois ela consome ao redor de 2 milhões de toneladas equivalentes de petróleo ao ano.

Desde 1973, com a crise do petróleo, se iniciou um projeto com dois objetivos principais:

- a) conter o uso de energia térmica (otimização);
- b) diversificar as fontes usando combustíveis integrativos e/ou substitutivos, aplicando também o sistema de cogeração.

Deste projeto se conhecem trabalhos de utilização de combustíveis alternativos tais como a serragem, bagaço de azeitona, licor negro residual das fábricas de papel, resíduos da indústria têxtil e outros. Como há interesse em estudar combustíveis sólidos provenientes de biomassas, os dois primeiros merecerão destaque.

Utilização de serragem (GIORDANI et al, 1986).

Esta experiência realizou-se na fábrica de tijolos "Le Fornaci Le Peaggioli", onde se instalou um campo experimental para a utilização da serragem como combustível alternativo em substituição do óleo anteriormente empregado.

Dentre os aspectos que condicionaram a escolha da olaria está o fato da mesma estar situada numa região onde predominam as fazendas madeireiras, com uma elevada disponibilidade de resíduos, na forma de pedaço ou como aparas. A maior parte desses resíduos eram incinerados em fornos rudimentares com uma grande taxa de sujeira e poluição.

O plano elaborado para a partida do campo experimental contemplava a reserva de mercado do combustível, coleta e transporte do resíduo, assim como a sua elaboração (moagem), para obter a granulometria considerada ótima (máximo 1,8 mm), e o estudo do projeto do queimador (figura 15) de serragem para o forno Túnel.

Resultados:

Na atualidade o forno trabalha 24 horas alimentando o queimador com óleo combustível, e mais 48 horas com serragem.

Para obter 37 681 kJ / kg com óleo combustível são necessárias 327 Liras; para obter 37 681 kJ / kg com resíduo de madeira é necessário 38 Liras.

Em outros termos, por cada kg de serragem queimado a economia é de 138 Liras. Somando os gastos de transporte, processamento e gastos gerais, que fazem um total de 54,97 Liras / kg, a economia líquida se reduz a 67,03 Liras / kg => 227 milhões de Liras / ano.

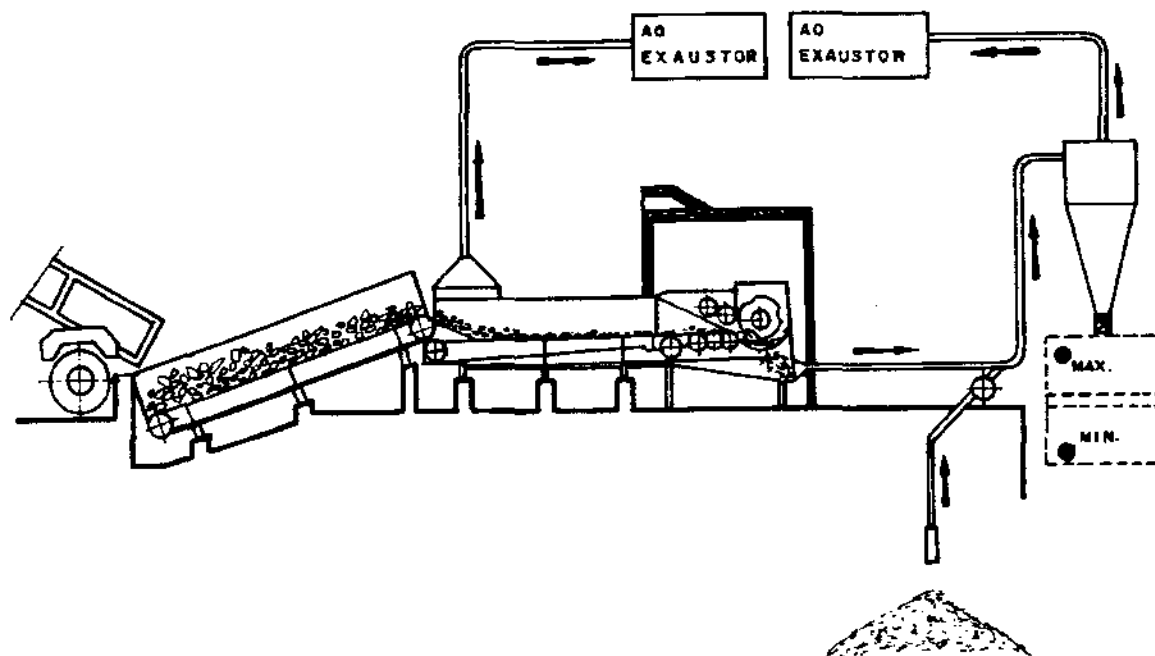


Figura 15: Queimador e moinho para serragem do forno Túnel. (GIORDANI et al, 1986).

Características do produto final (tijolos):

Durante a experiência analisaram-se os tijolos queimados com os diferentes combustíveis, observando-se um aumento na porosidade dos mesmos. Procedeu-se, então, a uma análise mais detalhada e por maior tempo do problema, da qual se chegou à conclusão de que não existe correlação entre a porosidade e o tipo de combustível empregado, e sim com variações mínimas na mistura da argila.

Outra experiência foi feita pelos mesmos autores na instalação da indústria "Campi Bisenzio". Neste caso adicionou-se uma porcentagem de serragem à massa da argila a ser queimada num forno Túnel que queimava óleo. Os resultados mudaram em um campo muito amplo em função do tipo de material a ser queimado e da dosagem de serragem incorporada à massa. Com tudo isso foi possível concluir:

- A economia de óleo combustível pode ser quantificada em aproximadamente 15 %, ou equivalente a 57,6 kg/hora.
- Um notável melhoramento na zona de pré-aquecimento e uma elevação mais gradual da temperatura.

Utilização do bagaço de azeitona (GIORDANI & ZANI, 1988).

Um dos principais aspectos a ter em conta na hora de selecionar um combustível alternativo, deve ser a disponibilidade deste e a sua aquisição fácil e econômica. Foi por isso que na Itália, país onde a produção média anual de azeitona é de 2,6 milhões de toneladas, decidiu-se experimentar a utilização do bagaço resultante da fabricação de azeite, como combustível alternativo.

A composição em peso desta biomassa é:

- óleo 1 %
- caroço..... 45 - 60 %
- casca..... 8 - 12 %
- poeira..... 20 - 30 %
- umidade..... 7 - 12 %

Todo este material é moído e misturado. O resultante deste processo é um combustível pulverizado com um PCI igual a 17 300 kJ / kg.

Para o experimento escolheu-se uma olaria chamada Imber, em Bologna, onde existia um forno Hoffmann que operava com gás metano. Foi feito um alimentador expressamente para o novo combustível, representado na figura 16.

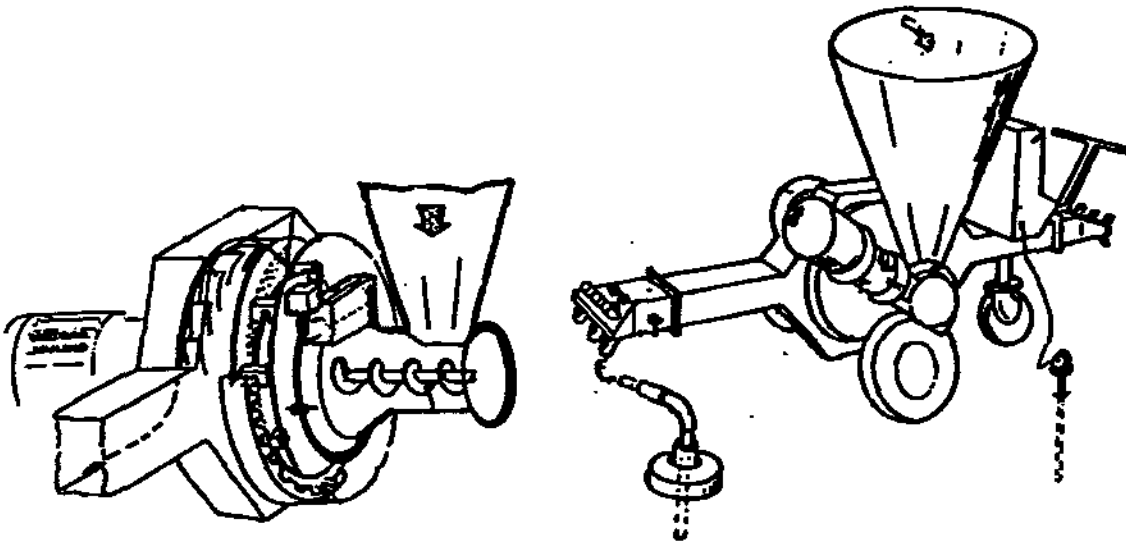


Figura 16: Alimentador para bagaço de azeitona. (GIORDANI & ZANI, 1988).

Os resultados obtidos não foram os esperados. Na operação com bagaço de azeitona com uma granulometria ótima e homogênea, nem sempre foi possível controlar o volume da chama nem a temperatura. A auto-oxidação do combustível, provoca um aumento cumulativo da temperatura, em alguns casos reduzindo notavelmente o seu poder calorífico. Este fenômeno manifesta-se de maneira diretamente proporcional ao envelhecimento do combustível. Apesar disso, considera-se a experiência positiva do ponto de vista técnico-econômico.

Utilização da serragem num forno intermitente na Guiana Francesa.
(MESTIVIER & COUDAMY, 1987).

Em nossos dias, se os fornos Túnel são necessários para as grandes produções de cerâmica vermelha, não é menos certo que a evolução da tecnologia permite um desenvolvimento dos fornos intermitentes.

Em 1985, à Sociedade COUDAMY, foi confiada a realização, na Guiana Francesa de um forno intermitente de cerâmica vermelha. As características essenciais deste forno são:

- Capacidade útil..... 25 m³.
- Temperatura máxima..... 1 140°C.
- Temperatura de utilização..... 1 000°C.
- Dimensão dos vagões de carga (3 vagões)

altura..... 2,16 m
 comprimento..... 8,50 m.
 largura..... 1,40 m

- 2 plataformas (3 vagões): um em queima, os outros dois sendo carregado ou descarregado, permitindo uma rápida rotação.

A instalação permite assim um ciclo em 45 horas, realizando três queimas por semana. A alimentação de resíduos de madeira é totalmente automatizada. Está composta por um distribuidor com silo de armazenagem para duas centrais de distribuição, com 8 injetores cada uma. O conjunto tem uma peneira vibratória para eliminar partículas consideradas muito grandes ou corpos estranhos. O forno tem 8 fornalhas de cada lado, com um total de 16.

A construção deste forno está condicionada pela oferta de combustível, pois seria impossível a utilização de gás num forno Túnel. O custo global do combustível é de 10 %, o que pode ser considerado um bom índice na cerâmica vermelha.

3.4.2.- Resultados de pesquisas realizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

O IPT do Estado de São Paulo, nos anos 1985 - 88 desenvolveu uma série de projetos com vistas à substituição da lenha como combustível de fornos cerâmicos por outros produtos, principalmente o bagaço de cana-de-açúcar.

Foram contactadas indústrias cerâmicas que já tivessem realizado experiências no mesmo sentido, com o objetivo principal de avaliar o sistema construído, os resultados que vinham sendo obtidos e levantar as principais deficiências e dificuldades encontradas.

Dentre os contactos feitos assinalaram como muito produtivo a “Cerâmica São Luiz Ltda”, situada no município de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, que desde 1983 vem desenvolvendo esforços na substituição da lenha por bagaço de cana em fornos intermitentes de tipo circular, motivada principalmente pelo fato de situar-se numa zona de grande disponibilidade de bagaço de cana, em função das usinas de álcool e açúcar localizadas nas suas proximidades, que fornecem um combustível a custos significativamente mais baixos que o da lenha (MESSIAS, 1985).

Logo depois, começaram trabalhos com os mesmos objetivos na “Cerâmica Divisa Ltda”, município de Indaiatuba, SP, onde foi escolhido um forno com características

semelhantes ao anterior, fazendo remodelações que condicionaram o mesmo para a queima eficiente do bagaço de cana.

Cerâmica São Luiz Ltda (IPT, 1985).

Nesta indústria iniciaram-se as experiências com o bagaço de cana *in natura* (50 % de umidade), com um sistema de alimentação pneumático de combustível onde o bagaço de cana era soprado no interior da mesma fornalha onde também queimava-se lenha.

O sistema de alimentação e controle de vazão de bagaço era feito por um silo dotado de uma rosca sem-fim que acoplava a boca de descarga, através de tubos flexíveis, aos ventiladores centrífugos que injetavam a mistura ar-bagaço no interior de cada fornalha. Mais isto só acontece após 12 horas de operação com lenha, o que corresponde ao período de pré-aquecimento e aquecimento do forno até aproximadamente 600°C. Após este período as portas das fornalhas são fechadas com blocos, e os tubos por onde é soprado o bagaço são introduzidos nas suas laterais, proporcionando queima em suspensão.

Como pode-se notar, a substituição da lenha não é total, mas de um consumo médio de 23 m³ de lenha em cada ciclo de um forno com capacidade para 22 000 peças, diminuiu-se para 10 m³ durante as 12 horas iniciais e o equivalente a aproximadamente 6 m³ de bagaço nas 12 horas seguintes.

Outra dificuldade que se verificou foi que, apesar de atender às expectativas quanto à redução nos custos operacionais, o sistema proporcionava o aproveitamento parcial do bagaço, pois ocorria a deposição de grande quantidade de bagaço não queimado nos cinzeiros das fornalhas e no interior do forno, além da geração de fuligem que prejudicava a qualidade do produto.

A medida adotada para reduzir tais efeitos foi moer o bagaço, reduzindo o tamanho das partículas e melhorando assim as condições de queima. A medida mostrou-se eficiente, mas necessita, para uma correta moagem, de um bagaço seco (umidade 20%), para evitar o emperramento do moinho pela aderência das fibras úmidas no seu interior.

Na indústria citada vinha se utilizando a serragem em substituição ao bagaço no mesmo sistema face à disponibilidade local daquele. A serragem apresenta vantagem em relação ao bagaço, seja no teor de umidade menor (10 %), seja no poder calorífico maior, conseqüentemente com menor consumo e menores áreas de estocagem.

Cerâmica Divisa Ltda (IPT, 1987)

O trabalho feito nesta indústria teve como primeiro passo a escolha do forno onde se fariam os testes, considerando-se a representatividade no setor, procurando com que os resultados obtidos pudessem ser estendidos para o maior número possível de indústrias.

Levando isso em conta, o forno escolhido consistia de uma câmara circular de 7 250 mm de diâmetro, com paredes construídas em alvenaria de tijolos comuns. O teto em forma de abóbada, também construída de tijolos comuns, é apoiado sobre as paredes laterais. O piso interno é completamente vazado, construído de tijolos com aberturas, sob as quais existem canais subterrâneos que interligam a câmara à chaminé ou ao secador, mediante registros. Possui 4 fornalhas dispostas radialmente junto às paredes laterais.

As medições no forno foram realizadas ininterruptamente, ao longo de um período completo de queima, com duração de 41 horas. Os resultados das medições de tempo e consumo de combustível aparecem na tabela 9, as temperaturas medidas com os termopares representados na figura 17 foram as seguintes:

- temperatura máxima no interior do forno (termopar 8)..... 920°C
- temperatura máxima na base da carga (termopar 9)..... 750°C
- temperatura dos gases de exaustão (termopar 10)..... 600°C

Tabela 9: Resultados das medições feitas no forno antes e após das reformas.

		Antes da reforma	Após da reforma	
		Lenha	Lenha	Lenha + Bagaço
Tempo de um ciclo (horas)	Carregamento	4	3	3
	Pré-aquecimento	16	14	14
	Queima	22	12	12
	Resfriamento	18	18	18
	Descarga	4	3	3
	Total	64	50	50
Produção	Peças	13 000	10 000	10 000
	kg	29 000	23 000	23 000
Consumo de combustível	Unidade	26 m ³	15 m ³	5 m ³ + 4,2 t
	Específico (GJ/t)*	4,36	3,27	3,82

Fonte: IPT, 1987. *Calculado.

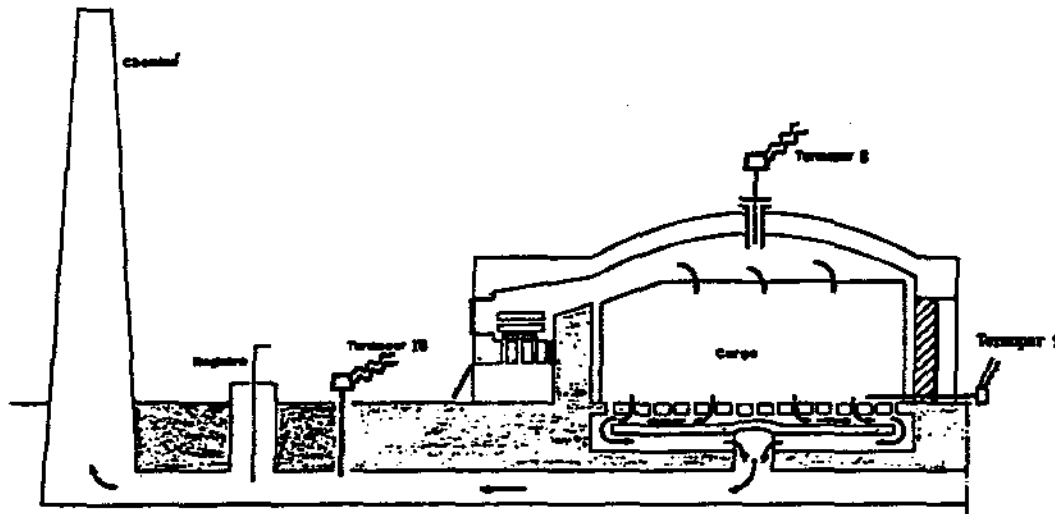


Figura 17: Instalação de termopares para medição de temperaturas. (IPT, 1985).

Esses valores permitiram a definição das alterações necessárias para a sua adaptação, com o objetivo de torná-lo o mais versátil possível quanto ao combustível utilizado, de maneira a permitir a experimentação de combustíveis que viessem a se mostrar interessantes. As alterações propostas tinham também o propósito de melhorar e evitar defeitos e irregularidades identificadas em experiências anteriores.

As alterações foram:

- Redimensionamento dos canais e crivos, procurando-se reduzir as perdas de carga no circuito dos gases até a chaminé, e melhorar a uniformidade da temperatura ao longo de toda a secção transversal da carga do material a queimar no forno, e na altura da mesma, permitindo melhor controle da tiragem dos gases;
- Utilização de cinzas como material isolante, colocada sobre a abóbada do forno, formando uma camada de cerca de 5 cm de espessura, reduzindo assim a temperatura superficial da mesma, no sentido de racionalizar o uso de energia e diminuir o tempo do ciclo;
- Execução e implantação de uma grelha basculante (figura 18), de forma que possa ser facilmente alterada em função do combustível a empregar, de acordo à disponibilidade. As grelhas apresentam também um sistema de distribuição de ar para o seu resfriamento, proteção necessária tendo em conta as elevadas temperaturas alcançadas na fornalha;

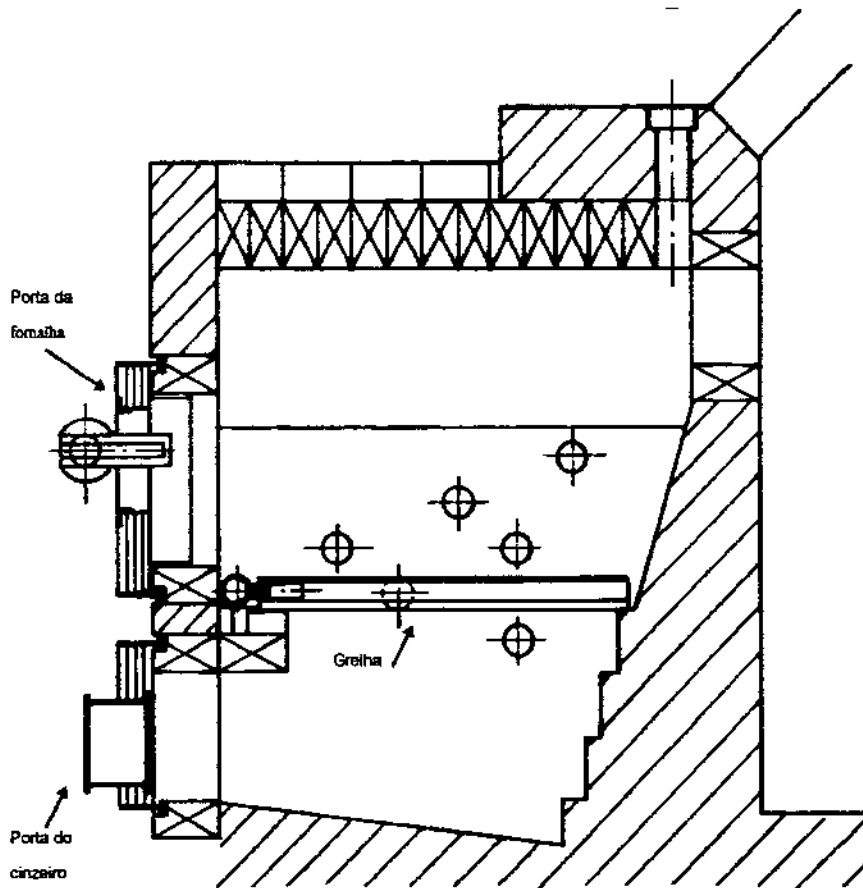


Figura 18: Fornalha de volume variável com grelha basculante para diferentes biomassas. (IPT, 1987).

- Instalação de portas nos cinzeiros e bocas das fornalhas, diminuindo assim as perdas por radiação e permitindo o controle do excesso de ar dentro da fornalha.

Após estas reformas se procedeu à realização de testes queimando lenha e bagaço indistintamente, com o objetivo de comparar os resultados obtidos com ambos combustíveis. Durante a operação com lenha, na fase de pré-aquecimento as portas da fornalha e cinzeiros permaneceram totalmente abertas, permitindo a admissão do maior volume de ar possível no interior do forno. Já na fase de queima propriamente dita, as portas foram mantidas fechadas, abrindo só para introduzir a lenha. No carregamento do forno, o empilhamento foi feito com altura menor que a normal, com o objetivo de evitar o contato direto da chama com as peças, o que danifica os produtos mais perto das fornalhas, e também, o de reduzir o consumo de combustível e os tempos empregados em cada ciclo.

Para a operação com bagaço de cana, se utilizou um produto fornecido pela empresa Bagatex, com um teor de umidade de 20 % b.u., na forma de fardos. Para a sua utilização foi necessário submetê-lo ao processo de desagregação, que consistiu no desfardamento manual e moagem em moinhos de facas.

No período inicial, correspondente à fase de pré-aquecimento da carga e forno, procedeu-se da mesma forma que na fase anterior, pois se utilizou lenha em toras queimando sobre a grelha. Isto ocorre porque nesta fase precisa-se de um aquecimento lento e gradual, garantido por grandes volumes de ar, de modo a incorporar a umidade residual do material sob a forma de vapor de água. Nesta fase as portas das fornalhas permanecem abertas totalmente e a temperatura interna do forno mantida em níveis não superiores a 250°C.

Com estas condições as temperaturas no interior das fornalhas são suficientemente baixas, o que não conseguiram com a queima de combustível sólido pulverizado.

Os resultados destas operações são apresentados na tabela 9. As temperaturas foram medidas com termopares situados como aparece na figura 19. A temperatura máxima dos gases de exaustão nesta experiência foi de 320°C.

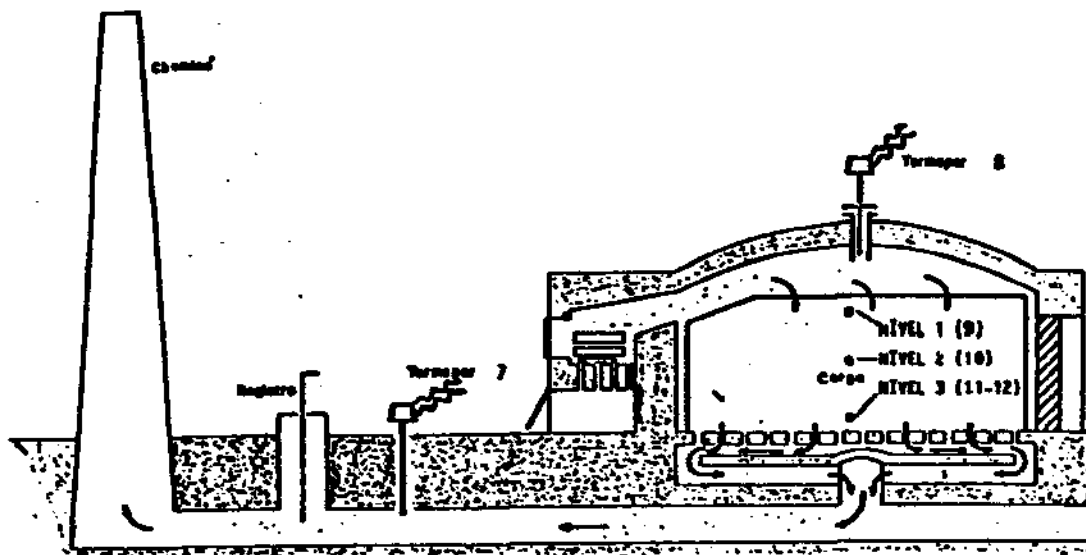


Figura 19: Disposição dos termopares para indicação de temperaturas após reformas. (IPT, 1987).

A redução da capacidade de 13 000 para 10 000 peças é, conforme citado anteriormente, devido à alteração feita no empilhamento. Aliás esta alteração ligada às demais, permitiu uma diminuição do tempo do ciclo equivalente a 22 %, o que assegura a manutenção da produtividade do forno.

Comparando-se os índices calculados de consumo específico de combustível (GJ / t), analisa-se o desempenho quanto à demanda de energia. A comparação destes índices revela economias significativas em relação às condições antes das reformas. Se bem que as reformas signifiquem uma economia em tempo e combustível, é de se destacar que a operação com bagaço de cana não representou muita coisa considerando-se todo o trabalho de preparo do combustível, para uma produção contínua de vários fornos, o que complica o desfardamento manual e moagem em moinhos de facas para uma quantidade consideravelmente grande de combustível. Outra coisa a assinalar é que o bagaço empregado para os testes não está ao alcance de qualquer produtor, o que resulta numa restrição para a experiência.

A temperatura dos gases de exaustão diminuiu significativamente, mas ainda apresenta um valor que poderia ser aproveitado para secar a carga antes de carregar o forno, ou para secar combustível *in natura*.

Sobre o aproveitamento dos gases, MESSIAS (1988) fez um trabalho num forno que começava a ser construído, o que possibilitou prever canais de interligação que permitissem a recuperação dos mesmos.

Foram então construídos quatro fornos, de câmaras retangulares, dispostos segundo figura 20, acoplados a uma chaminé só. Os resultados desta experiência aparecem na tabela 10.

Como pode-se notar na tabela 10, a diferença de temperaturas entre o topo e a base da carga diminuiu, assim como também aumentam as propriedades do produto. Vale dizer que, com esta recuperação, o consumo de lenha foi reduzido em 5 m³, o que representa 20 % do consumo total num ciclo de queima.

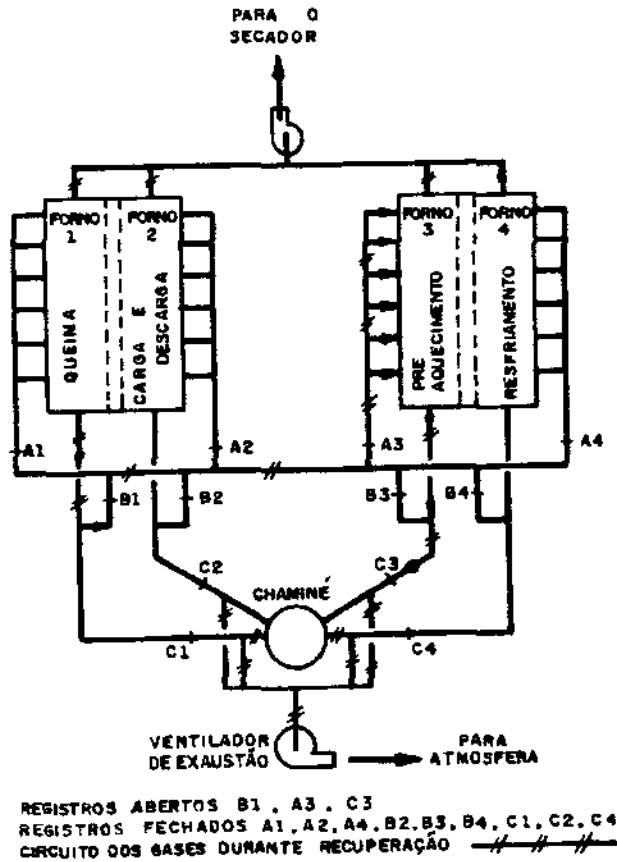


Figura 20: Interligação dos fornos para recuperação de gases quentes. (MESSIAS, 1988)

Tabela 10: Temperatura máxima da carga e características dos produtos obtidos.

	Operação normal		Com recuperação de gases	
	Temperatura máxima (°C)	Resist. à compressão (MPa)	Temperatura máxima (°C)	Resist. à compressão (MPa)
No topo da carga	950	*	980	*
A média altura	850	1,5	900	3,2
Na base da carga	670	0,6	730	1,3

*No experimento, o topo da carga era de telhas e, portanto, o parâmetro avaliado não é válido comparar.
 Fonte: MESSIAS, 1988.

3.4.3.- Experiências em escala industrial em olarias brasileiras.

No Brasil, várias indústrias de cerâmica tem substituído a lenha ou o óleo combustível, pela utilização de resíduos agrícolas ou agro-industriais como combustível para a fabricação de tijolos e telhas, mas são poucos os trabalhos apresentados com verdadeira análise técnica. O que geralmente motiva os proprietários destas indústrias à mudança de combustível é o

problema de preço ou de fornecimento, o que não deixa de ser importante, mas sempre que estas mudanças sejam o mais benéfico possível, do ponto de vista energético e de boas propriedades no produto final.

São estas talvez as causas pelas quais poucos trabalhos deste tipo sejam publicados, com resultados de medições e testes.

Entre estes poucos trabalhos aparece:

Cerâmica de Alagoas (NETO & LYRA, 1983)

A Cerâmica Porangaba, uma empresa de pequeno/médio porte, com capacidade de produção de até 1 400 000 peças de tijolos de 6 furos, queimados num forno semi-contínuo tipo Hoffmann, foi escolhida para uma experiência de substituição da lenha que estava sendo utilizada, por um combustível alternativo como o bagaço de cana.

Localizada numa região tradicionalmente agrícola, exploradora de cana-de-açúcar e pecuária bovina, a maior oferta de material combustível é a lenha, mas, devido aos desmatamentos para procura de espaço para a cultura da cana e/ou capim, preocupa o futuro e o preço deste insumo.

Procedeu-se à queima de bagaço *in natura*, que apresentou resultado insatisfatório, em função de seu demorado tempo de queima. Observou-se, então, que diminuindo sua granulometria obtem-se um incremento na sua combustão.

Resultados:

De um consumo exclusivamente de lenha até janeiro/83, trabalha-se atualmente com uma proporção de até 50 % de bagaço de cana.

É de se destacar neste trabalho, que os autores vem a vantagem da substituição fundamentalmente como um regulador de preços.

3.5.- Comportamento da argila durante a queima.

A argila que compõe os tijolos, além da umidade própria, para ser processada e prensada precisa ser umidificada. Durante a fase de secagem dos tijolos é retirada a água contida entre as partículas, que se unem umas às outras, provocando uma primeira contração. Em seguida é eliminada a água que envolve as partículas e que é característico da umidade da argila, dando origem a uma segunda contração, menor que a primeira. Finalmente é eliminada a água de capilaridade, que não provoca mais contração, porém, ao ser eliminada deixa

pequenos espaços vazios (porosidade), devido à estrutura cristalina das partículas. Na figura 21 mostra-se a contração de um tijolo após a secagem natural (ao sol).



Figura 21: Contração do tijolo após a secagem natural (ao sol). (MERSCHMEYER, 1989).

Este produto, teoricamente seco, vai para o forno para ser queimado. Em algumas ocasiões, não acontece realmente assim, os tijolos chegam ao forno muito úmidos e parte destas contrações acontecem muito rapidamente devido às elevadas temperaturas, provocando desabamento das pilhas e interferindo na passagem dos gases através delas.

Durante a queima, as argilas sofrem várias transformações (RUSSO), tais como:

- a) Transformações químico-físicas; variações da estrutura química e cristalina.
- b) Transformações mecânicas; dilatação, porosidade, resistência mecânica, etc.

Estas transformações se sucedem de maneira regular, diferenciando um tipo de argila do outro. Durante a secagem e a queima podemos distinguir, com base na temperatura e nas transformações ocorridas, diversas fases:

- Até 100 °C, ou pouco mais: eliminação da água livre;
- Até ~ 200 °C: eliminação da água que fica intercalada entre as pequenas partículas de argilo-minerais, e da proveniente da matéria orgânica;
- De 350 °C a 650 °C: combustão de substâncias orgânicas contidas na argila, e dissociação de compostos sulfurosos (geração de CO₂);
- Entre 450 °C e 650 °C: decomposição da argila, liberação de vapor de água que estava como água de constituição;
- A ~ 570 °C: transformação da fase do quartzo de α para β ;
- Àcima de 700 °C: iniciam-se as reações químicas da sílica e alumina com elementos fundentes formando silico-aluminatos, iniciando a sinterização;
- De 800 °C a 950 °C: decomposição de carbonatos (geração de CO₂);
- Àcima 1000 °C: os silico-aluminatos na forma vítrea começam amolecer, assimilando as pequenas partículas, tornando-se mais compactos e impermeáveis.

A figura 22 representa estas mudanças e a tendência a variação de algumas características físicas são indicadas graficamente na figura 23.

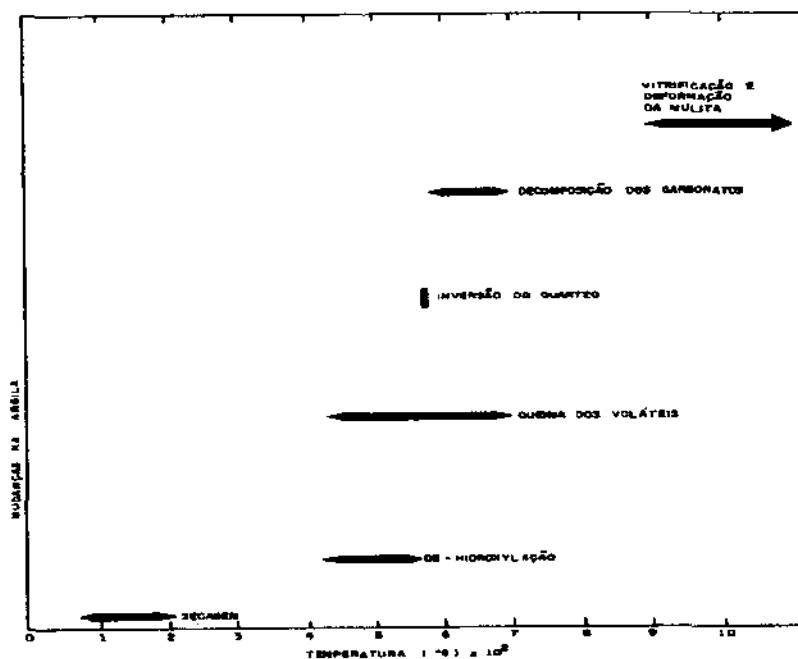


Figura 22: Representação gráfica dos processos de transformação da argila durante a queima. (ILO, 1984).

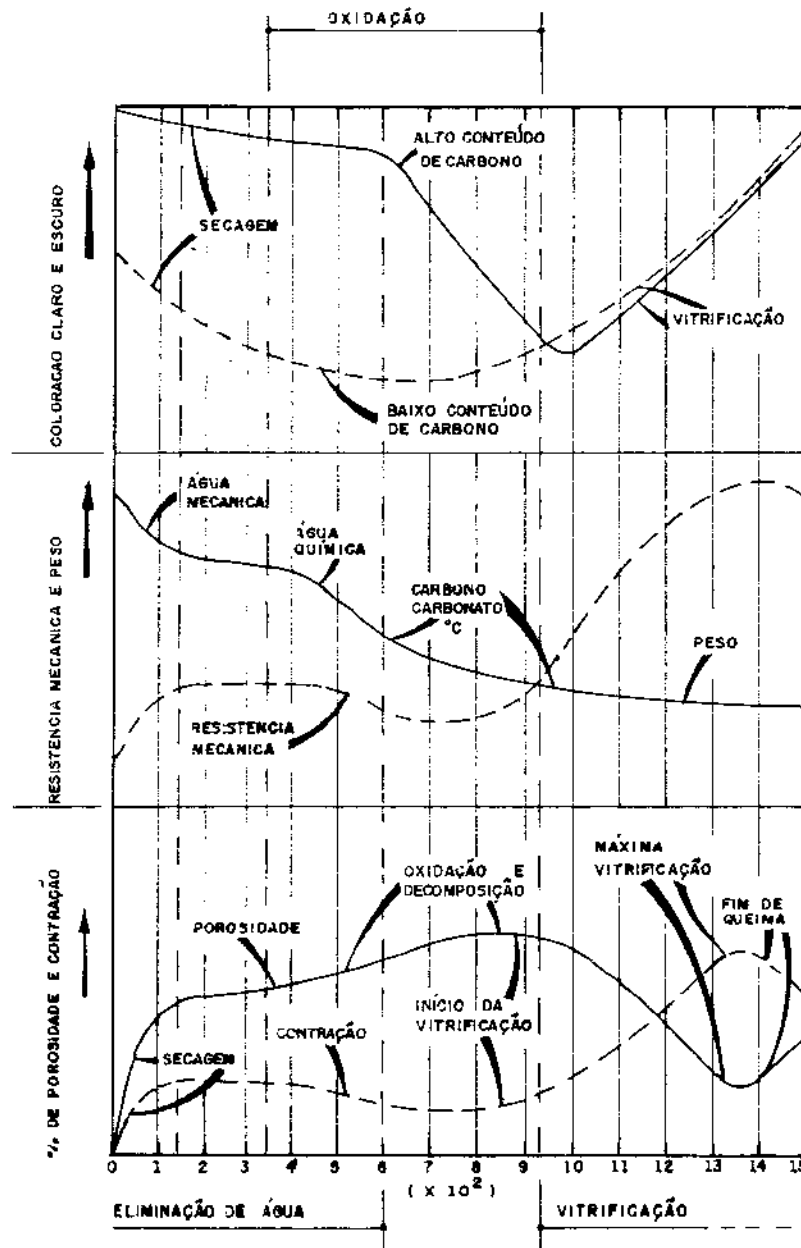


Figura 23: Representação gráfica das várias características de produtos argilosos durante a queima. (RUSSO).

A cor é influenciada em grande parte pela presença de substâncias orgânicas e carbonosas, ou impurezas contidas no material. Ao aumentar a temperatura, o material começa a clarear, até o início da vitrificação e, em seguida, escurece durante o avanço da vitrificação.

O peso dos tijolos diminui, seja por desidratação, ou pela eliminação das substâncias orgânicas, decomposição de carbonatos, sulfatos e outros sais minerais presentes na argila. A

resistência mecânica dos tijolos aumenta no início da queima, depois permanece constante até o início da vitrificação, quando aumenta rapidamente.

A porosidade e a contração variam inversamente, pois, ao aumentar uma destas propriedades, diminui a outra e vice-versa.

Após a queima os tijolos estarão prontos para serem usados se atingirem as diferentes propriedades mecânicas apresentadas na tabela 11 (ILO, 1984).

Tabela 11: Propriedades físico-mecânicas dos tijolos (ILO,1984)

Propriedades	Tijolos de Argila Cozida
Esforço de compressão úmida (MN/m ²)	10 - 60
Movimento reversivo por umidade (%)	0 - 0,02
Densidade (kg/m ³)	1 400 - 2 400
Condutividade Térmica (W/m °C)	0,7 - 1,3

IV. METODOLOGIA

4.1. Descrição física e de operação da instalação.

Trata-se de uma instalação já existente, com uma fornalha reconstruída empiricamente para a queima do bagaço de cana como combustível.

Utiliza-se um forno intermitente do tipo de chama invertida (“downdraft”). Este consiste em: 6 câmaras retangulares com teto em forma de abóbada, construídas em alvenaria de tijolos comuns, como as fornalhas, situadas nas paredes posteriores do forno.

As 6 câmaras são acopladas a uma mesma chaminé. Os fornos são interligados entre si e com a chaminé através de canais subterrâneos dotados de registros do tipo guilhotina acionados manualmente. Através destes canais os gases de exaustão de um forno na fase de queima são conduzidos a um forno na fase de pré-aquecimento. A exaustão dos gases úmidos do forno em pré-aquecimento é induzida por um ventilador centrífugo que descarrega os gases na chaminé. Durante o período de resfriamento do forno já queimado, o ar quente é conduzido também por estes canais para o secador de tijolos crus.

A operação dos 6 fornos e câmaras é realizada de tal modo que, enquanto um está queimando, o outro está na fase de pré-aquecimento, enquanto os demais estão nas fases de resfriamento, carga ou descarga, respectivamente, como mostra a figura 24.

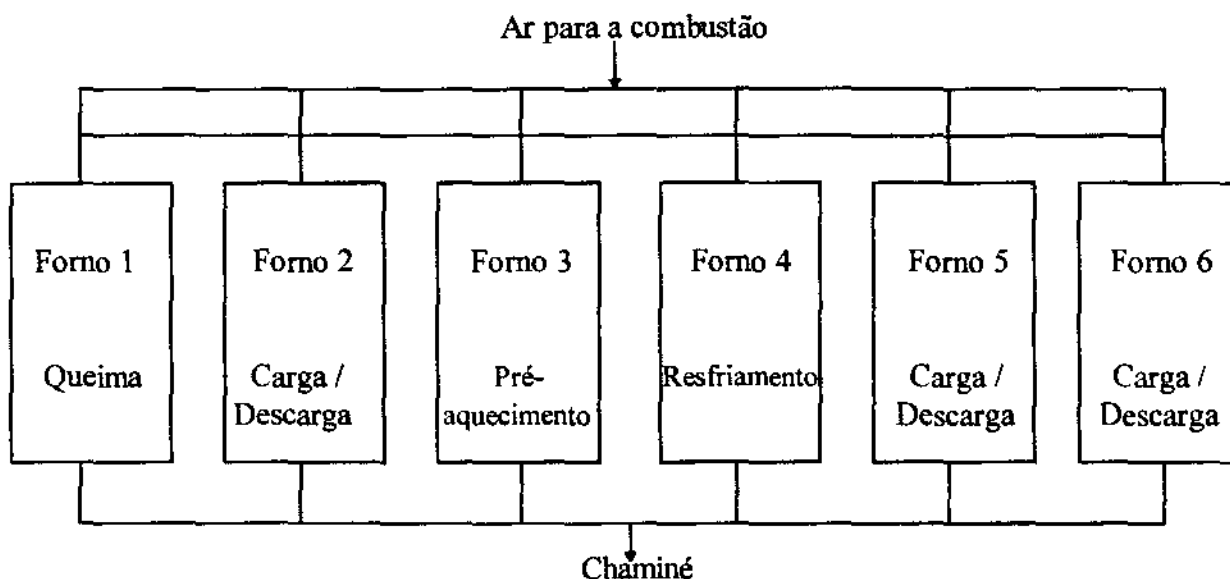


Figura 24: Esquema de operação dos seis fornos.

O bagaço usado como combustível é alimentado na fornalha por uma rosca sem-fim (figura 25). O ar necessário para a combustão e o escoamento dos gases através da carga é fornecido por um ventilador.



Figura 25: Sistema de alimentação do bagaço no forno.

Um ciclo completo é composto pelas seguintes etapas:

1. Carregamento do forno 1, onde são colocados os tijolos de maneira que permitam a passagem dos gases (figura 26). O forno é fechado com tijolos cozidos e vedado com argila (figura 27).
2. Começa a queima do forno número 4. Os gases são conduzidos para o forno 1 para pré-aquecê-lo (figura 28, observe-se o conduto ligado a este último).
3. Após aproximadamente 12 horas termina a queima do forno 4. São retirados o queimador e o exaustor de ambos os fornos, fechando as bocas das fornalhas para manter a temperatura.
4. É carregado e fechado o forno número 3.
5. Começa a queima do forno 1 que demorará aproximadamente 12 horas, recirculando os gases para o pré-aquecimento do forno 3. Esta etapa ocorre 12 horas após a terceira.

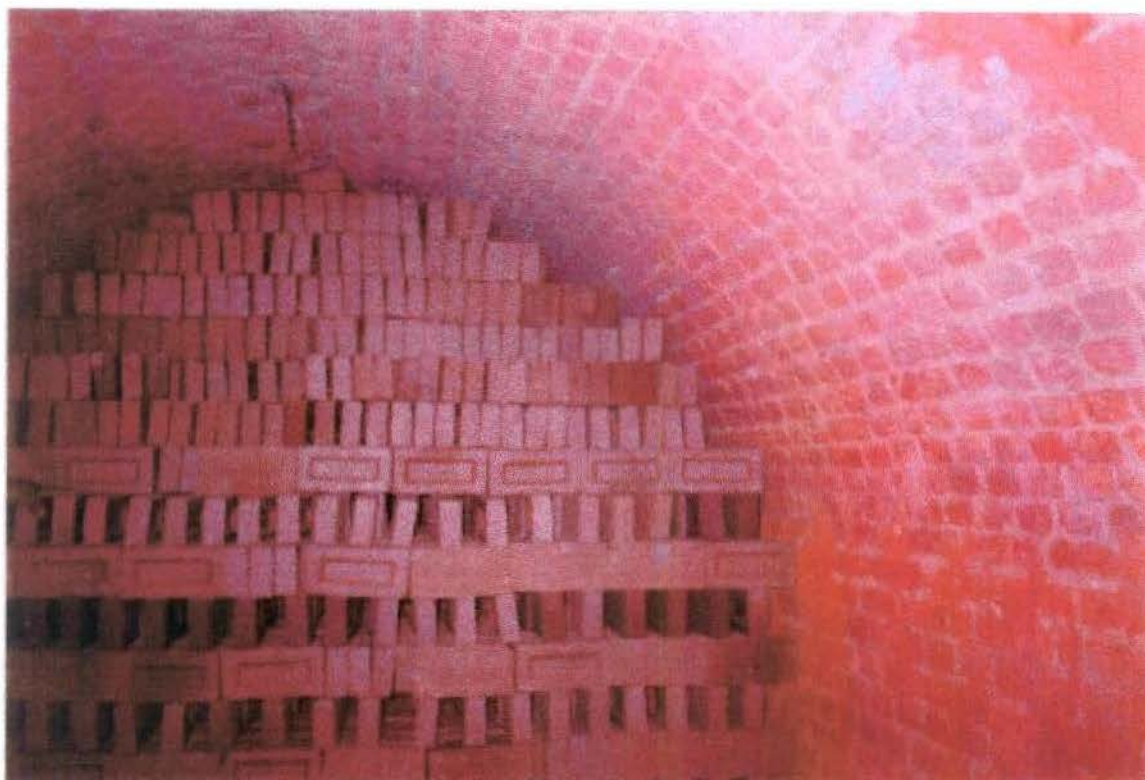


Figura 26: Disposição dos tijolos dentro do forno.

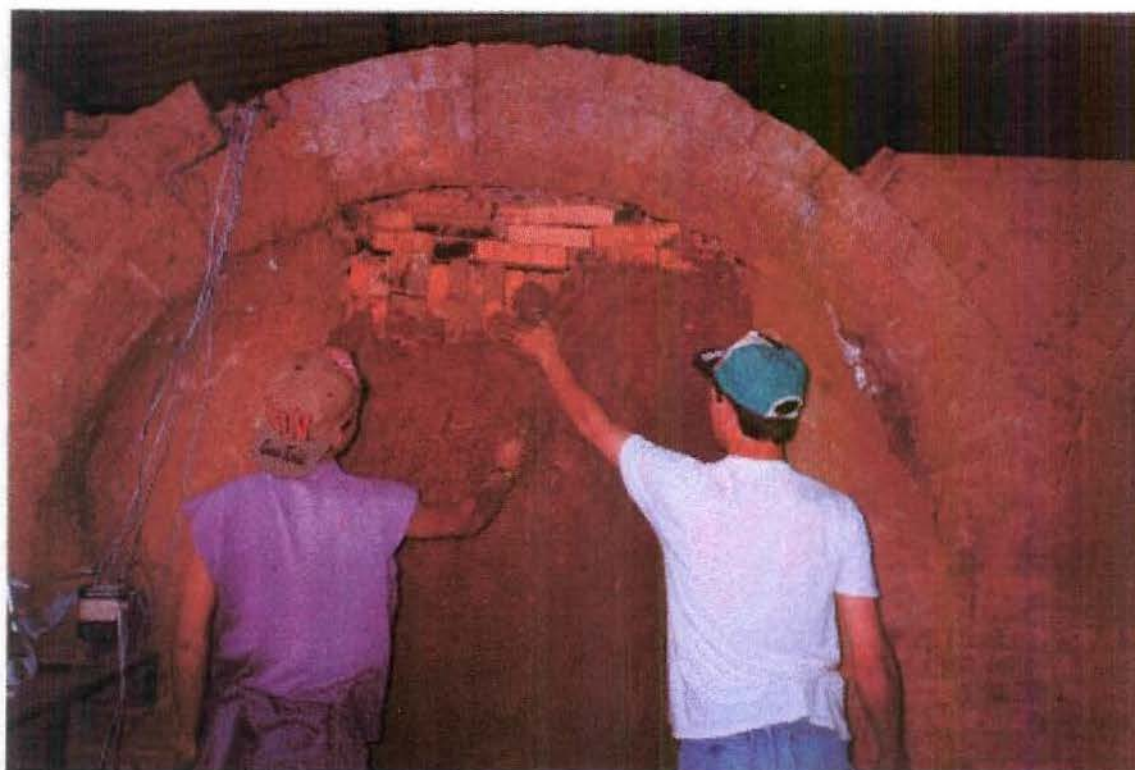


Figura 27: Vedação do forno com argila.

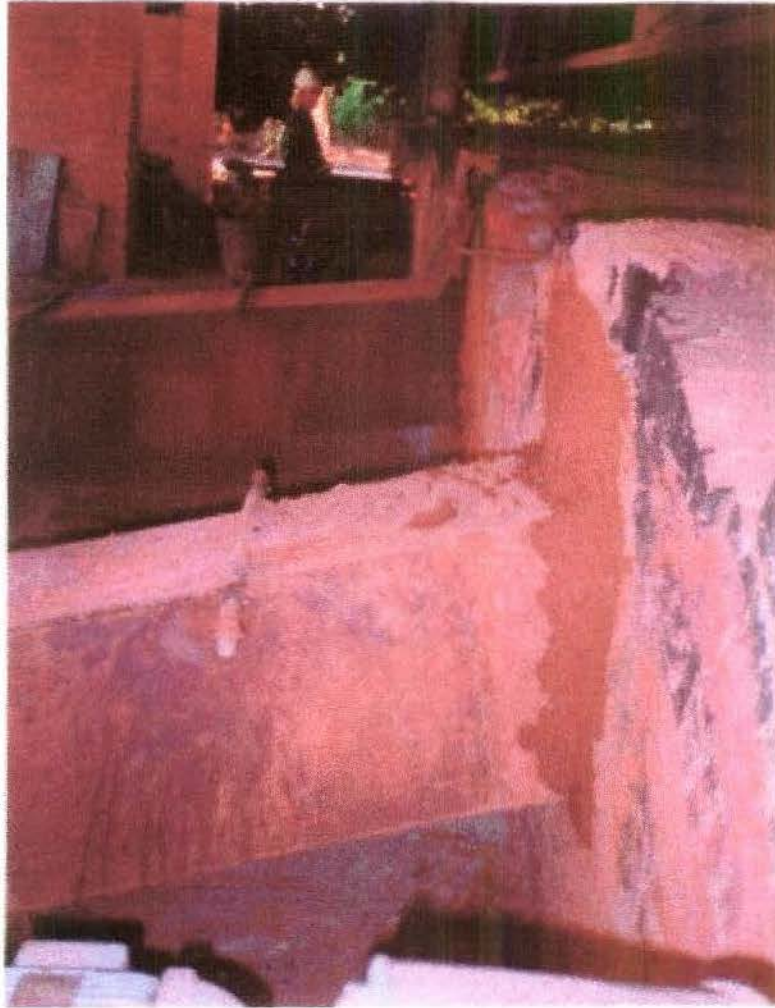


Figura 28: Começa a queima no forno 4 e os gases são recirculados para o forno 1.

6. Passadas 48 horas começa o período de resfriamento. É ligado ao forno 1 um ventilador de tiro induzido que leva o ar, ainda quente dentro do forno, até o secador, aproveitando este calor para secar os tijolos que serão cozidos posteriormente. Este processo demora mais 12 horas, a partir das quais será descarregado o forno com os tijolos prontos.

4.2.- Levantamentos realizados na instalação.

As medições feitas foram classificadas em iniciais, antes de começar o ciclo e as que se realizaram durante o ciclo completo, que compreendem o pré-aquecimento e a queima.

4.2.1- Iniciais:

- Medição das dimensões internas do forno (volume útil);
- Determinação da espessura e composição das paredes laterais e do teto;
- Medição das dimensões e geometria da grelha;
- Análise do combustível (teor de umidade);
- Calibração dos termopares.

4.2.2- Durante um ciclo completo: pré-aquecimento e queima:

- Determinação da composição e arranjo da carga no forno;
- Medição do peso médio e umidade do tijolo no início do processo;
- Determinação do consumo de combustível mediante medições parciais ao longo do período;
- Medição das temperaturas dos gases na saída da fornalha, no interior do forno e na carga em diferentes pontos;
- Medição das temperaturas superficiais externas das paredes e do teto;
- Determinação dos teores de CO_2 , CO , O_2 (análise de gases) nas saídas dos fornos;
- Determinação do fluxo de ar para a combustão;
- Determinação dos fluxos de gases na exaustão entre os fornos e a chaminé;
- Retirada de 10 amostras de tijolos de cada ponto da carga onde foram medidas as temperaturas, submetendo-os posteriormente a ensaios de absorção de água e resistência à compressão.

Na Figura 29 aparecem representados os pontos onde foram medidas temperaturas, fluxos e teor de CO_2 , CO , O_2 . Os três termopares na carga foram colocados na altura média do forno, pois a variação maior acontece ao longo do forno e não respeito à altura deste.

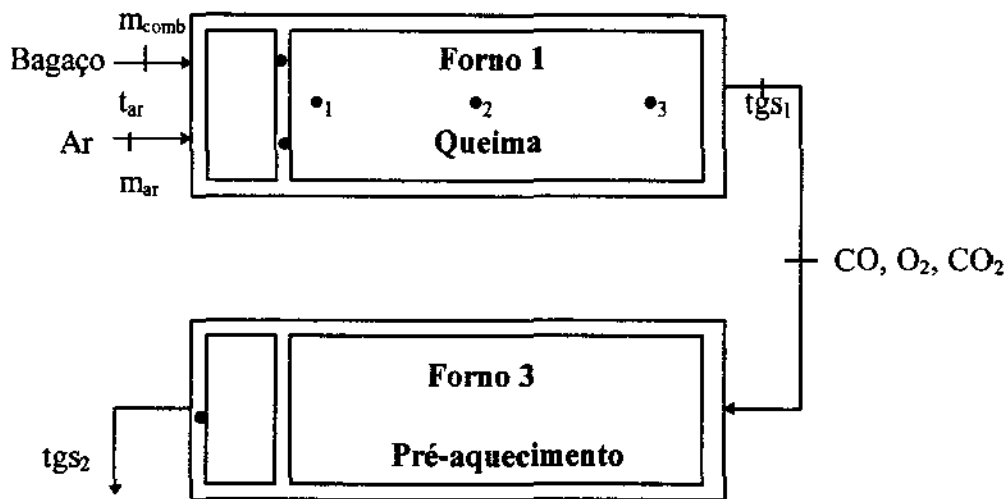


Figura 29: Pontos onde foram medidas temperaturas, fluxos de ar e combustível e realizados análises de gases. (•) Localização de termopares.

4.3.- Cálculo das perdas de calor.

Considerando que o processo estudado não é um processo contínuo, foi necessário dividir o tempo total do ciclo em intervalos menores, fazendo os cálculos das perdas para cada um desses intervalos.

4.3.1- Perdas de calor ao meio ambiente com os gases de exaustão, q_2 .

Para o cálculo desta perda determinaram-se valores médios das temperaturas dos gases de exaustão e do excesso de ar para cada intervalo.

$$q_2 = \frac{h_{ge} - \alpha * h_{af}^0}{Q_d'} * (100 - q_4) \quad [\%] \text{ (CORTEZ \& SILVA, 1994)} \quad [1]$$

onde:

$-\alpha$ é o coeficiente de excesso de ar, relação entre as quantidades de ar teórica e realmente necessária para a combustão;

$$\alpha = \frac{21}{21 - (O_2 - 0.5CO - 0.5H_2 - 2CH_4)} \quad [2]$$

$-q_4$ = Perdas por incombustão mecânica, assume-se = 2 %, valor recomendado pela literatura para o bagaço de cana;

$-h_{af}^o$ é a entalpia do ar frio, $h_{af}^o = 138,82 \text{ kJ/kg}$ para $t_{af}^o = 30 \text{ °C}$;

$-h_{ge}^o$ e h_{ge} são as entalpias teórica e real, respectivamente do gás de exaustão;

$$h_{ge} = h_{ge}^o + h_a^o (\alpha - 1) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad [3]$$

$$h_{ge}^o = V_{RO_2} (C^*t)_{RO_2} + V_{N_2}^o (C^*t)_{N_2} + V_{H_2O}^o (C^*t)_{H_2O} + (C^*t)_{cin} * \frac{A'}{100} * a_{arr} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad [4]$$

$V_{RO_2}, V_{N_2}^o, V_{H_2O}^o$ são os volumes destes gases dentro do gás de exaustão;

$(C^*t)_{RO_2}, (C^*t)_{N_2}, (C^*t)_{H_2O}, (C^*t)_{cin}$ são os produtos dos calores específicos (C) destes gases e cinzas, pela temperatura (t) do gás de exaustão;

A' é a porcentagem de cinzas na composição elementar do combustível;

a_{arr} é o arraste de cinzas no gás de exaustão, para bagaço assumiu-se 0,2.

4.3.2- Perdas de calor por combustão química incompleta, q_3 .

Para o cálculo desta perda determinam-se valores médios do teor de CO, assim como do volume de gases secos nos produtos da combustão para cada intervalo.

$$q_3 = (126,4 \text{ CO} + 358,2 \text{ CH}_4 + 108 \text{ H}_2) \frac{V_{gs}}{PCI} * 100 \quad [\%] \quad [5]$$

(CORTEZ & SILVA, 1994)

onde: CO, CH₄ e H₂ são os teores destes gases nos produtos da combustão; CH₄ = H₂ = 0

V_{gs} é o volume de gases secos,

$$V_{gs} = V_{RO_2} + V_{N_2}^o + (\alpha - 1) * V_a^o \quad [\text{m}^3] \quad [6]$$

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} = 0,01866 (C' + 0,357 S'), \quad \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad [7]$$

$$V_{N_2}^o = 0,79 V_a^o + 0,008 N', \quad \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad [8]$$

V_a^o = Volume teórico de ar para a combustão completa de 1 kg de bagaço.

$$V_a^o = 0,0889 (C' + 0,375 S') + 0,265 H' - 0,0333 O', \quad \left[\frac{m^3}{kg} \right] \quad [9]$$

Os valores de C' , O' , H' , N' e S' , são expressos em %.

4.4.- Avaliação energética do forno intermitente.

O balanço de massa e energia consiste na aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica ao processo considerado, e estabelecerá a relação entre os fluxos de energia que atravessam o volume de controle, e a variação da energia no interior do volume de controle escolhido (figura 30).

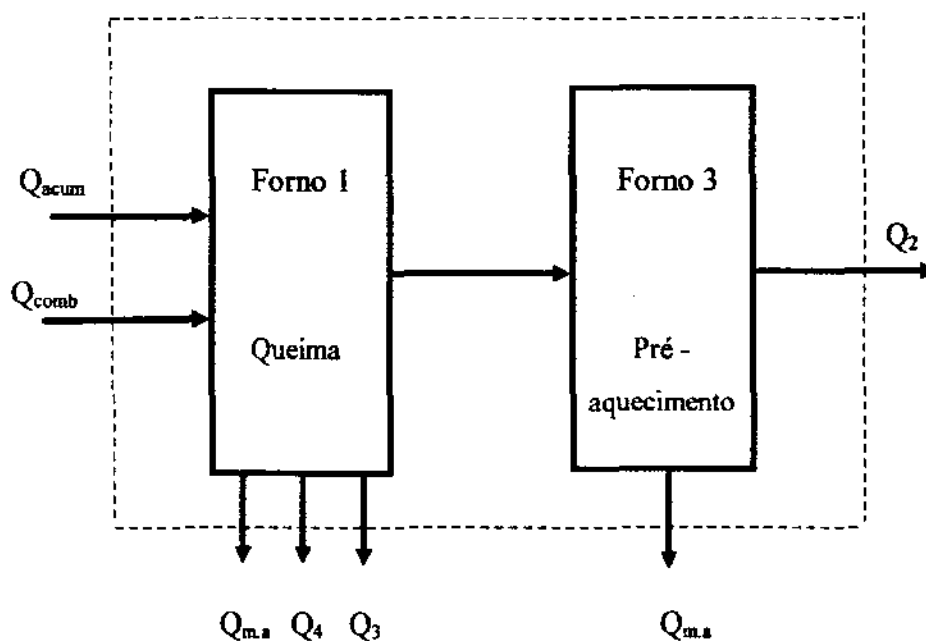


Figura 30: Volume de controle dos processos de pré-aquecimento e queima.

O balanço geral é calculado pela seguinte expressão:

$$Q_{comb} = Q_{carg} + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_{evap} + \Delta Q \quad [10]$$

onde:

Q_{comb} = Quantidade de calor introduzido ao forno com o combustível;

$$Q_{comb} = \sum (m_{comb,i} * PCI) \quad [kJ] \quad [11]$$

Q_{carg} = Quantidade de calor aproveitada pela carga para se cocer;

$$Q_{carg} = \sum_{i=1}^3 Q_{carg,i} = \sum_{i=1}^3 [m_{carg,i} * C_p * (t_f - t_i)] \quad [kJ] \quad [12]$$

C_p = calor específico do tijolo = 1,088 kJ / kg °C, (FINEP, 1980)

$$m_{carg,i} = m_{tijolo} * \frac{1}{3} N^o \text{ de tijolos} \quad [kg]$$

A divisão do número total de tijolos no forno em três partes iguais, é devido a que a distribuição de temperaturas não é homogênea, ou seja, que a temperatura da carga varia ao longo do forno, e se tem dados desta variação ($t_f - t_i$) em três regiões, onde foram colocados os termopares, então assume-se que a variação de temperatura registrada em cada um desses pontos corresponde a $\frac{1}{3}$ da carga total.

Q_{evap} = Quantidade de calor aproveitado pela carga para evaporação da água nela contida;

$$Q_{evap} = W_{carg} * r \quad [kJ] \quad [13]$$

$$W_{carg} = \text{conteúdo de umidade da carga} = W_{tijolo} * m_{carg} \quad [kg]$$

$$r = \text{calor latente da água} = 2\,453 \text{ kJ/kg}$$

Q_2 = Calor sensível dos gases de exaustão;

$$Q_2 = \sum Q_{2,i} = \sum [q_{2,i} * Q_{comb,i}] \quad [kJ] \quad [14]$$

Q_3 = Quantidade de calor perdido por combustão química incompleta;

$$Q_3 = \sum Q_{3,i} = \sum [q_{3,i} * Q_{comb,i}] \quad [kJ] \quad [15]$$

Q_4 = Quantidade de calor perdido por combustão mecânica incompleta;

$$Q_4 = 0,02 * Q_{comb} \quad [kJ] \quad [16]$$

ΔQ = Quantidade de calor perdida ao meio ambiente;

$$\Delta Q = Q_{comb} - \Sigma Q_{carg, evap, 2, 3, 4}$$

O ΔQ vai conter as perdas ao meio ambiente por condução e os possíveis erros cometidos nos cálculos das outras quantidades de calor.

4.5.- Avaliação do desempenho da fornalha.

A avaliação do desempenho da fornalha pode-se realizar diretamente por meio da determinação das perdas relativas por combustão incompleta, ou a partir da comparação das características técnicas da operação da fornalha, com os valores recomendados pela bibliografia especializada para fornos de biomassa.

É preciso assinalar que o principal parâmetro de uma fornalha cerâmica é a temperatura de saída dos gases, a fim de garantir a qualidade do produto final.

Determinar para intervalos de tempo dados os valores médios de:

4.5.1.- Tensão térmica da superfície da grelha, Q_A (BAZZO, 1992):

$$Q_A = \frac{m_{comb} * PCI}{A}, \quad \left[\frac{kW}{m^2} \right] \quad [17]$$

onde:

m_{comb} - fluxo de combustível, kg/s

PCI - Poder Calorífico Inferior do Combustível, kJ/kg

A - área da grelha, m^2

4.5.2.- Tensão térmica volumétrica do forno, Q_v (BAZZO, 1992):

$$Q_v = \frac{m_{comb} * PCI}{V_f}, \quad \left[\frac{kW}{m^3} \right] \quad [18]$$

4.5.3.- Taxa de carregamento, Q_c (BAZZO, 1992):

$$Q_c = \frac{m_{comb}}{A}, \quad \left[\frac{kg}{m^2 s} \right] \quad [19]$$

4.6.- Instalações e Equipamentos.

Durante os testes foi utilizado um datalogger, modelo DL 4000 (Figura 31) para a leitura contínua das temperaturas, medidas por termopares tipo K (cromel - alumel) de isolamento mineral $D_{ext}=3$ mm.

As medições dos fluxos de ar e gases se realizaram com um tubo de Pitot.

Para a análise de gases de exaustão utilizou-se um analisador contínuo de gases marca Kron, modelo “Testo 33”, disponível no Laboratório de Termodinâmica do Departamento de Construções Rurais da FEAGRI na UNICAMP. Este aparelho pode ser acoplado ao computador mediante uma interface. Em alguns testes foi utilizado um analisador de gases ORSAT para verificar a análise de gases.

Para os testes de umidade e teor de cinzas do bagaço foram utilizados equipamentos do laboratório da própria usina.

Os ensaios de resistência à compressão nos tijolos fizeram-se de acordo com as normas brasileiras ABNT NBR 6460/83 “Tijolo Maciço Cerâmico para Alvenaria. Verificação da Resistência à Compressão” e a NBR 7170/83 “Tijolo Maciço Cerâmico para Alvenaria. Especificação”. Estes ensaios foram realizados na Máquina Universal de Ensaio marca WPN, modelo EUS20 do Departamento de Máquinas Agrícolas da FEAGRI.



V. MEDIÇÕES E RESULTADOS.

Os dados apresentados neste capítulo representam uma média dos dados obtidos nos testes com bagaço de cana. Isto é possível por estarem os resultados obtidos em cada teste muito parecidos. Foram realizados no total 3 testes, dois deles com bagaço de cana na instalação descrita em 4.1, e mais um queimando lenha em outra instalação localizada no município de Vinhedo, SP, a título de comparação. A quantidade limitada de testes deve-se a várias causas entre as quais, a disponibilidade temporária do bagaço de cana, a extensa duração dos testes que exigem a permanência durante quatro ou cinco dias no local, e falhas imprevistas na instrumentação. Porém os resultados obtidos permitiram chegar a conclusões sobre o desempenho técnico e econômico da utilização do bagaço em fornos cerâmicos. Os resultados destes testes podem-se ver nos apêndices 1 e 2.

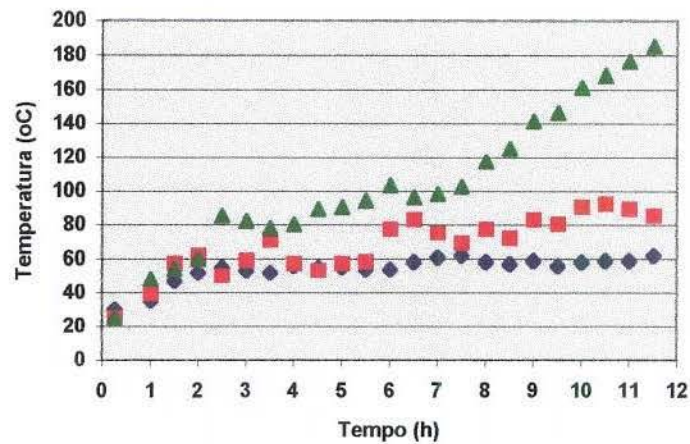
5.1.- Medições Realizadas.

Tijolos.

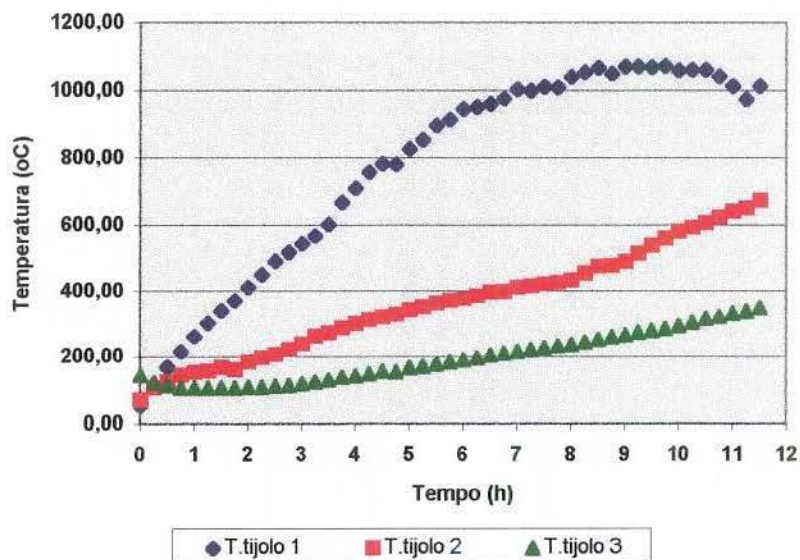
A temperatura dos tijolos foi monitorada durante o ciclo todo, desde o começo do pré-aquecimento do forno até o fim da queima. Os termopares (3) foram distribuídos em diferentes zonas do forno e em diferentes alturas como se mostrou na figura 29.

Considerando a disponibilidade limitada de instrumentação, não foram monitoradas as temperaturas dos tijolos dentro do forno 3, ou seja, aquele que foi pré-aquecido, no lugar foram assumidas as temperaturas do forno 1 durante o processo de pré-aquecimento.

Na figura 32 aparece o comportamento médio da temperatura dos tijolos durante todo o ciclo nos diferentes testes. Em 32.a, pode-se notar que a temperatura dos tijolos na zona 3 é superior à zona 1, isto é devido ao fato dos gases fazerem, durante o pré-aquecimento o percurso inverso, ou seja, chegam pelo canal de saída, entrando em contato com esta zona quando tem a maior temperatura, e com as zonas 1 e 2 após ter transferido calor a toda a carga, e saindo pela chaminé. Porém, após duas horas do começo da queima (fig. 32.b), a temperatura dos tijolos das zonas 1 e 2 superam a da zona 3 que vai manter-se inferior aos 600 °C no fim do período, temperatura menor do que a recomendada para uma boa cocção.



a)



b)

Figura 32: Comportamento da temperatura da carga: a) durante o pré-aquecimento; b) no processo de queima.

A diferença entre as temperaturas no final do gráfico 32.a. e início do gráfico 32.b. deve-se ao intervalo de tempo durante a troca do exaustor pelo alimentador, quando o forno se mantém aberto, perdendo calor.

A temperatura da carga no ponto 3 vê-se afetada pela acumulação de partículas de bagaço nos condutos para a circulação dos gases, entupindo estes e impedindo que os gases

quentes cheguem rapidamente até esta zona. Recomenda-se, portanto, aumentar o espaço entre os tijolos, aumentando os condutos para a passagem dos gases, embora em detrimento da quantidade de tijolos a colocar dentro do forno.

Gases.

Foram medidas também as temperaturas dos gases da combustão em diferentes pontos: na saída da fornalha e entrada do forno (Tge), na saída do forno 1 (Tgs) e na saída do forno 3 durante o pré-aquecimento (Tgs2). A figura 33 apresenta os resultados destas medições. Pode-se observar que a temperatura na entrada do forno sobe rapidamente até 800°C, e a partir de então vai aumentando lentamente até 1100 °C.

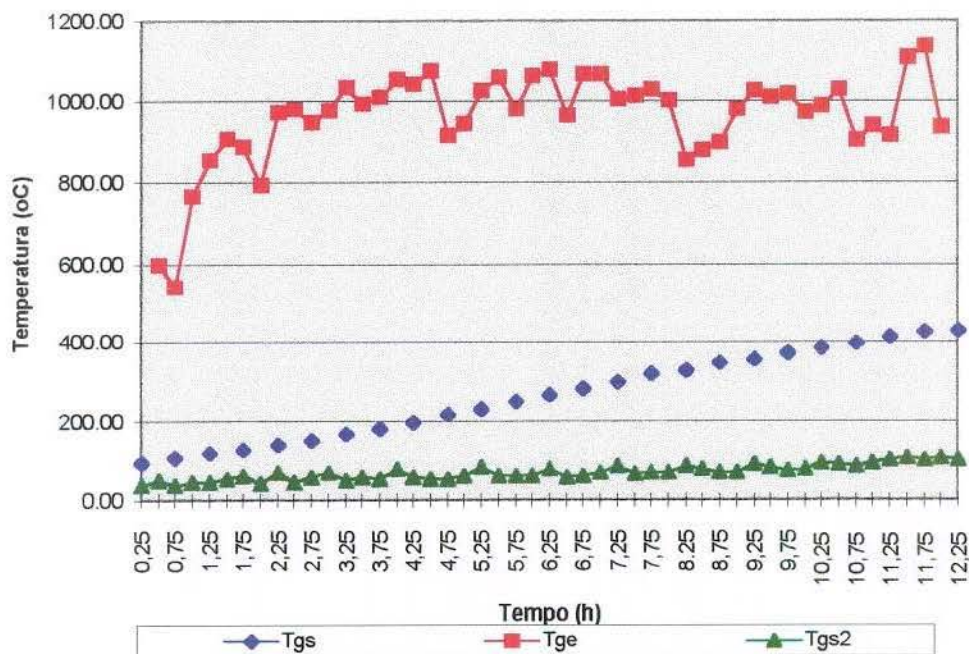


Figura 33: Temperatura dos gases de combustão durante a queima no forno 1 e pré-aquecimento do forno 3. Tgs - temperatura dos gases na saída do forno 1; Tgs2 - temperatura dos gases na saída do forno 3; Tge - temperatura dos gases na entrada do forno 1 (saída da fornalha).

A temperatura dos gases na saída do forno 1 sobe praticamente de forma linear até aproximadamente 400 °C. A diferença nas curvas das temperaturas de saída dos gases no forno 1 e no forno 3, representam o calor recuperado com o pré-aquecimento deste último.

As temperaturas, tanto dos gases como dos tijolos foram medidas de 15 em 15 minutos, porém a composição dos gases de exaustão, na saída para a chaminé, foi obtida através de amostras tomadas cada 30 minutos. Os resultados destas análises são apresentados na figura34.

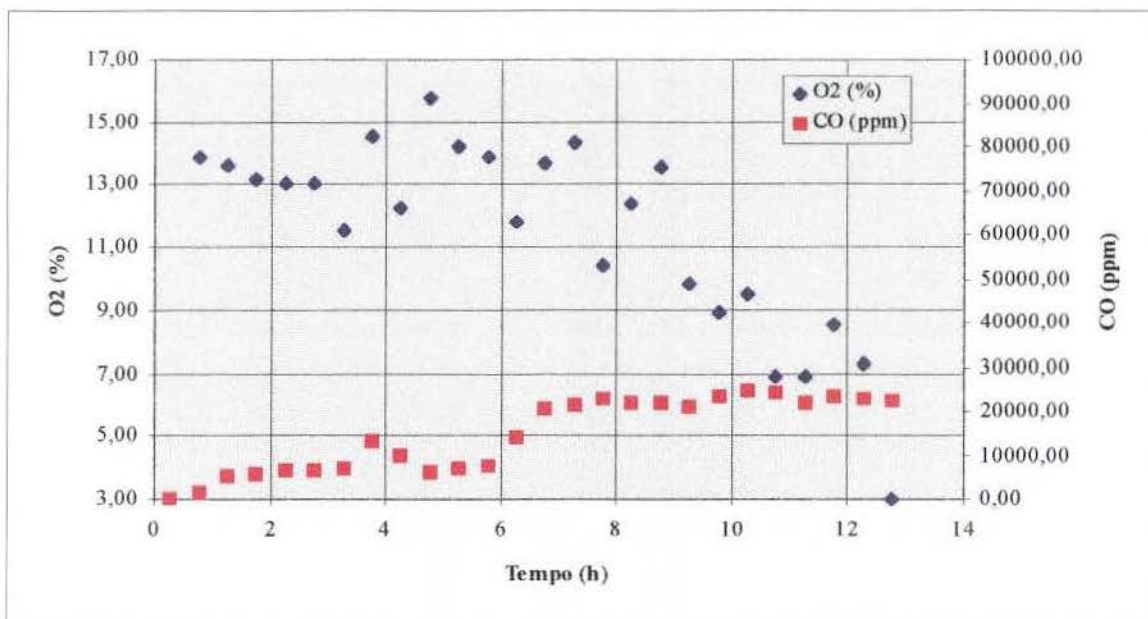


Figura 34: Concentrações de O₂ e CO nos gases da combustão à saída do forno, em %.

A porcentagem de oxigênio cai constantemente desde 16-14 % no início dos testes até menos de 6 % ao final. Os valores de CO sobem durante a queima, mas mantem-se dentro de um intervalo admissível para fornos deste tipo (0,00 - 25 000 ppm).

O coeficiente de excesso de ar (α), apresentou valores considerados bons, e foi diminuindo à medida que o processo avançava e a temperatura ia aumentando, chegando a ter no final valores quase estequiométricos. Os resultados são representados na figura 35.

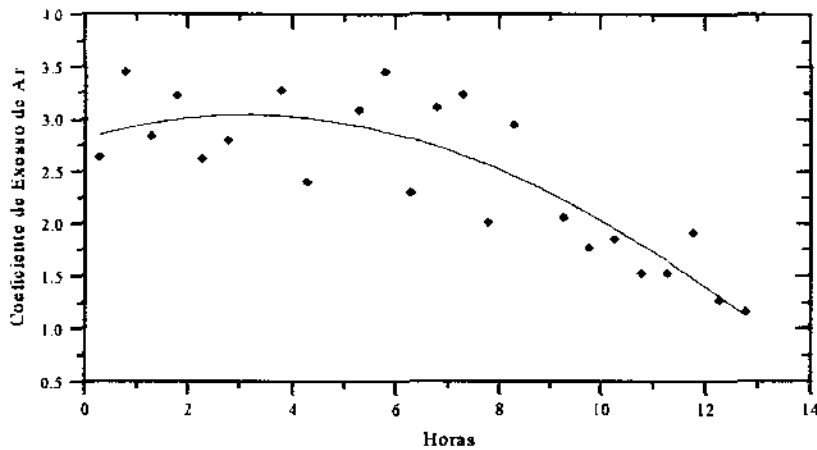


Figura 34: Coeficiente de excesso de ar durante o processo de queima.

Observa-se aqui, pelos resultados das figuras 34 e 35, um melhor controle do ar, do que no teste realizado no forno à lenha, devido ao fato de que o bagaço, na rosca de alimentação, obstrue a fornalha evitando o ar em excesso.

O consumo de bagaço durante a queima foi dividido em intervalos de meia hora, onde foram somados a quantidade de cestos fornecidos em cada intervalo. Ao final foi pesado um cesto (9,5 kg líquido) e calculada a quantidade de bagaço, em peso, em cada intervalo e no total (3 763,2 kg). O resultado destas somas mostra-se na figura 36 e é equivalente a 0,206 t de bagaço / t de tijolo.

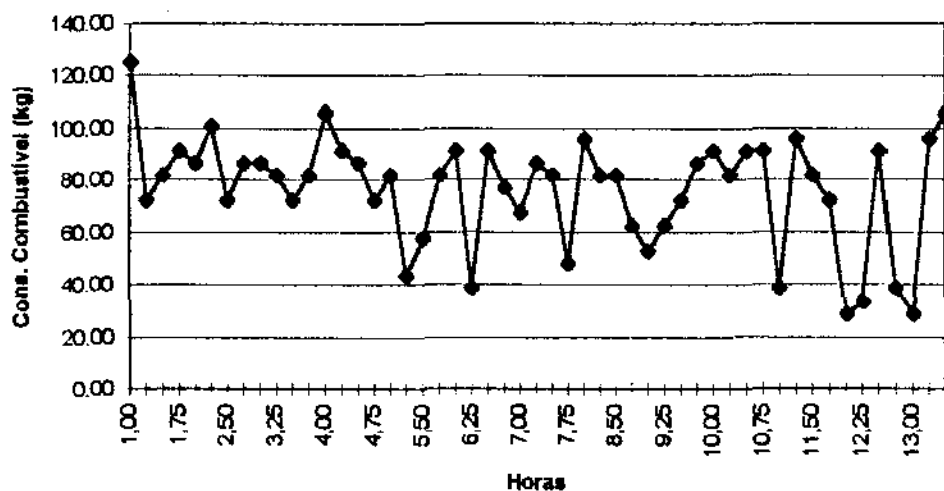


Figura 35: Consumo de combustível (bagaço), em kg.

5.2.- Cálculo das perdas.

De posse dos dados, passou-se a determinar o balanço energético do forno, seguindo a metodologia proposta, para intervalos de meia hora.

5.2.1.- Perdas com os gases de exaustão.

Para determinar as perdas de calor com os gases de exaustão (q_2), considera-se o percurso todo dos gases, ou seja, a temperatura dos gases usada para os cálculos é aquela obtida na saída do forno número 3. Os resultados aparecem na figura 37. Estas perdas geralmente são as mais significativas num processo de combustão, porém, com a recuperação do calor dos gases para o pré-aquecimento do outro forno, a quantidade de calor perdida em relação com o calor total disponível (Q_2) situa-se na faixa de 4 %.

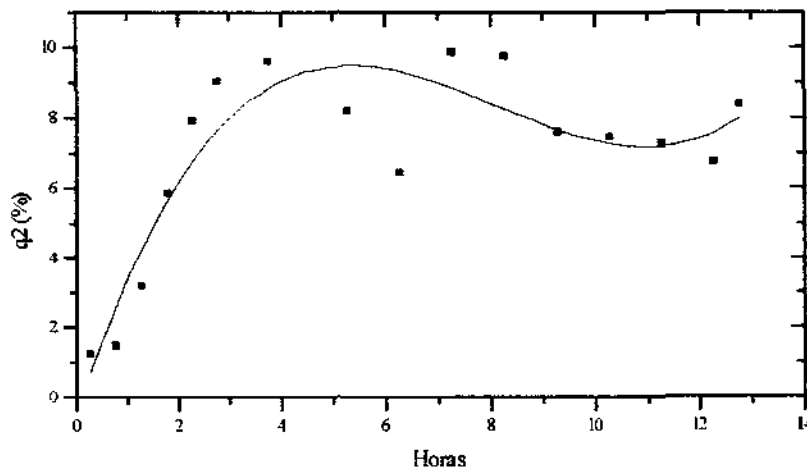


Figura 37: Perdas com o gás de exaustão (q_2) na saída do forno em pré-aquecimento, em %.

5.2.2.- Perdas por combustão química incompleta.

As perdas por incombustão química (Q_3), são equivalentes ao 5 % do calor disponível no forno. A figura 38 representa a evolução de q_3 durante o período de queima do forno.

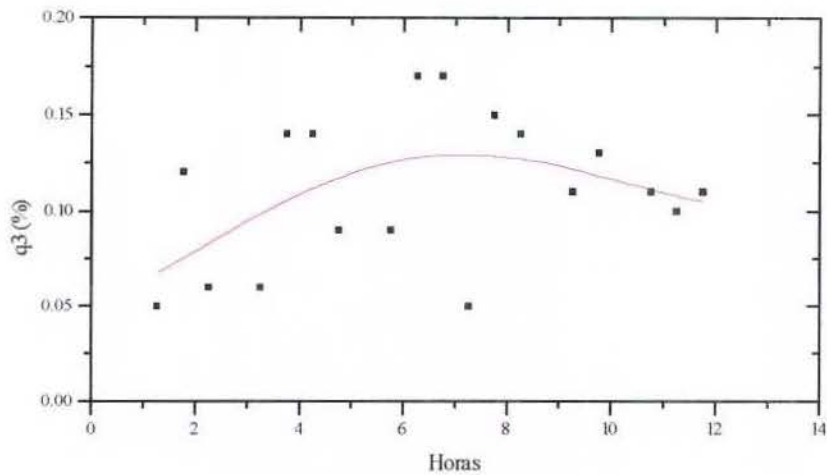


Figura 38: Perdas por combustão química incompleta (q_3), em %.

5.3.- Resultados:

5.3.1.- Balanço de energia.

O balanço de energia do forno, determinado pela Primeira Lei da Termodinâmica através da equação [10], é representado na figura 39, expresso em porcentagem, e os resultados parciais e totais de cada uma das quantidades de calor envolvidas, são apresentados no apêndice 1.

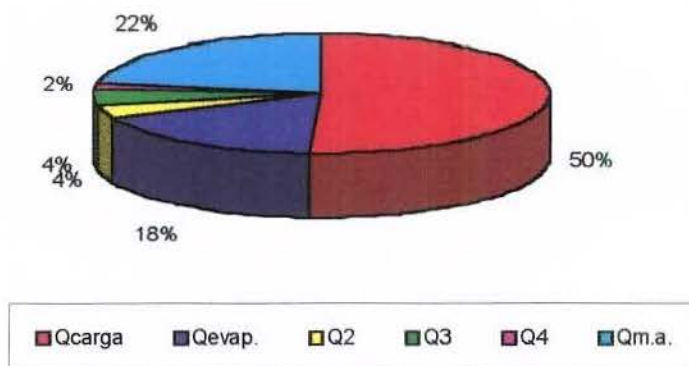


Figura 39: Resultados das quantidades de calor aproveitadas ou perdidas durante todo o processo.

Na figura 39 o $Q_{m.a.}$ representa a soma da quantidade de calor perdida ao meio ambiente mais os possíveis erros cometidos no cálculo dos outros itens.

Se for considerado como calor útil a soma de aquelas quantidades de calor que foram aproveitadas pela carga de ambos fornos (pré-aquecimento e queima) para evaporar a umidade inicial ($Q_{evap.}$) e para se queimar ($Q_{carg.}$), tem-se então um 68 % de aproveitamento do calor total introduzido no forno com o combustível, ou seja, tem-se 68 % de eficiência.

5.3.2.- Balanço econômico

O balanço econômico do forno avaliado neste trabalho não limitou-se ao bagaço de cana. Com o objetivo de comparação mostrou-se também para outras biomassas como lenha e cavaco de madeira (pinus e eucalipto), que em certas ocasiões também são usadas nesta olaria.

Para a elaboração deste balanço considerou-se o preço dos combustíveis praticados na região, inclusive para o bagaço de cana-de-açúcar, embora não precisem comprar, pois é proveniente da destilaria da própria fazenda.

A tabela 12 recolhe os dados e resultados do balanço. Todos os cálculos são expressos em US\$ por milheiro de tijolos.

Tabela 12: Balanço econômico do forno para diferentes biomassas, em US\$ / 1000 tijolos.

US \$ 1000 tijolos	Bagaço de cana	Cavaco		Lenha
		Pinus	Eucaliptos	
Combustível	7,00	15,82	18,70	16,00
Energia elétrica	6,00	6,00	6,00	6,00
Mão-de-obra	23,00	23,00	23,00	23,00
Barro	15,00	15,00	15,00	15,00
Manutenção e Administração	6,00	6,00	6,00	6,00
Preço do tijolo	66,00	66,00	66,00	66,00
Lucro	9,00	0,18	- 2,70	0,00

Segundo os dados da tabela 12, a combustão do bagaço de cana resulta a mais econômica dentre as opções da olaria, pois o lucro obtido com esse combustível é de US\$ 9.00 / 1000 tijolos, enquanto que com os outros é menor que US\$ 1.00 / 1000 tijolos, e ocorrendo até perdas caso seja usado o cavaco de eucaliptos.

5.3.3.- Propriedades mecânicas dos tijolos

Após cada teste térmico do forno 10 tijolos foram retirados, segundo indicado na metodologia, daqueles pontos onde foram registradas as temperaturas, com o objetivo de analisar a resistência a compressão e absorção de água. A tabela 13 mostra os resultados dos ensaios.

Tabela 13: Resultados dos ensaios físico-mecânicos dos tijolos coletados nos três pontos onde se registraram as temperaturas.

	Ponto 1*	Ponto 2*	Ponto 3*
Dimensões (mm)	208 x 101 x 44	213 x 104 x 46	214 x 104 x 46
Peso (kg)	1,57	1,65	1,64
Absorção de Água	14,47	14,53	16,59
Resistência à Compressão	-	6,01	5,67

(*) Posição dos termopares dentro da carga na figura 29, pag. 41.

No ponto número 1, ou seja na saída da fornalha, não foi possível fazer o ensaio à compressão pois não se conseguiu cortar as amostras para confeccionar os corpos de provas. Isto deveu-se ao fato de que os tijolos dessa zona encontraram-se em contacto direto com o fogo, ficando muito frágeis (quebradiços). O tijolo queimado no ponto 1 é mais difícil de trabalhar, pois não pode ser usado em lugares onde precise ser cortado, além de apresentar dimensões menores e ter uma coloração mais forte, o que faz que seja menos comercial.

Na tabela 13 pode-se ver que os tijolos queimados com bagaço de cana no forno estudado, apresentam níveis de resistência à compressão e absorção de água admissíveis para seu uso, embora a resistência à compressão seja muito superior à recomendada nas normas. Isto leva a considerar que o tempo de queima está sendo muito superior ao necessário. Uma diminuição do tempo de queima resultaria numa economia de combustível.

VI. CONCLUSÕES.

1. O forno avaliado apresenta uma elevada eficiência energética (68 %) em comparação com fornos deste tipo e usando biomassa como combustível, devido à recuperação do calor dos gases de exaustão para o pré-aquecimento da carga e do forno.
2. O aproveitamento dos gases para pré-aquecer outro forno resulta em valores muito baixos das perdas com os gases de exaustão ($Q_2 = 4 \%$), sendo estas perdas as maiores em fornos deste tipo onde não recuperam-se os gases, como na cerâmica Nossa Sra. Auxiliadora (Apêndice II).
3. O controle do excesso de ar é mantido durante o ciclo todo, refletindo-se isto nos teores de oxigênio nos gases de exaustão e no coeficiente de excesso de ar, que mantêm-se em níveis aceitáveis.
4. Outra vantagem deste forno é que permite a combustão do bagaço de cana-de-açúcar durante todo o ciclo, o que o diferencia das experiências anteriores onde era também usada a lenha ou o petróleo na fase de aquecimento.
5. O bagaço usado no forno vem diretamente da moagem (50 % de umidade b.u) e não precisa ser secado o moído, o que faz dele um energético mais econômico do que quando foi usado nas experiências anteriores, onde era submetido a estes tratamentos.
6. Os parâmetros construtivos do forno permitem a manutenção da temperatura da carga no mesmo nível que o forno à lenha avaliado e os referidos na revisão bibliográfica operando com bagaço e lenha.
7. Economicamente o bagaço de cana-de-açúcar mostra ser o combustível com maior vantagem, comparado com outras biomassas utilizadas (lenha e cavaco de pinus ou eucaliptos).

VII. RECOMENDAÇÕES

Para melhor desempenho recomenda-se:

- Diminuir o tempo de queima, considerando o elevado valor de resistência à compressão, resultando em uma redução do consumo de combustível.
- Aumentar o espaço entre os tijolos para a passagem dos gases, embora em detrimento do número de tijolos, para impedir a obstrução com voláteis, coisa que retarda o alcance da temperatura ótima nos pontos mais afastados da fornalha, e aumenta o tempo de queima.
- Começar a queima imediatamente depois do pré-aquecimento, com o objetivo de diminuir as perdas ao meio ambiente durante o intervalo.

VIII. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABC), "Anuário Brasileiro de Cerâmica 1994", S.P., 1994.
2. BAZZO, E., "Geração de Vapor". Editora da UFSC, Florianópolis, SC, 1992.
3. BENDER, W., HÄNDLE, F., "Brick and Tile Making. Procedures and Operating Practice in the Heavy Clay Industries". Bauverlag GMBH. Berlin, s/ano de referência.
4. BEZZON, G., "Sínteses de novos combustíveis sólidos a partir de resíduos agroflorestais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro", Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, S.P. 1994.
5. CORTEZ, L.A.B., SILVA, E., "Tecnologias de Conversão Energética da Biomassa", Apostila, UNICAMP, 1994.
6. CUNDY, V.A., MAPLES, D., TANZIN, C., "Combustion of Bagasse Use of and Agricultural Derived Waste", Fuel, Vol. 62, pp. 775-780, 1983.
7. DON, C.E., "Calorific Values of South African Bagasse", Proceeding of the Annual Congress of the South African Sugar Technologists Association. pp. 169-173. Mount Edgecombe. 1969.
8. DI CESARE, G., ZANI, A., BARBIERI, U., "L'industrie Italiana dei Laterizi: risultanze e considerazioni sulle esperienze nazionali di conservazione dell'energia e di diversificazione delle fonti primarie", L'industria Italiana dei Laterizi, N° 2, pp. 77- 79. 1986.
9. GIORDANI, F., FRINGUELLI, R., ZANI, A., "Utilizzo della farina di legno nella cottura dei laterizi", L'industria Italiana dei Laterizi, N° 3, pp.103 - 109. 1986.
10. GIORDANI, F., ZANI, A., "Utilizzo della sansa come combustibile parzialmente sostitutivo nella cottura dei laterizi", L'industria Italiana dei Laterizi, N° 1, pp.11-20. 1988.
11. HAREL, P., BAGUANT, J., "Bagasse Combustion", International Sugar Journal, Vol. 94, N° 1117, pp 11 - 18, 1992.
12. HELLWING, M., "Basic of the Combustion of Wood and Straw", Proceedings of the 3th Energy from Biomass Conference, pp. 793 - 798, 1985.
13. HORST, B., "Bagasse Steam Generator. Experiences and trends", Mitteilungen aus dem Kraftwerk Anlagenbau der DDR, Vol. 23, N° 1, pp. 30 - 33, 1983.

14. HUGOT, E., "Manual de Engenharia Açucareira". Vol. 2, 1001 p., São Paulo, 1972.
15. ILO-UNIDO, "Small-scale brickmaking", Technology Series, technical Memorandum No 6, International Labour Office, Geneva, 1984.
16. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, IPT, "Utilização do bagaço de cana como combustível na indústria de cerâmica vermelha". Relatório N° 23.124, novembro, 1985.
17. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, IPT, "Utilização do bagaço de cana como combustível na indústria de cerâmica vermelha". Relatório N° 24.853, janeiro, 1987.
18. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, IPT, "Utilização do bagaço de cana como combustível na indústria de cerâmica vermelha". Relatório N° 25.607, setembro, 1987.
19. JENKINS, B. M., "Fuel Properties for Biomass Materials", International Symposium on Application and Management of Energy in Agriculture: The Role of Biomass Fuels, IIT Delhi, India, 1990.
20. LAMB, B.W., BILGER, R.W., "Combustion of Bagasse: Literature Review", Sugar Technology Reviews, N° 4, pp. 89, 1976.
21. LÓPES DE SOUSA, J., HAYDT, M. "Consumo de Combustíveis no Setor de Cerâmica Vermelha do Estado de Rio de Janeiro", Anais do I Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Vol. II, pp. 359-374, UNICAMP, São Paulo, Brasil, 1989.
22. LYBAERT, P., MEUNIER, H., "Elaboration et validation d'un simulateur de fonctionnement des fours intermittents de cuisson céramique", L'industrie céramique, N° 9, pp. 662-627, 1989.
23. MEADE-CHEN., "Cane Sugar Handbook", John Wiley & Sons, New York, 1977.
24. MERSCHMEYER, G., "Basic Know-How for the making of Burnt Bricks and Tiles. Handbook for Village Brickmakers in Africa", MISEREOR, Aachen, 1989.
25. MESSIAS, L. S. "Recuperação de gases quentes em fornos intermitentes, Aplicação na indústria de cerâmica estrutural". Uso racional de energia na indústria, N° 12, CNP-IPT-FINEP, São Paulo, 1988.

26. MESTIVIER, B., COUDAMY, J., "L'utilisation de la biomasse pour la cuisson des produits de terre cuite", L'industrie Ceramique, N° 816, pp. 337-339. 1987.
27. MEUNIER, H., FONTAINE, L., "Simulation thermique de fours ceramiques intermittents", L'industrie céramique, N° 2, pp. 107-110, 1987.
28. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, "Balanço energético Nacional", Brasilia, 1994.
29. NETO, LYRA, "Uma experiência com bagaço de cana a granel como combustível para a queima de tijolos em forno contínuo tipo "Hoffmann" em uma cerâmica de Alagoas", Cerâmica, N°. 29, pp. 25 A., São Paulo, 1983.
30. NORSKER, H., FUYIN, Y. "Vertical Soft Brick Kiln-Testing and Demonstration Peshawar, Paquistão", Integration GmbH, 1993.
31. NORSKER, H., Comunicação pessoal, Setembro 1994.
32. NORTON, F.H., "Introdução à tecnologia cerâmica", Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1973.
33. QUEIROZ, A.B., MOTA, A.F., MARQUEZ, M.A., "Diagnóstico energético da indústria cerâmica do Estado de Pernambuco", Revista Pernambucana de Tecnologia, pp. 67-96, Setembro / Dezembro, Recife, 1982.
34. REVERTÉ, P., "La industria ladrillera", Editora Gustavo Gili, S.A., Barcelona, Espanha, s/ano de referência.
35. ROZZI, I., ZANI, A., "Esperienze nel campo dell'utilizzazione degli scarti dell'industria tessile come combustibili alternativo nei forni da laterizio", L'industria Italiana dei Laterizi, N° 3, pp. 134 - 138. 1987.
36. RUSSO, V., "Processos de secagem e queima na indústria cerâmica vermelha", Associação de Cerâmica, São Paulo, Brasil, s/ano de referência.
37. SÁNCHEZ, C.G., "Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassa em leito fluidizado", Ph.. Dr. Tese Universidade Estadual de Campinas, Campinas, S.P. 1994.
38. STUBINGTON, J.F., FENTON, H., "Combusting Characteristics of Dried and Pelletized Bagass", Combustion Science and Technology, Vol. 17, pp. 285-299, 1984.
39. SILVA, E., BEATÓN, P., "Experimental Research and Mathematical Modelling of Bagasse Pellet Combustion", International Sugar Journal, Vol. 94. N° 1125, pp. 217-218, 1991.

40. SOBRAL, J.L., BARBOSA, G.V.S. "Un modelo para determinar poder calorífico do bagaço da cana-de-açúcar", Anais do Congresso Nacional da STAB. Vol. 4, pp. 576-579, 1987.
41. UPADHIAYA, U.C., "Bagasse as a Fuel", International Sugar Journal, Vol. 93. N° 1111, pp. 132 - 137, 1991.
42. ZANI, A., "Utilizzo diretto e/o indiretto di combustibili non convenzionali nel processo di cottura dei laterizi", Procédé do Seminario Interno delle Unità Operative del Progetto Finalizzato Energetica 1983-1987. Contratto PFE No. 377, Pisa, Italia, 1986.
43. ZANI, A., TENAGLIA, A., PANIGADA, A., "Reimpiego dei fanghi dell'industria cartaria nella produzione di laterizi", Rifiuti Solidi, Vol. V, N° 1, pp. 48-59, 1991.

APÊNDICE I

Resultados dos testes com bagaço de cana

Teste 1

Tempo	Ccomb (kg)	O2 (%)	CO (ppm)	CO (%)	CO2 (%)	A
16:30	124,80	16,10	0,00	0,00	4,77	4,29
16:45	38,40					
17:00	57,60	16,60	20028,00	2,00	3,07	3,89
17:15	76,80					
17:30	67,20	13,60	4905,00	0,49	6,90	2,75
17:45	86,40					
18:00	76,80	16,40	3524,00	0,35	4,26	4,40
18:15	76,80					
18:30	86,40	13,00	6562,00	0,66	7,38	2,52
18:45	67,20					
19:00	67,20	15,00	4428,00	0,44	5,57	3,38
19:15	76,80					
19:30	96,00					
19:45	76,80	13,40	6069,00	0,61	7,03	2,66
20:00	67,20	15,10	5778,00	0,58	5,39	3,39
20:15	57,60					
20:30	86,40	12,60	17637,00	1,76	7,10	2,26
20:45	76,80					
21:00	67,20	15,00	4277,00	0,43	5,58	3,38
21:15	76,80					
21:30	76,80	14,10	5941,00	0,59	6,35	2,92
21:45	38,40					
22:00	96,00	11,20	8667,00	0,87	9,01	2,05
22:15	76,80					
22:30	67,20	12,60	5197,00	0,52	7,86	2,42
22:45	67,20					
23:00	67,20	15,70	2953,00	0,30	4,98	3,85
23:15	38,40					
23:30	76,80	15,50	2460,00	0,25	5,20	3,73
23:45	76,80					
00:00	57,60	11,80	5821,00	0,58	8,60	2,21
00:15	28,80					
00:30	9,60	16,00	2922,00	0,29	4,69	4,08
00:45	57,60					
01:00	57,60	16,20	1108,00	0,11	4,60	4,33
01:15	76,80					
01:30	76,80	13,10	1695,00	0,17	7,58	2,63
01:45	67,20					
02:00	76,80	10,50	3268,00	0,33	10,02	1,97
02:15	76,80					
02:30	48,00	10,90	3896,00	0,39	9,59	2,04
02:45	86,40					
03:00	67,20	9,20	3091,00	0,31	11,29	1,76
03:15	67,20					
03:30	57,60	9,30	2068,00	0,21	11,26	1,78
03:45	67,20					
04:00	76,80	12,90	2059,00	0,21	7,75	2,56
04:15	48,00					
04:30	57,60	7,30	6683,00	0,67	12,92	1,50
04:45	96,00					
05:00	105,60	3,00	39090,00	3,91	15,14	1,05
05:15	96,00					
05:30	76,80	7,70	7513,00	0,75	12,48	1,54
05:45	38,40					
Total	3763,20					

Vgs (m3/kg)	q3 (%)	Q3 (kJ/kg)	Tgs1	Tgs2	Tgs (oC)	Qcomb (kJ)
9,35	0,00	0,00	96,00	87,00	95,50	943823,71
			111,00	88,00		290407,30
8,48	28,38	144216,07	103,00	93,00	100,25	435610,94
			105,00	100,00		580814,59
5,98	4,91	28494,55	111,00	104,00	111,00	508212,77
			120,00	109,00		653416,42
9,59	5,65	32804,09	133,00	113,00	120,50	580814,59
			122,00	114,00		580814,59
5,49	6,02	34986,08	133,00	118,00	128,00	653416,42
			137,00	124,00		508212,77
7,36	5,45	29650,61	137,00	127,00	133,00	508212,77
			138,00	130,00		580814,59
			142,00	136,00		726018,24
5,79	5,87	31970,16	154,00	142,00	151,00	580814,59
7,40	7,14	33708,20	161,00	147,00	156,25	508212,77
			165,00	152,00		435610,94
4,93	14,52	89613,00	173,00	157,00	168,50	653416,42
			181,00	163,00		580814,59
7,37	5,27	28674,37	185,00	170,00	180,50	508212,77
			190,00	177,00		580814,59
6,36	6,31	27501,27	198,00	183,00	194,75	580814,59
			205,00	193,00		290407,30
4,47	6,47	42276,85	213,00	200,00	211,00	726018,24
			225,00	206,00		580814,59
5,28	4,59	23313,21	243,00	215,00	228,25	508212,77
			233,00	222,00		508212,77
8,41	4,15	16565,09	252,00	231,00	246,75	508212,77
			264,00	240,00		290407,30
8,14	3,35	19444,91	261,00	248,00	259,25	580814,59
			273,00	255,00		580814,59
4,82	4,69	15311,73	279,00	263,00	277,75	435610,94
			294,00	275,00		217805,47
8,90	4,35	11043,21	300,00	282,00	291,75	72601,82
			296,00	289,00		435610,94
9,43	1,75	8877,38	324,00	290,00	304,25	435610,94
			302,00	301,00		580814,59
5,73	1,62	8837,71	315,00	307,00	316,00	580814,59
			326,00	316,00		508212,77
4,29	2,34	13596,17	336,00	322,00	331,50	580814,59
			339,00	329,00		580814,59
4,44	2,89	14692,59	340,00	336,00	340,25	363009,12
			342,00	343,00		653416,42
3,82	1,97	10032,21	352,00	350,00	354,25	508212,77
			361,00	354,00		508212,77
3,87	1,34	6312,68	379,00	362,00	375,50	435610,94
			393,00	368,00		508212,77
5,58	1,92	9055,96	404,00	375,00	389,50	580814,59
			400,00	379,00		363009,12
3,25	3,63	21099,58	389,00	385,00	391,50	435610,94
			404,00	388,00		726018,24
2,28	14,91	113673,57	420,00	397,00	407,00	798620,06
			408,00	403,00		726018,24
3,34	4,19	18258,82	430,00	408,00	419,00	580814,59
						290407,30
		834.010,05				28.459.915,01

Q4 (kJ)	Tge1	Tge2	Tge (oC)	q pard'	qteto'	Tgs2(oC)
569198,30						
	397,00	405,00	401,00	8416,87	41026,06	
Qevap.(kJ)	239,00	225,00	232,00	4895,49	23447,07	
5294254,71	620,00	592,00	606,00			
	740,00	718,00	729,00	14750,28	72642,93	47,50
Qcarg1	785,00	867,00	826,00			
6203975,95	734,00	832,00	783,00	15652,15	77145,18	66,60
Qcarg2	785,00	790,00	787,50			
6475441,28	886,00	866,00	876,00	17384,98	85795,55	84,30
Qcarg3	924,00	884,00	904,00			
2847075,41	907,00	890,00	898,50	17739,65	87566,10	
	869,00	902,00	885,50			91,60
Qcarg' (kJ)	929,00	933,00	931,00	21093,82		
15526492,63	885,00	929,00	907,00		86604,94	
	974,00	998,00	986,00	19041,80	94066,53	
Qm.a'. (kJ)	937,00	935,00	936,00			95,70
177994,52	962,00	977,00	969,50	18459,12	91157,77	
	1043,00	1038,00	1040,50			
	994,00	1021,00	1007,50	18986,06	93788,30	
ΔQ	1042,00	1008,00	1025,00			
3.637.671,81	1003,00	993,00	998,00	18504,72	91385,42	97,30
	1004,00	1017,00	1010,50			
	932,00	1007,00	969,50	17597,78	86857,88	
	1028,00	994,00	1011,00			
	1040,00	1041,00	1040,50	18687,13	92295,98	94,00
	1030,00	996,00	1013,00			
	1045,00	1057,00	1051,00	18524,99	91486,59	
	1025,00	990,00	1007,50			
	897,00	924,00	910,50	15424,15	76006,97	105,70
	985,00	991,00	988,00			
	975,00	1001,00	988,00	16619,90	81976,23	
	916,00	974,00	945,00			
	698,00	675,00	686,50	10225,69	50055,84	103,30
	690,00	670,00	680,00			
	813,00	769,00	791,00	12090,24	59363,84	
	935,00	920,00	927,50			
	994,00	1004,00	999,00	16067,63	79219,24	104,20
	996,00	1023,00	1009,50			
	958,00	968,00	963,00	15023,88	74008,78	
	1022,00	1062,00	1042,00			
	974,00	1051,00	1012,50	15849,76	78131,62	103,50
	1042,00	1016,00	1029,00			
	1022,00	986,00	1004,00	15393,75	75855,21	
	1020,00	996,00	1008,00			
	1007,00	1017,00	1012,00	15125,21	74514,65	105,70
	977,00	955,00	966,00			
	1080,00	1100,00	1090,00	16422,30	80989,79	
	929,00	944,00	936,50			
	1008,00	1022,00	1015,00	14861,74	73199,39	108,40
	1114,00	1069,00	1091,50			
	1090,00	1105,00	1097,50	16219,63	79978,05	
	1104,00	1120,00	1112,00			
	1087,00	1114,00	1100,50	16037,23	79067,48	113,10
	1074,00	1132,00	1103,00			
				30300,72	147693,81	

<i>hog (kJ/kg)</i>	<i>hoa (kJ/kg)</i>	<i>hg (kJ/kg)</i>	<i>q2 (%)</i>	<i>Q2 (kJ)</i>	<i>q pard".</i>
226,40	129,09	451,90	3,12	17227,78	3512,21
329,21	186,15	961,54	8,08	49888,99	3317,65
424,48	239,03	788,19	7,70	47543,65	3110,93
463,78	260,84	1083,39	14,04	74745,28	3064,32
485,85	273,09	1139,40	14,76	83075,67	3452,42
494,46	277,87	1027,37	10,41	60458,24	4200,26
476,70	268,01	858,61	8,71	45860,89	4946,07
539,67	302,96	1368,18	14,01	66127,11	5337,21
526,75	295,79	1438,03	14,57	47612,09	6044,51
531,60	298,48	1018,13	10,58	53748,10	6517,74
527,83	296,39	836,04	8,80	44741,07	7023,39
539,67	302,96	775,73	8,28	43590,98	7693,20
554,21	311,03	708,59	7,69	36303,92	7962,74
579,51	325,07	753,61	8,24	51431,59	8424,82
				653695,99	42973,30

<i>q teto*</i>	<i>Qma* (kJ)</i>	<i>QA (MW/m2)</i>	<i>QV (MW/m3)</i>
	250363,81	0,16	0,05
		0,05	0,02
	Qma (kJ)	0,08	0,02
	428358,33	0,10	0,03
16541,95		0,09	0,03
	Qcarg1*	0,11	0,04
15570,68	1145451,27	0,10	0,03
		0,10	0,03
14538,70	Qcarg2*	0,11	0,04
	165527,64	0,09	0,03
		0,09	0,03
14306,00	Qcarg3*	0,10	0,03
	205254,27	0,13	0,04
		0,10	0,03
	Qcarg*(kJ)	0,09	0,03
16243,49	1516233,18	0,08	0,02
		0,11	0,04
	Qcarg (kJ)	0,10	0,03
	17042725,81	0,09	0,03
		0,10	0,03
19976,81		0,10	0,03
		0,05	0,02
		0,13	0,04
		0,10	0,03
23700,01		0,09	0,03
		0,09	0,03
		0,09	0,03
		0,05	0,02
25652,67		0,10	0,03
		0,10	0,03
		0,08	0,02
		0,04	0,01
29183,64		0,01	0,00
		0,08	0,02
		0,08	0,02
		0,10	0,03
31546,05		0,10	0,03
		0,09	0,03
		0,10	0,03
		0,10	0,03
34070,34		0,06	0,02
		0,11	0,04
		0,09	0,03
		0,09	0,03
37414,15		0,08	0,02
		0,09	0,03
		0,10	0,03
		0,06	0,02
38759,76		0,08	0,02
		0,13	0,04
		0,14	0,04
		0,13	0,04
41066,53		0,10	0,03
		0,05	0,02
207390,51			

Tempo	Ccomb (kg)	O2 (%)	CO (ppm)	CO (%)	CO2 (%)	A
08:00	124,80	0,00	0,00	0,00	20,43	1,00
08:15	105,60					
08:30	105,60	11,20	0,00	0,00	9,53	2,14
08:45	105,60					
09:00	105,60	-	-	-	-	-
09:15	115,20					
09:30	67,20	9,90	27786,00	2,78	9,11	1,68
09:45	96,00					
10:00	86,40	-	-	-	-	-
10:15	96,00					
10:30	76,80	11,00	0,00	0,00	9,73	2,10
10:45	86,40					
11:00	115,20	9,60	7775,00	0,78	10,62	1,78
11:15	105,60					
11:30	105,60	14,00	19981,00	2,00	5,60	2,63
11:45	86,40					
12:00	76,80	11,90	13982,00	1,40	8,00	2,14
12:15	9,60					
12:30	48,00	16,50	7406,00	0,74	3,93	4,31
12:45	86,40					
13:00	105,60	14,30	0,00	0,00	6,52	3,13
13:15	38,40					
13:30	86,40	16,60	6125,00	0,61	3,91	4,46
13:45	76,80					
14:00	67,20	11,00	39150,00	3,92	7,36	1,76
14:15	105,60					
14:30	96,00	11,70	38060,00	3,81	6,74	1,87
14:45	57,60					
15:00	115,20	13,10	7045,00	0,70	7,26	2,54
15:15	86,40					
15:30	105,60	9,00	39690,00	3,97	9,27	1,50
15:45	96,00					
16:00	96,00	8,70	40520,00	4,05	9,51	1,47
16:15	67,20					
16:30	86,40	10,90	3597,00	0,36	9,61	2,04
16:45	96,00					
17:00	105,60	6,60	40430,00	4,04	11,56	1,28
17:15	96,00					
17:30	105,60	7,30	43430,00	4,34	10,69	1,32
17:45	105,60					
18:00	28,80	8,10	5269,00	0,53	12,23	1,60
18:15	105,60					
18:30	96,00	4,60	45630,00	4,56	13,19	1,12
18:45	76,80					
19:00	0,00	4,50	41770,00	4,18	13,52	1,13
19:15	0,00					
19:30	105,60	4,20	44000,00	4,40	13,68	1,11
19:45	28,80					
20:00	0,00				20,43	1,00
Total	4041,6					

<i>V_{gs}</i> (m3/kg)	<i>q₃</i> (%)	<i>Q₃</i> (kJ/kg)	<i>T_{gs1}</i>	<i>T_{gs2}</i>	<i>T_{gs}</i> (oC)	<i>Q_{comb}</i> (kJ)	<i>Q₄</i> (kJ)
2,05	0,00	0,00	85,00	81,00	90,75	973244,06	630362,69
			106,00	91,00		823514,21	
4,60	0,00	0,00	113,00	104,00	111,00	823514,21	<i>Q_{evap.}</i> (kJ)
			118,00	109,00		823514,21	5278304,08
-	-	-	123,00	114,00	121,50	823514,21	
			131,00	118,00		898379,14	<i>Q_{carg1}</i>
3,57	16,08	102320,23	136,00	123,00	132,00	524054,50	6230383,38
			142,00	127,00		748649,28	<i>Q_{carg2}</i>
-	-	-	153,00	135,00	147,50	673784,35	4121638,24
			160,00	142,00		748649,28	<i>Q_{carg3}</i>
4,50	0,00	0,00	170,00	149,00	164,25	598919,42	1316368,18
			180,00	158,00		673784,35	
3,79	4,78	41151,37	189,00	167,00	184,00	898379,14	<i>Q_{carg'}</i> (kJ)
			204,00	176,00		823514,21	11668389,80
5,67	18,37	137550,83	212,00	184,00	202,00	823514,21	
			221,00	191,00		673784,35	<i>Q_{m.a'}</i> (kJ)
4,60	10,42	35110,54	235,00	203,00	224,25	598919,42	321610,55
			247,00	212,00		74864,93	
9,43	11,32	59326,48	265,00	223,00	247,50	374324,64	
			270,00	232,00		673784,35	ΔQ
6,81	0,00	0,00	279,00	239,00	263,50	823514,21	8537794,80
			289,00	247,00		299459,71	
9,77	9,70	61694,37	300,00	257,00	282,25	673784,35	
			308,00	264,00		598919,42	
3,74	23,71	159771,45	318,00	271,00	300,00	524054,50	
			329,00	282,00		823514,21	
4,00	24,68	147801,37	337,00	289,00	318,50	748649,28	
			349,00	299,00		449189,57	
5,49	6,27	49312,34	358,00	307,00	336,25	898379,14	
			366,00	314,00		673784,35	
3,17	20,39	160290,37	377,00	323,00	353,50	823514,21	
			383,00	331,00		748649,28	
3,09	20,29	129139,21	389,00	337,00	363,00	748649,28	
						524054,50	
4,38	2,55	18142,74	409,00	352,00	384,00	673784,35	
			413,00	362,00		748649,28	
2,67	17,52	137702,38	419,00	370,00	394,50	823514,21	
						748649,28	
2,77	19,51	160687,61	434,00	383,00	409,50	823514,21	
			434,00	387,00		823514,21	
3,38	2,89	15120,08	451,00	394,00	422,50	224594,78	
						823514,21	
2,33	17,22	116035,09	452,00	409,00	432,50	748649,28	
			454,00	415,00		598919,42	
2,34	15,85	0,00	468,00	419,00	445,00	0,00	
			466,00	427,00		0,00	
2,29	16,31	85456,52	470,00	436,00	458,25	823514,21	
			487,00	440,00		224594,78	
2,05	0,00	0,00	490,00	443,00	466,50	0,00	
		1616612,99				31518134,7	

<i>Tge1</i>	<i>Tge2</i>	<i>Tge (oC)</i>	<i>q pard'</i>	<i>qteto'</i>	<i>Tgs2 (oC)</i>	<i>hog (kJ/kg)</i>	<i>hoa (kJ/kg)</i>
79,00	81,00		16315,90	80458,62	37,00	177,44	99,66
783,00	789,00	786,00			47,00	234,26	130,12
844,00	862,00	853,00	18631,39	85188,51	36,00	171,76	96,61
925,00	916,00	920,50			46,00	228,58	127,07
985,00	976,00	980,50	19766,34	97025,87	42,00	205,85	114,89
1003,00	971,00	987,00			53,00	268,35	148,40
998,00	988,00	993,00	15794,02	97228,21	55,00	279,72	154,49
812,00	791,00	801,50			39,00	188,81	105,75
1071,00	1072,00	1071,50	20668,22	103602,18	53,00	268,35	148,40
1076,00	1039,00	1057,50			44,00	217,22	120,98
994,00	1001,00	997,50	20551,68	94420,64	55,00	279,72	154,49
1068,00	1069,00	1068,50			46,00	228,58	127,07
1126,00	1141,00	1133,50	20394,61	106182,11	50,00	251,31	139,26
1068,00	1093,00	1080,50			56,00	285,40	157,54
1031,00	1025,00	1028,00	21863,96	93687,12	51,00	256,99	142,31
1156,00	1186,00	1171,00			57,00	291,08	160,59
1102,00	1120,00	1111,00	20115,94	99833,44	57,00	291,08	160,59
1098,00	1116,00	1107,00			52,00	262,67	145,35
809,00	835,00	822,00	14669,21	68241,86	54,00	274,03	151,45
859,00	864,00	861,50			60,00	308,12	169,73
1039,00	1067,00	1053,00	19269,80	89994,27	62,00	319,49	175,82
1098,00	1111,00	1104,50			59,00	302,44	166,68
999,00	979,00	989,00	19021,53	81622,12	63,00	325,17	178,87
1119,00	1103,00	1111,00			60,00	308,12	169,73
1116,00	1114,00	1115,00	14760,41	92574,21	58,00	296,76	163,63
920,00	917,00	918,50			57,00	291,08	160,59
1080,00	1079,00	1079,50	18611,12	87110,81	63,00	325,17	178,87
1132,00	1122,00	1127,00			70,00	364,94	200,19
1097,00	1093,00	1095,00	16478,03	86883,17	65,00	336,53	184,96
1037,00	1042,00	1039,50			67,00	347,90	191,05
1062,00	1072,00	1067,00	16422,30	82305,05	69,00	359,26	197,15
1058,00	1050,00	1054,00			68,00	353,58	194,10
1031,00	1019,00	1025,00	-5131,57	77094,59	69,00	359,26	197,15
1014,00	1008,00	1011,00	15307,62	73553,50	69,00	359,26	197,15
1034,00	1025,00	1029,50			71,00	370,62	203,24
1051,00	1046,00	1048,50	-5769,97	76285,20	73,00	381,99	209,33
1072,00	1069,00	1070,50	12206,78	76993,41	72,00	376,30	206,29
913,00	891,00	902,00			76,00	399,03	218,47
936,00	1000,00	968,00	-6337,45	65307,82	85,00	450,17	245,89
891,00	714,00	802,50	11041,43	47551,78	85,00	450,17	245,89
891,00	844,00	867,50			95,00	506,98	276,36
1007,00	875,00	822,00	18418,59	48260,00	97,00	518,35	282,45
1235,00	1253,00	1244,00			105,00	563,80	306,82
1169,00	1189,00	1179,00	11917,98	83038,56	100,00	535,39	291,59
929,00	944,00	936,50			105,00	563,80	306,82
1094,00	1107,00	1100,50	15074,55	74261,72	99,00	529,71	288,54
			54268,3708	267342,178			

<i>QV (MW/m3)</i>	<i>Ttj.1 (oC)</i>	<i>Ttj. 2 (oC)</i>	<i>Ttj. 3 (oC)</i>
0,05	25	28	26
0,04			
0,04	27		38
0,04			
0,04	38	39	41
0,05			
0,03	47	57	
0,04			
0,04	48	62	60
0,04			
0,03	55	50	65
0,04			
0,05	53	59	
0,04			
0,04	52	61	68
0,04			
0,03	56	57	
0,00			
0,02	55	53	
0,04			
0,04	55	57	60
0,02			
0,04	54	58	64
0,03			
0,03	54	77	83
0,04			
0,04	58	83	96
0,02			
0,05	61	75	95
0,04			
0,04	62	69	88
0,04			
0,04	58	77	117
0,03			
0,04	57	72	98
0,04			
0,04	59	83	141
0,04			
0,04	56	80	149
0,04			
0,01	58	90	161
0,04			
0,04	59	92	168
0,03			
0,00	59	89	176
0,00			
0,04	62	85	185
0,01			
0,00			

APÊNDICE II

**Resultados dos testes no forno da Cerâmica Nossa Sra. Auxiliadora
operando com lenha**

Instrumentos Utilizados:

- Datalogger “DL-4000”;
- Analizador contínuo de gases “Testo 33”
- Termopares tipo K (cromel-alumel) Ø 3 mm, com 1 500 e 3 000 mm de comprimento;
- Cabo de compensação tipo K2*20 FF DIN FLEX c/t.

Os dois primeiros equipamentos pertencem ao laboratório de Termodinâmica da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, e foram postos a disposição da pesquisa (figura 31).

Como só se dispunha de 5 termopares, estes foram situados da seguinte forma (figura A1):

- Um termopar de 1 500 mm de comprimento na saída de cada uma das fornalhas, de maneira tal que não “vissem” a chama, para medir a temperatura dos gases sem ser afetada pela radiação;
- Um termopar de 3 000 mm de comprimento no centro da carga;
- Um termopar de 3 000 mm de comprimento no canal que conduz o gás de exaustão para a chaminé.

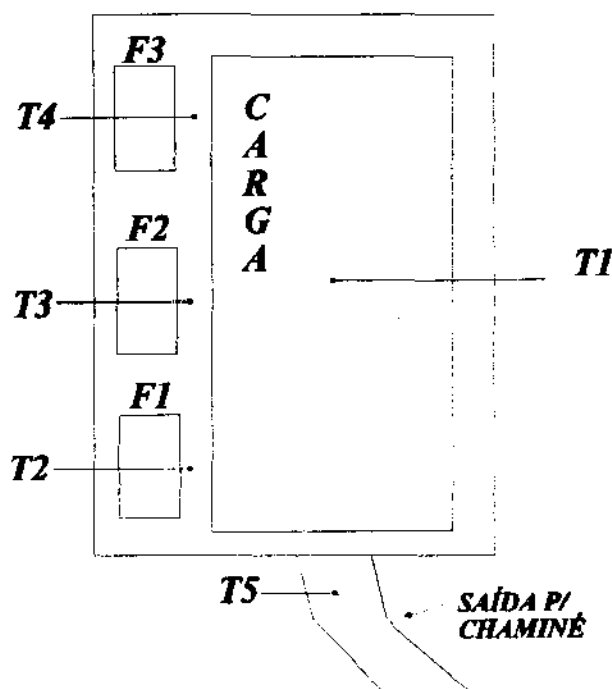


Figura A1: Disposição dos termopares no forno.

Descrição do forno.

O teste foi feito na Cerâmica “Nossa Senhora Auxiliadora” no município de Vinhedo, SP, seguindo a metodologia do projeto com pequenas modificações devidas a instalação e recursos disponíveis.

A instalação conta com quatro fornos ligados à chaminé de dois em dois. Cada forno, do tipo de abóbada retangular, tem três fornalhas de alvenaria de tijolo refratário onde são queimadas toras de lenha (pinho).

- forno foi carregado manualmente pelas portas laterais com a carga a ser queimada, empilhando-a sobre o piso formando três camadas de blocos de nove furos (14x19x24), cinco camadas de laje de piso H7 (20x25) e mais três de blocos (figura A2), até completar 7000 lajes e 5 000 blocos. logo foram fechadas as portas e vedadas com barro.



Figura A2: Empilhamento da carga dentro do forno.

A alimentação, com lenha, foi feita manualmente. Durante o período de pré-aquecimento as portas das fornalhas e dos cinzeiros são mantidas abertas (figura A3) para garantir a entrada do ar suficiente para o aquecimento gradual ou “requeente”, a fim de evitar a ocorrência de trincas e fissuras nos materiais, causadas por contrações diferenciais durante a evaporação da água residual. Este processo demorou 34 horas, até que a carga atingiu uma temperatura de aproximadamente 250 °C. Então começou o processo de queima propriamente dito, ou fogo forte, que demorou mais 8 horas, onde as temperaturas da carga e dos gases da combustão sobrepassaram os 900 °C e os gases de exaustão foram jogados à atmosfera a temperaturas até 300 °C no final da etapa, como mostra a figura A4.



Figura A3: Combustão da lenha durante o processo de pré-aquecimento, com as portas das fornalhas e os cinzeiros abertas.

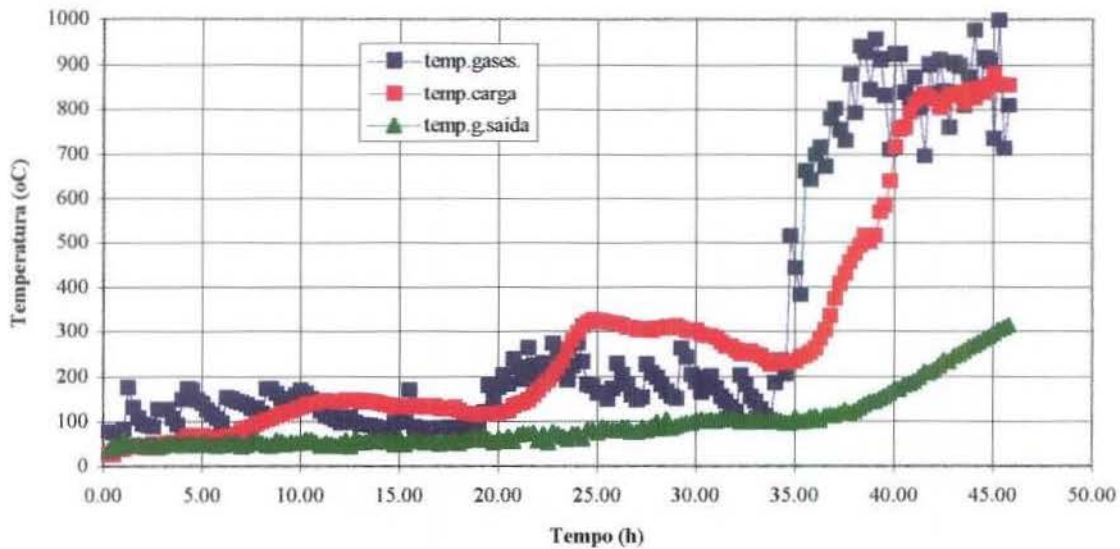


Figura A4: Comportamento das temperaturas da carga, dos gases de combustão e dos gases de saída (exaustão).

As temperaturas representadas na figura A4 foram medidas cada 15 minutos.

As amostras de gases de exaustão na saída da chaminé, foram tomadas de uma em uma hora, os resultados aparecem na figura A5. Nesta figura pode-se notar a elevada percentagem de oxigênio durante a combustão, que se manteve entre 18 % e 21 %, inclusive no período do fogo forte, onde são fechadas as portas das fornalhas e dos cinzeiros (figura A6), demonstrando a deficiente hermeticidade destas.

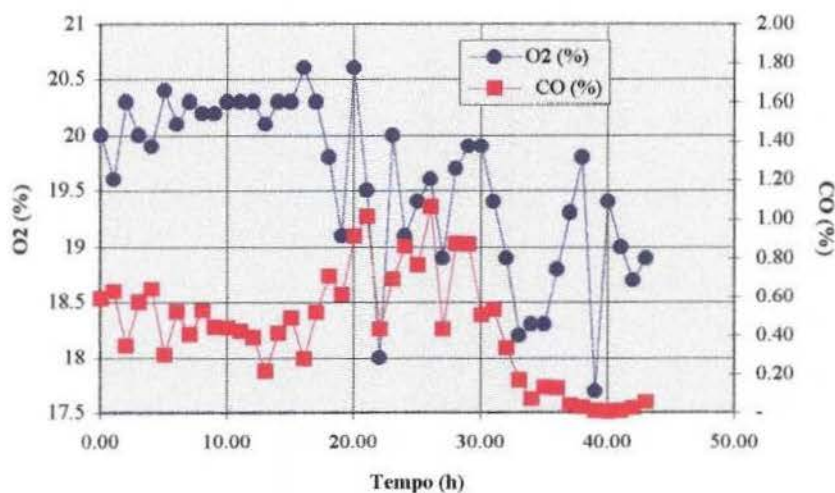


Figura A5: Concentrações de O₂ e CO nos gases de exaustão.

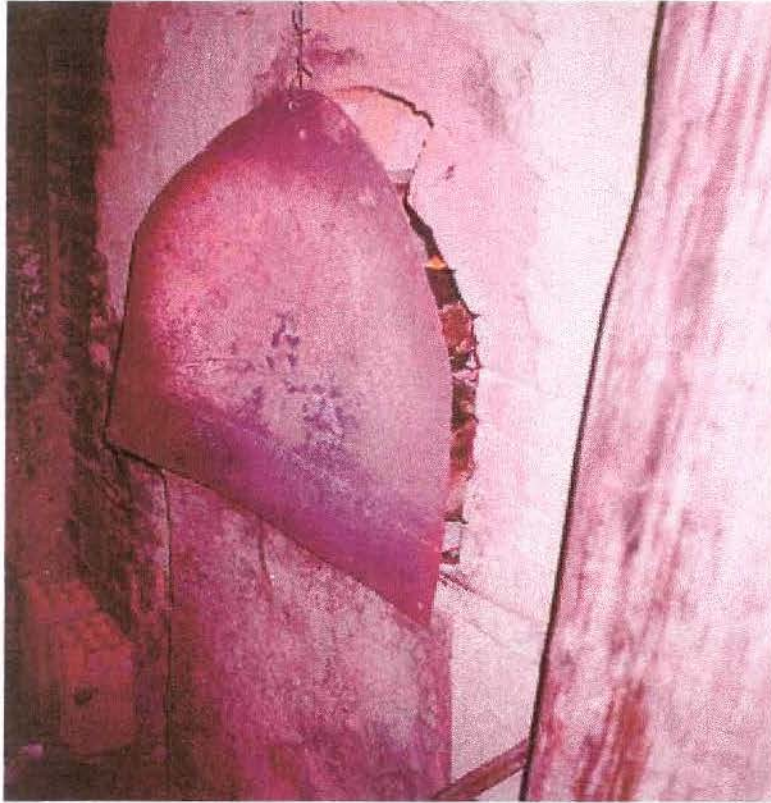


Figura A6: Portas de fornalhas e cinzeiros “fechadas” durante a queima.

Outro parâmetro demonstrativo disto é o coeficiente de excesso de ar, representados na figura A7.

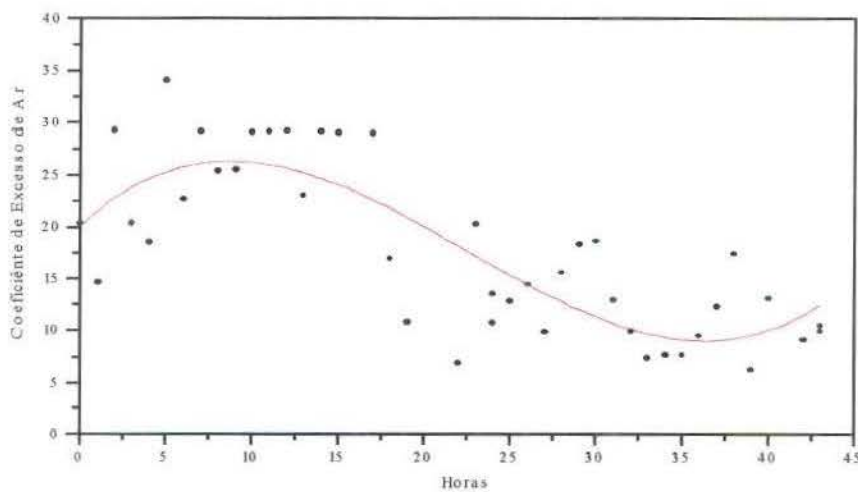


Figura A7: Coeficiente de Excesso de Ar durante todo o ciclo (pré-aquecimento e queima).

Os valores de α representados, resultam excessivamente elevados, devido as portas das fornalhas permanecerem abertas. A figura A8 representa o comportamento do consumo de lenha durante todo o ciclo.

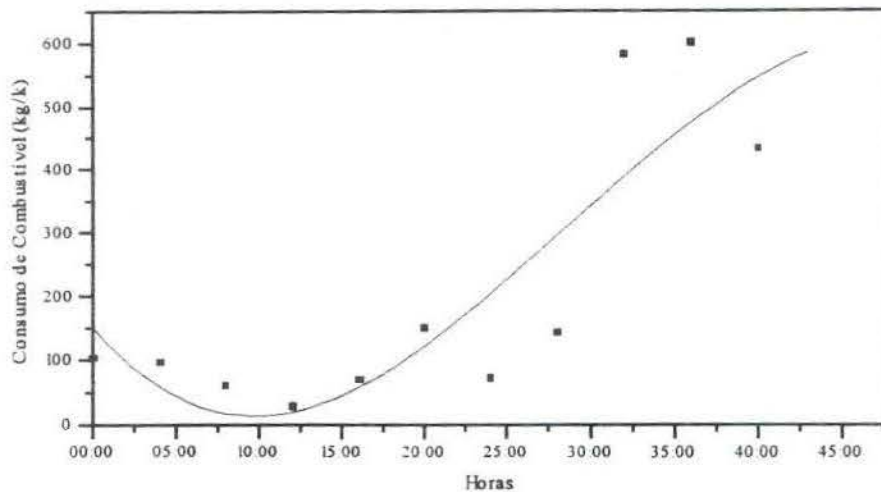


Figura A8: Consumo de combustível (lenha), em kg/h.

Cálculo das perdas.

Considerando que o processo estudado não é um processo contínuo, foi necessário dividir o ciclo em intervalos de tempo menores e fazer os cálculos com os valores médios desses intervalos. Assim todo o processo ficou dividido em 11 intervalos de 4 horas.

- **Perdas com os gases de exaustão, q_2 .**

Os valores desta perda aparecem representados na figura A9.

Como pode-se notar na figura A9, as perdas de energia com os gases de exaustão aumentam na medida que aumenta a temperatura dos gases, pois com ella aumentam também as entalpias dos gases e do ar para a combustão. Estas perdas chegam a ter valores muito grandes, da ordem de 80 %, constituindo 44 % das perdas totais do processo.

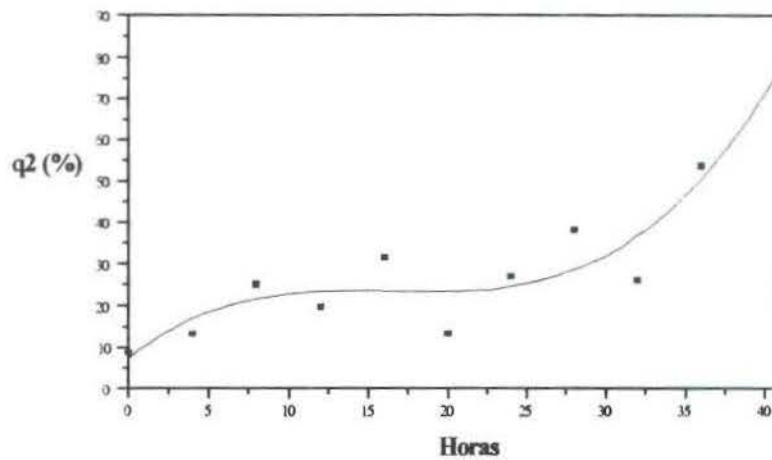


Figura A9: Perdas com os gases de exaustão, q_2 em % (valores médios em intervalos de 4 horas).

- **Perdas por combustão química incompleta, q_3 .**

Para o cálculo destas perdas determinaram-se valores médios do teor de CO, assim como do volume de gases secos para cada intervalo.

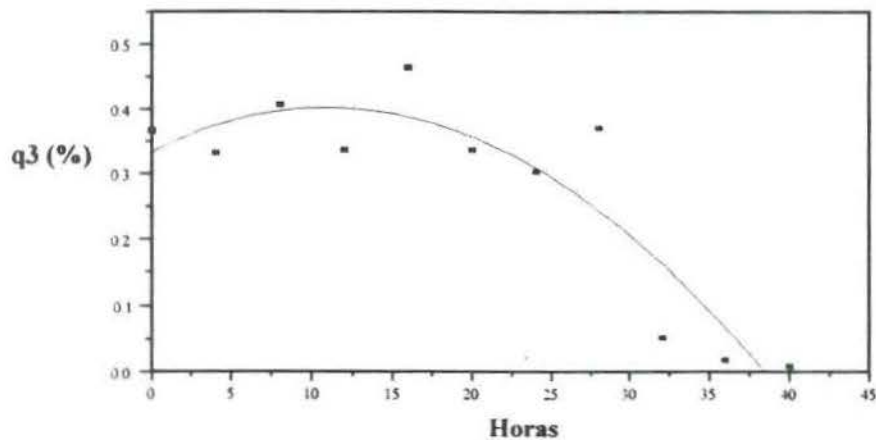


Figura A10: Comportamento das perdas por combustão química incompleta, q_3 em % (valores médios para intervalos de 4 horas).

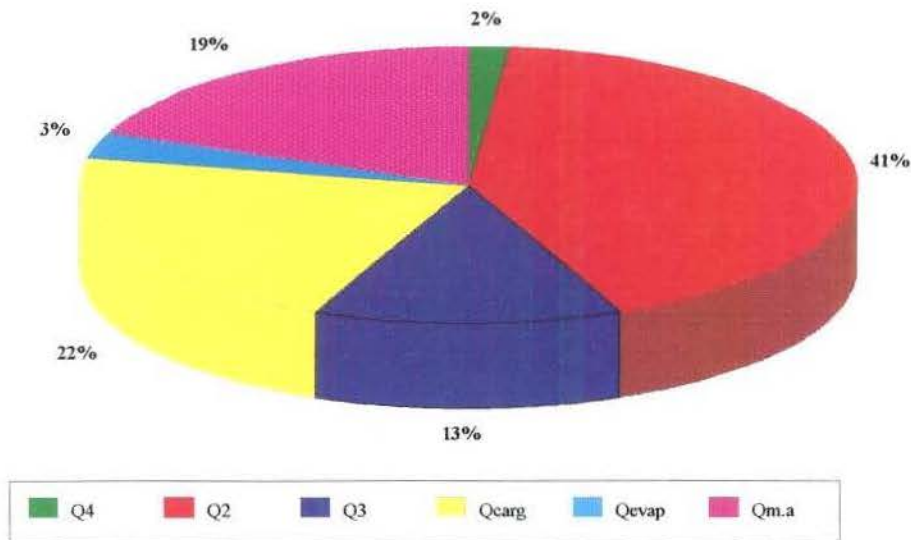


Figura A11: Balanço geral das perdas para todo o processo.

Conclusões preliminares.

1. Determinaram-se as curvas de temperaturas dos gases e da carga, assim como do teor de CO e O₂ dos gases num forno intermitente de chama invertida do tipo retangular, queimando lenha. Estes datos constituíram a base comparativa para o forno queimando bagaço de cana.
2. Os altos valores das perdas q₂, produto de um coeficiente de excesso de ar também elevado, incidem no consumo de combustível e no tempo do período de pré-aquecimento.