



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Ana Cláudia Bento Melchíades

**ESTUDO TEÓRICO/EXPERIMENTAL DE UM FORNO À GÁS
NATURAL PARA A INDÚSTRIA CERÂMICA**

Campina Grande / Paraíba

2012

Ana Cláudia Bento Melchiades

ESTUDO TEÓRICO/EXPERIMENTAL DE UM FORNO À GÁS
NATURAL PARA A INDÚSTRIA CERÂMICA

*Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Campina Grande, como parte
dos requisitos necessários para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica.*

ORIENTADOR: **Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**
Prof. Dr. Yoge Jeronimo Ramos da Costa

CAMPINA GRANDE / PB

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M518e	<p>Melchíades, Ana Cláudia Bento.</p> <p>Estudo teórico/experimental de um forno à gás natural para a indústria cerâmica / Ana Cláudia Bento Melchíades. -- 2012.</p> <p>154 f. : il. color.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro Ciências e Tecnologia.</p> <p>"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Prof. Dr. Yoge Jeronimo Ramos da Costa".</p> <p>Referências.</p> <p>1. Fornos - Cerâmica Vermelha. 2. Queima. 3. Gás Natural.</p> <p>I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Costa, Yoge Jeronimo Ramos da. III. Título.</p> <p>CDU 663.3.04(043)</p>
-------	---

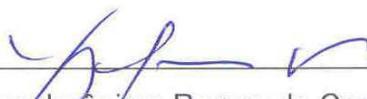
ESTUDO TEÓRICO/EXPERIMENTAL DE UM FORNO À GÁS PARA A
INDÚSTRIA CERÂMICA

ANA CLAUDIA BENTO MELCHIADES

Dissertação Aprovada em 28/12/2012 pela banca examinadora constituída dos
seguintes membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
Orientador
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa
Orientador
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho
Examinador Interno
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Laércio Gomes de Oliveira
Examinador Externo
UFCG/UAEQ

DEDICATÓRIA

À minha família

Dedico a Deus pela sua infinita misericórdia e pela família maravilhosa que tenho, em especial meus pais, Antônio Melchíades sobrinho (in memoriam) e Francisca Bento Melchíades, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que Ele me oferece e ao Anjo da Guarda por graças alcançadas durante minha vida.

A minha família, pelo apoio incondicional durante a execução desse trabalho, em especial a minha mãe, Francisca Bento Melchíades, por sempre está ao meu lado.

Ao Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela amizade, confiança, palavras sinceras, apoio moral e exemplo de profissionalismo.

Ao Professor Dr. Yoge Jeronimo Ramos da Costa por todas as dúvidas sanadas e pelo apoio.

Ao PPGEM-UFMG, pela oportunidade de realizar esse trabalho.

RESUMO

A secagem das peças cerâmicas é uma das operações mais importantes no processo de fabricação. A secagem artificial utiliza estufas aquecidas artificialmente através do uso de queimadores, ou aproveitando ar quente de forno em fase de resfriamento. No ambiente de secagem, a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar são parâmetros importantes, que podem gerar fortes tensões internas no material, provocando encolhimento não-uniforme e transporte excessivo de massa, gerando deformações e trincas no produto, comprometendo a qualidade do produto final, com desperdício de energia. Diante do exposto, este trabalho propõe a construção, experimentação e análise de um forno/secador operando 100% com gás natural. Fez-se experimentos com o sistema térmico e desenvolveu-se uma modelagem matemática para descrever energeticamente e exergeticamente o forno-secador, baseando-se nos conceitos da Termodinâmica Clássica. Resultados da temperatura no interior, parede e exterior do forno/secador em diversas posições e ao longo do tempo, eficiências energética e exergetica, e perda de calor do forno/secador para a vizinhança são apresentados e analisados. Concluiu-se que o forno/secador apresentou rendimento térmico, aproximadamente de 65%, eficiência exergetica variando de 40 a 70%, temperatura máxima de 941,6 °C (sem isolamento térmico) no seu interior e redução de poluentes dos gases de combustão do gás natural.

Palavras-chave: Cerâmica vermelha, fornos, queima, consumo de energia, gás natural.

ABSTRACT

Drying of ceramic is one of the most important operations in the manufacturing process. The artificial drying using heated artificially through the use of burners, or by using hot air of kiln under cooling. In the drying environment, temperature, relative humidity and air velocity are important parameters, which can generate strong internal stresses in the material, causing non-uniform shrinkage and excessive transport of mass, causing deformations and cracks in the product, that can affect the quality the final product and with loss of energy. Therefore, this work proposes the construction, testing and it was analysis of a kiln operating with 100% natural gas. There was experimenting with the thermal system and developed a mathematical model to describe the kiln under NiewPoint energetic and exergetic, based on the concepts of Classical Thermodynamics. Results of the temperature inside, at the wall and outside of kiln at various positions and over time, energy and exergy efficiency and heat loss from the kiln / dryer to neighboring are presented and analyzed. It was nitrified that the kiln / dryer had a thermal efficiency of approximately 65%, exergetic efficiency ranging from 40 to 70%, maximum temperature of 941.6°C (without insulation) inside of the kiln and reduced pollutants emissions of the natural gas combustion.

Keywords: Red ceramics, kilns, burning, energy consumption, natural gas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Quadro ilustrativo de localização do gás natural	07
Figura 2.2 – Canos que compõem a rede de gasoduto para o transporte do gás natural	13
Figura 2.3 – Forno intermitente com elevado grau de tecnologia.....	22
Figura 2.4 – Forno intermitente elétrico	23
Figura 2.5 – Forno intermitente elétrico de cabine para computador	23
Figura 2.6 – Forno elétrico de pequeno porte	24
Figura 2.7 – Esquema de um forno túnel convencional	25
Figura 2.8 – Forno a lenha	29
Figura 2.9 – Forno a gás natural	29
Figura 2.10 – Foto demonstrativa do armazenamento da matéria-prima para fabricação posterior do tijolo	30
Figura 2.11 – Foto ilustrativa da retirada da argila para armazenamento	32
Figura 2.12 – Fluxograma de processo produtivo da cerâmica vermelha	38
Figura 2.13 – Misturadora horizontal	42
Figura 2.14 – Moldagem por bocal usando câmara de vácuo	43
Figura 2.15 – Reabsorção de umidade pelo produto seco	52
Figura 2.16 – Redução da resistência mecânica a seco	52
Figura 2.17 – Tijolos comuns de nove furos	53
Figura 2.18 – Dimensões de alguns tijolos cerâmicos	54
Figura 2.19 – Quadro ilustrativo de 12 tipos de telhas	57
Figura 3.1 – Vista frontal dos cilindros contendo gás natural	69
Figura 3.2 – Foto ilustrativa dos canais por onde o gás é distribuído de forma homogênea	70
Figura 3.3 – Foto da construção do forno, mostrando uma entrada para queimador	71
Figura 3.4 – Vista do interior do forno (teto em forma de abóbada)	71
Figura 3.5 – Vista lateral do parafuso que prende a cantoneira de ferro ao forno	72
Figura 3.6 – Cantoneira de ferro para reforço forno/secador	72
Figura 3.7 – Construção da parte superior do forno secador	73
Figura 3.8 – Forno/secador em estudo	73
Figura 3.9 – Vista lateral dos seis queimadores do Forno/secador	74

Figura 3.10 – Vista de um queimador operando com gás natural no forno construído com tijolo refratário	74
Figura 3.11 – Vista dos seis queimadores operando com gás natural	75
Figura 3.12 – Chaminé	75
Figura 3.13 – Sistema de aquisição de dados – Lab VIEW	76
Figura 3.14 – Tela do Lab VIEW coletando dados	76
Figura 3.15 – Vista da placa de aquisição de dados	77
Figura 3.16 – Vista lateral esquerda com os termopares instalados no forno	77
Figura 3.17 – Esquema da localização dos termopares no lado esquerdo do forno	78
Figura 3.18 – Esquema da localização dos termopares no lado direito do forno	78
Figura 3.19 – Vista lateral direita com os termopares instalados no forno	79
Figura 3.20 – Termômetro digital, modelo TI – 890	79
Figura 3.21 – Termohigrômetros digitais	80
Figura 3.22 – Compressor	81
Figura 3.23 – Tubo de compressor levando ar frio para chaminé	81
Figura 3.24 – Analisador de gases	83
Figura 3.25 – Unidade de controle do analisador	83
Figura 3.26 – Sonda do analisador de gases	84
Figura 3.27 – Vista dos analisadores de gases	85
Figura 3.28 – Esquema de um forno de combustão interna	86
Figura 4.1 – Aquecimento e resfriamento do forno na parte externa	96
Figura 4.2 – Aquecimento e resfriamento no interior do forno	97
Figura 4.3 – Vista das rachaduras na parte superior do forno	97
Figura 4.4 – Vista das rachaduras do forno durante os processos de secagem e queima	98
Figura 4.5 – Vista lateral das rachaduras do forno	98
Figura 4.6 – Vista das rachaduras internas do forno	99
Figura 4.7 – Rendimento energético (baseado no PCI do gás natural)	116
Figura 4.8 – Rendimento energético do forno (baseado no PCS do gás natural) em função da temperatura dos gases de exaustão	117
Figura 4.9 – Calor liberado durante a combustão do gás natural em função da temperatura dos gases de exaustão	117
Figura 4.10 – Rendimento energético do forno (baseado no PCI do gás natural) em função da temperatura do ar entrada do forno	118

Figura 4.11 – Rendimento energético do forno (baseado no PCS do gás natural) em função da temperatura do ar na entrada do forno	119
Figura 4.12 – Calor liberado durante a combustão do gás natural em função da temperatura do ar na entrada do forno	119
Figura 4.13 – Rendimento exergético do forno em função da temperatura dos gases de exaustão	120
Figura 4.14 – Rendimento exergético do forno em função da temperatura do ar na entrada do forno	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição do gás natural da Paraíba	68
Tabela 3.2 – Produtos da combustão do gás natural em base molar	68
Tabela 3.3 – Especificações do termômetro infravermelho	80
Tabela 3.4 – Especificações técnicas do analisador de gases	82
Tabela 4.1 – Dados relativos a análise dos gases e eficiência de combustão	100

LISTA DE SÍMBOLOS

AC	ar-combustível	kmol de ar/kmol de combustível	
E_{ar}	eficiência da combustão		%
ϵ	eficiência exergética		%
\bar{h}_p	entalpia do produto		kJ/kmol de combustível
\bar{h}_R	entalpia do reagente		kJ/kmol de combustível
\bar{h}_{RP}	entalpia de combustão na base molar		kJ/kmol de combustível
M_{ar}	massa molecular do ar		kg de ar/kmol de ar
M_c	massa molecular do combustível		kg de combustível/kmol de combustível
M_p	massa do produto		kg/kmol
\dot{n}_c	vazão molar do combustível		m/t
$\eta_{comb.}$	eficiência da combustão		%
PCI	poder calorífico inferior		kJ/kg
PCS	poder calorífico superior		kJ/kg
P_{vp}	pressão parcial do vapor d'água		kgf/cm ²
Y_i	fração molar do componente i de combustível hidrocarbonado		adimensional
Y_{vp}	fração molar do vapor d'água		Kmoles de H ₂ O/Kmoles de produto
X	exergia		kJ/Kmol
X^{tem}	exergia termomecânica		kJ/Kmol
X^{qui}	exergia química		kJ/Kmol
\dot{X}_c	taxa pela qual a exergia entra com o combustível		%

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

Introdução	01
------------------	----

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica	04
-----------------------------	----

2.1 Aspectos teóricos da cerâmica	04
---	----

2.1.1 O que é cerâmica?	04
-------------------------------	----

2.1.2 Histórico da cerâmica	05
-----------------------------------	----

2.1.3 Fabricação da cerâmica	06
------------------------------------	----

2.2 Gás natural	07
-----------------------	----

2.2.1 A história do gás natural	08
---------------------------------------	----

2.2.2 Benefícios do uso do gás natural	10
--	----

2.2.3 Características e propriedades	12
--	----

2.2.4 Transporte do gás natural	13
---------------------------------------	----

2.2.5 Aplicações do gás natural	15
---------------------------------------	----

2.3 Combustão	16
---------------------	----

2.3.1 Fundamentos da combustão	16
--------------------------------------	----

2.3.2 Reações químicas da combustão	17
---	----

2.3.3 Classificação da combustão	18
--	----

2.3.4 Relação ar/gás e tipos de combustão	19
---	----

2.4 Fornos	20
------------------	----

2.4.1 Fornos intermitentes	21
----------------------------------	----

2.4.2 Fornos tipo chama reversível	24
--	----

2.4.3 Fornos contínuos	24
------------------------------	----

2.5 Conversão dos queimadores à lenha para o uso do gás natural	27
---	----

2.6 Matéria-prima: argila	29
---------------------------------	----

2.6.1	Características gerais	29
2.6.2	Origem e transformação	32
2.6.3	Classificação das argilas	33
2.6.3.1	Segundo a sua estrutura	33
2.6.3.2	Segundo o seu emprego	33
2.6.3.3	Segundo a plasticidade	34
2.6.4	Propriedades das argilas	34
2.7	Processo produtivo da cerâmica vermelha	37
2.7.1	Exploração das jazidas	41
2.7.2	Tratamentos da matéria-prima	41
2.7.3	Moldagem	42
2.7.4	Processamento térmico: secagem e queima	43
2.7.4.1	A secagem	44
2.7.4.2	Queima	47
2.7.4.3	Principais defeitos na secagem e queima	49
2.7.5	Tempo e custo de secagem	50
2.7.6	Reabsorção de umidade pelo produto	51
2.8	Produtos oriundos da Indústria Cerâmica (tijolos e telhas)	53
2.8.1	Fabricação dos tijolos comuns	53
2.8.2	Bloco cerâmico	55
2.8.3	Telhas comuns	56
2.8.3.1	Tipos de telhas	56
2.9	Indústria de cerâmica brasileira: aspectos energéticos, tecnológicos, sociais e ambientais	57
2.9.1	Panorama tecnológico energético	57
2.9.2	Panorama social e ambiental	60
2.10	O estado da arte na secagem e queima de materiais cerâmicos	63

CAPÍTULO 3

Material e Métodos	68
3.1 Material	68
3.2 Metodologia	69
3.2.1 Experimental	69
3.2.1.1 Descrição do forno construído e analisado	69
3.2.1.2 Sistema de aquisição e armazenamento de dados	76
3.2.1.3 O sistema de medição de temperatura no forno	77
3.2.1.4 Sistema auxiliar de injeção de ar	80
3.2.1.5 Sistema de análise dos gases de escape	81
3.2.1.6 Procedimento experimental	84
3.2.2 Teórico (Modelagem matemática)	85
3.2.2.1 Considerações sobre o problema analisado	85
3.2.2.2 Distribuição do consumo térmico nos fornos	86

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussões	95
4.1 Experimental	95
4.2 Teórico	101

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos	121
5.1 Conclusões	121
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	122
Referências bibliográficas	123
Apêndice	129

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A cerâmica vermelha, classe à qual pertence o tijolo usado nas moradias, muros residenciais, enfim na maioria das estruturas edificadas pela humanidade, acompanha o homem desde tempos remotos. Segundo Resende (2001), a cerâmica deve ter sido a primeira das artes conhecidas. As olarias fornecedoras tradicionais deste produto, especialmente no Brasil, parecem por vezes serem mais velhas que o próprio tijolo. Com ar antiquado e rudimentar, destoa em meio ao quadro de desenvolvimento tecnológico do século XXI. O tijolo e as olarias foram um marco na história da civilização. Este apresenta uma resistência quase igual à da pedra, resistindo às forças do intemperismo e aos efeitos da poluição, sendo mais resistente que o mármore que é atacado pela chuva ácida e ainda persiste diante dos padrões de estética.

Apesar de um pouco esquecida, ainda hoje a indústria cerâmica vermelha tem um papel importante no desenvolvimento da humanidade, pois está presente na grande maioria das construções que crescem na mesma proporção que o mundo se desenvolve. Em países como Itália e Espanha, este setor tem acompanhado o crescimento tecnológico dos tempos modernos. Porém no Brasil, devido à abundância de matéria prima, ao perfil do empresário e a falta de incentivos do governo, a indústria de cerâmica estrutural encontra-se estagnada, com um atraso de mais de 50 anos quando comparada aos países acima citados.

No processo de fabricação da cerâmica vermelha, as etapas mais importantes são a de secagem e queima, onde o principal combustível usado tem sido a lenha e seus derivados. No entanto, a utilização do gás natural para a secagem e queima nos fornos está sendo uma tendência mundial, por ser um combustível mais nobre, menos poluente, que facilita o controle do processo de queima e a obtenção de produtos de maior qualidade.

O uso do gás natural como fonte alternativa de energia em fornos, apresenta muitas vantagens econômicas, operacionais e ambientais, como: não tem frete rodoviário; dispensa área de armazenamento (lenha e óleo) e elimina gasto com energia de nebulização (óleo); diminui os custos de manutenção; retarda os investimentos em troca de equipamentos; é pago após a utilização; não necessita de aquecimento; reservas medidas acima de 150 bilhões de m³; combustão completa; reduz o número e o tempo de paradas para manutenção; aumenta a disponibilidade e vida útil dos equipamentos; proporciona elevado rendimento térmico; composição química constante isenta de compostos pesados; estabilidade e formatos de chama adequados para cada aplicação que reduz a emissão de CO₂, responsável pelo efeito estufa; limpeza dos produtos de combustão – calor limpo; redução drástica de emissões (SO_x e NO_x), responsável pela chuva ácida e destruição da camada de ozônio; e proporciona redução do desmatamento.

O maior desafio na construção e na operação de um forno consiste na obtenção de uma região de queima de grande uniformidade de temperatura, através da distribuição e da regulagem criteriosa dos queimadores utilizados. Estudar e avaliar o desempenho de um forno-secador de combustão interna é muito importante a fim de conhecer suas características de desempenho quando se aumenta gradativamente a temperatura de entrada e saída dos gases no forno.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivos:

- a) Analisar experimentalmente o comportamento térmico de um forno-secador, medindo a temperatura inicial, o seu aumento e o declínio em várias posições no forno e ao longo do tempo, quando se utiliza gás natural como fonte de energia;
- b) Avaliar a emissão de poluentes do forno proveniente do processo de combustão do gás natural;
- c) Propor uma modelagem matemática para analisar energética e exergeticamente o forno-secador, baseando-se nos conceitos da Termodinâmica Clássica;

- d) Avaliar o desempenho energético e exergético do secador em várias condições de operação.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Aspectos teóricos da cerâmica

2.1.1. O que é cerâmica?

Segundo Lehmkuhl (2004), cerâmica é a denominação comum a todos os artigos ou objetos produzidos com argila e que são queimados ao fogo. O nome procede da palavra grega “Keramos” que significa argila.

A arte da cerâmica prosperou entre quase todos os povos ao mesmo tempo, refletindo nas formas e nas cores, o ambiente e a cultura dos diversos países. De acordo com Read (1968), antes de possuir escrita, literatura ou mesmo uma religião, o homem possuía já esta arte.

A cerâmica é a atividade de produção de artefatos a partir de argilas, que torna-se muito plástica e fácil de moldar quando umedecida. Depois de submetida a uma secagem lenta à sombra para retirar a maior parte da água, a peça moldada é submetida a altas temperaturas que lhe atribuem rigidez e resistência mediante a fusão de certos componentes da massa, fixando os esmaltes das superfícies. A cerâmica pode ser uma atividade artística, em que são produzidos artefatos com valor estético, ou uma atividade industrial, através da qual são produzidos artefatos com valor utilitário. De acordo com o material e técnicas utilizadas, classifica-se a cerâmica como sugere (Folheto Indústria Cincera, 2006):

terracota - argila cozida no forno, sem ser vidrada, embora, às vezes, pintada
cerâmica vidrada - o exemplo mais conhecido é o azulejo.

grês - cerâmica vidrada, às vezes pintada, feita de pasta de quartzo, feldspato, argila e areia.

faiança - louça fina obtida de pasta porosa cozida a altas temperaturas, envernizada ou revestida de esmalte sobre o qual pintam-se por motivos decorativo.

A indústria cerâmica é uma indústria de processo químico onde as matérias primas (argilas, caulins, quartzo, feldspatos) são processadas em uma seqüência operacional que, a cada etapa, altera suas características físicas e químicas para se obter um produto final com as características de mercado. As etapas fundamentais do processamento cerâmico envolvem: preparo da matéria prima, conformação e processamento térmico (secagem e queima) (Melo, 1998).

A cerâmica hoje extrapola o dia a dia para auxiliar na área científica. Na medicina, vem sendo utilizada na prótese de ossos; é ainda o material utilizado quando existe a necessidade de um produto resistente a altas temperaturas, além de aplicações específicas como cerâmicas de alta tecnologia.

2.1.2. História da cerâmica

A indústria da cerâmica é uma das mais antigas do mundo, em vista da facilidade de fabricação e abundância de matéria-prima – o barro. Já no período neolítico, o homem pré-histórico calafetava as cestas de vime com o barro. Mais tarde verificou que podia dispensar o vime, e fez pote só de barro. Posteriormente, constatou que o calor endurecia esse barro, e surgiu a cerâmica propriamente dita, que nessa fase da humanidade, foi largamente empregada para diversos fins. (Bauer, 1994).

O emprego dos produtos cerâmicos iniciou-se em lugares em que a pedra era escassa e os materiais argilosos abundantes. Primeiramente o cozimento das argilas era feito ao sol e depois em fornos.

Os materiais cerâmicos têm origem muito antiga. São frágeis, porém muito duráveis. Por isso, é um dos primeiros sinais encontrados em uma escavação

arqueológica. Os materiais cerâmicos, por usarem matéria-prima abundante na natureza, logo se tornaram algo essencial na história da humanidade.

Os assírios e caldeus foram provavelmente os primeiros povos a produzirem tijolos cerâmicos, e os registros dessa utilização encontram-se na própria Bíblia. No Egito, a pedra sobrepujou o tijolo, porém os povos romanos levaram, juntamente com o seu domínio sobre o mundo, seus conhecimentos cerâmicos a todas as partes. Entretanto, foram os árabes que revalorizaram extraordinariamente este material, a ponto de seu uso caracterizar a arquitetura maometana. Na Espanha há vários registros da aplicação dos tijolos pelos árabes em obras lindíssimas. Em Londres, por exemplo, um grande incêndio em 1666 que destruiu um grande número de casas de madeira, alertou a população para a reconstrução da cidade utilizando tijolos.

Com o aparecimento das estruturas metálicas e do concreto armado, o tijolo foi relegado da sua função estrutural para a utilização como elemento de vedação. Entretanto, os materiais cerâmicos tiveram um avanço considerável nas últimas décadas e em muitas aplicações (devido ao custo, durabilidade, estética e resistência mecânica) ainda são absolutos (<http://unoescjba.edu.br>, 2006).

2.1.3. Fabricação da cerâmica

O processo de fabricação da cerâmica consiste no aquecimento da argila, provocando transformações na estrutura do componente, conferindo-lhe resistência, que é a etapa mais importante. As propriedades finais dos produtos cerâmicos dependem fortemente da temperatura a que foram submetidos durante a sua queima e a identificação das temperaturas no interior do empilhamento pode revelar a causa da obtenção ou não de certas propriedades.

O maior desafio na construção e na operação de um forno consiste na obtenção de uma região de queima de grande uniformidade de temperatura, através da distribuição e da regulação criteriosa dos queimadores utilizados.

Muito pouco se conhece sobre a influência que os parâmetros de preparação da massa da cerâmica e conformação das peças têm sobre o desempenho do processo de

secagem de uma maneira geral. Vieira et al. (2003) mostram que o enfraquecimento da massa argilosa pela adição de areia reduz a quantidade de água necessária à conformação de uma peça e, portanto, reduz também sua retração. Porém, esse trabalho não visa analisar as influências desses parâmetros.

Uma preocupação constante da indústria cerâmica é o alto consumo de energia. Do custo total da produção, o gasto com energia pode chegar a 20%.

2.2. Gás Natural

O gás natural é dividido em duas categorias: associado e não-associado. Gás associado é aquele que, no reservatório, está dissolvido no óleo ou sob a forma de capa de gás. O Gás não-associado é aquele que, no reservatório, está livre ou em presença de quantidades muito pequenas de óleo. É encontrado no subsolo, por acumulações de gás que ocorrem em rochas porosas, isoladas do exterior por rochas impermeáveis, associadas ou não a depósitos petrolíferos (Figura 2.1.) (PBGÁS, 2006).

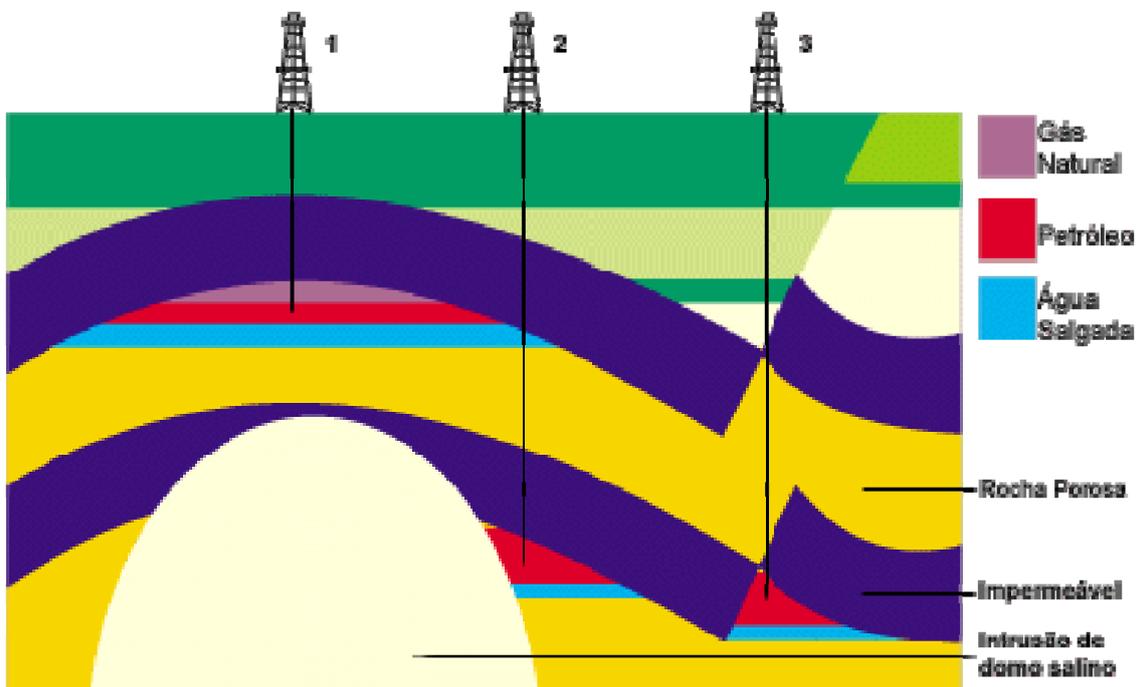


Figura 2.1 – Quadro ilustrativo de localização do gás natural. Fonte: www.pbgas.pb.gov.br/gasnat.shtml, 2006

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves, que à temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece no estado gasoso. É um gás inodoro e incolor, não tóxico e é mais leve que o ar. O gás natural é uma fonte de energia limpa, que pode ser usada nas indústrias, substituindo outros combustíveis mais poluentes, como óleos combustíveis, lenha e carvão. Desta forma ele contribui para reduzir o desmatamento e o tráfego de caminhões que transportam óleos combustíveis para as indústrias.

As reservas de gás natural são muito grandes e o combustível possui inúmeras aplicações em nosso dia-a-dia, melhorando a qualidade de vida das pessoas. Sua distribuição é feita através de uma rede de tubos e de maneira segura, pois não necessita de estocagem de combustível e por ser mais leve do que o ar, se dispersa rapidamente na atmosfera em caso de vazamento. Usando o gás natural, você protege o meio ambiente e colabora para acabar com a poluição (Ambiente Brasil, 2006).

O gás natural é o resultado da degradação da matéria orgânica de forma anaeróbica (fora do contato com o ar), matéria orgânica esta oriunda de quantidades extraordinárias de micro-organismos que, nos tempos pré-históricos, se acumulavam nas águas litorâneas dos mares da época. Essa matéria orgânica foi soterrada a grandes profundidades e, por isto, sua degradação se deu, normalmente, fora do contato com o ar, a grandes temperaturas e sob fortes pressões.

2.2.1. A história do gás natural

a) No mundo

Durante muito tempo, quando as empresas buscavam na exploração produzir petróleo, o gás natural encontrado era considerado um estorvo, pois ele exigia cuidados especiais de segurança para a produção do petróleo. Ainda que ocorrências isoladas de gás natural fossem localmente utilizadas, o seu aproveitamento em maior escala passou a ocorrer nos Estados Unidos, na década de 1920. Isso foi possível devido à descoberta de grandes campos de gás natural, bem como às melhorias na tecnologia de dutos, que permitiram a utilização de pressões, que viabilizaram o transporte de grandes volumes de gás a enormes distâncias, reduzindo o custo do transporte. A utilização do gás natural

foi ganhando espaço onde grandes descobertas eram feitas, como na ex- União Soviética e na Europa Ocidental. Mas a exploração e o uso do gás natural só se generalizaram à medida que foram feitas descobertas de reservas naturais maiores e quando o transporte em grandes volumes das zonas produtoras foi viabilizado.

b) No Brasil

A utilização do gás natural no Brasil teve início da década de 40, com as descobertas de óleo e gás na Bahia. Data também da mesma época seu fornecimento a terceiros, como indústria têxtil, cimenteira, cerâmicas e outras, localizadas no Recôncavo Baiano, que o utilizavam como combustível.

A utilização do gás natural é uma tendência mundial, por ser um combustível mais nobre, menos poluente e em estado gasoso, facilita o controle de sua queima. A disponibilidade de gás natural pode contribuir para o desenvolvimento da indústria cerâmica brasileira. Para poder aproveitar esta fonte de energia – gás natural – é preciso uma adequada política de preços, associada a outras ações como: condições apropriadas de infraestrutura viária, ampliação da rede de gasodutos, incentivos à inovação tecnológica e atração de investimentos de novas indústrias de médio porte, assim sendo, formar-se-ia um conjunto de instrumentos de política industrial que poderiam gerar importantes benefícios socioeconômicos, principalmente no aumento da produtividade das empresas e maior oferta de emprego (PBGÁS, 2006).

Os processos de queima e secagem (que dão aos produtos cerâmicos suas características finais típicas, como resistência, cor, entre outras) consomem a maior parte do combustível utilizado na fabricação dos produtos cerâmicos.

Uma das preocupações das distribuidoras de combustíveis gasosos é desenvolver um trabalho concreto no setor de cerâmica vermelha. Isso ainda não se desenvolveu porque se conhece pouco o processo de conversão entre o combustível utilizado hoje pela maioria das cerâmicas, que é a lenha. A queima com lenha em regiões onde não há reflorestamento das áreas devastadas agrava ainda mais o problema do desmatamento sem critério de áreas vitais. No Nordeste, essas áreas, por estarem dentro do chamado

“polígono das secas”, nunca são recompostas, alimentando cada vez mais e de forma decisiva o problema da desertificação da região.

O gás natural começou a se destacar como fonte energética, sendo consumido a partir de 1984, com 0,3%, e, em 2002, alcançou 22,67% do consumo final de energia. Este foi um dos energéticos que apresentou um crescimento médio positivo de 85,38% ao ano, de 1980/2002. Ele, o gás, permite distribuição mais homogênea das chamas e um maior controle da temperatura, garantindo também produtos mais homogêneos e de maior qualidade.

De acordo com a tese da origem orgânica dos hidrocarbonetos encontrado no site www.ambientebrasil.com.br, não é possível uma determinação precisa da origem do gás natural, uma vez que nele encontram-se também gases naturais de origem bioquímica.

2.2.2. Benefícios do uso do gás natural

Os seguintes benefícios do uso do gás natural podem ser citados:

- a) Aumento da disponibilidade de combustíveis;
- b) Estímulo à instalação de novas indústrias;
- c) Maior vida útil para os equipamentos;
- d) Menor custo de manutenção;
- e) Melhoria dos padrões ambientais;
- f) Reservas medidas acima de 150 bilhões de m³.

Muitas são as vantagens quanto ao uso do gás natural:

Quanto à qualidade – O calor se aplica diretamente ao produto; evitam-se impurezas e o depósito de compostos contaminadores; alcançam-se curvas de temperaturas ideais; garantia de padrão de qualidade; permite um melhor controle da queima e um baixo nível de emissões de partículas e gases, possibilitando a fabricação de produtos finais com maior qualidade e, conseqüentemente, maior valor agregado, verificando-se ainda menor nível de rejeitos; proporciona uma regulagem fácil e rápida

do forno para a queima de produtos diferentes quanto ao tamanho, forma e matéria-prima, permitindo maior flexibilidade na diversificação da linha de produção.

Quanto às vantagens operacionais – Combustão completa; reduz o número e o tempo de paradas para manutenção; aumenta a disponibilidade e vida útil dos equipamentos; proporciona elevado rendimento térmico; composição química constante, isenta de compostos pesados; estabilidade e formatos de chama adequados para cada aplicação.

Quanto às vantagens econômicas – Não tem frete rodoviário; dispensa área de armazenamento (lenha e óleo) e elimina gasto com energia de nebulização (óleo); diminui os custos de manutenção; retarda os investimentos em troca de equipamentos; é pago após a utilização; não necessita de aquecimento; reservas medidas acima de 150 bilhões de m³.

Vantagens macro-econômicas:

- a) Diversificação da matriz energética;
- b) Fontes de importação regional;
- c) Disponibilidade ampla, crescente e dispersa;
- d) Redução do uso do transporte rodo-ferro-hidroviário;
- e) Atração de capitais de riscos externos;
- f) Melhoria do rendimento energético;
- g) Maior competitividade das indústrias;
- h) Geração de energia elétrica junto aos centros de consumo.

Do ponto de vista ambiental, o gás natural apresenta elevado rendimento e eficiência – combustão completa com menor excesso de ar; reduz a emissão de CO₂ - efeito estufa; limpeza dos produtos de combustão – calor limpo; redução drástica de emissões (SO_x e NO_x) – chuva ácida e destruição da camada de ozônio; redução do desmatamento. Segundo SENAI (1996), esse aspecto muitas vezes pode significar a ampliação da capacidade de produção de indústrias ou a implantação de novas empresas, permitindo o desenvolvimento regional, tendo em vista a possibilidade de não

degradar a qualidade de vida da região, tornando possível uma perfeita integração do setor produtivo com a população.

Vantagens diretas para o usuário:

- a) Fácil adaptação das instalações existentes;
- b) Menor investimento em armazenamento/uso de espaço;
- c) Menor corrosão dos equipamentos e menor custo de manutenção;
- d) Menor custo de manuseio da combustão;
- e) Combustão facilmente regulada;
- f) Elevado rendimento energético;
- g) Admite grande variação do fluxo;
- h) Pagamento após o consumo.

2.2.3. Características e propriedades

As propriedades do gás que afetam o comportamento de sua queima em um equipamento são conhecidas pelo termo geral de “características de combustão”. Observam-se alterações no desempenho da queima de um gás quando ocorrem fatos como: ao equipamento está sendo fornecido gás suficiente ou em excesso provocando falta de calor ou desperdício de calor; os queimadores atmosféricos apresentam “retorno de chama” ou excesso de barulho; a combustão incompleta poderá ocorrer produzindo monóxidos de carbono, aldeídos e fuligem como produtos de combustão. Assim, espera-se de um queimador a gás, que após sua instalação de forma correta, esse proporcione uma operação satisfatória e segura por um período razoável de tempo. Para que isto possa ocorrer é necessário que o queimador tenha sido projetado de forma a satisfazer as principais propriedades e características de determinado gás (Freitas, 2003).

Por já se constituir num combustível no estado gasoso, o gás natural não precisa ser atomizado para queimar. Sua combustão é limpa, com melhor rendimento térmico e reduzida emissão de poluentes, induzindo uma melhor qualidade de vida para a sociedade.

As principais razões das vantagens dos combustíveis gasosos são (Pollini Filho, 1978; Lechner, 1997):

- a) A ótima mistura gás/ar permite operar com menor excesso de ar, elevando a eficiência do processo;
- b) O sistema de queima de gás possui uma faixa de regulagem maior que qualquer sistema operando com combustível líquido;
- c) Maior estabilidade de chama isenta de resíduos;
- d) Menor custo de paradas para manutenção e limpeza do sistema de combustão, associados à facilidade operacional.

2.2.4. Transporte do gás natural

A Figura 2.2 apresenta a construção de um gasoduto. O gasoduto é um conjunto de tubos, todo fechado, enterrado no chão a uma profundidade média de 1,5 m e que serve para transportar o gás, pois nem sempre o Gás Natural aparece perto do local onde as pessoas vão usá-lo, fazendo-se necessário pegar o gás que sai da terra ou do fundo do mar e leva-lo para as cidades onde as pessoas vão utilizá-lo. O transporte de Gás Natural pode ser realizado na fase gasosa ou liquefeita.



Figura 2.2 – Canos que compõem a rede de gasoduto para o transporte do gás natural.

Fonte: PBGÁS (2006)

O transporte na fase gasosa - Em sua fase gasosa, o transporte do Gás Natural é realizado a altas pressões na temperatura ambiente. Para pequenas quantidades e distâncias o transporte do gás no estado gasoso comprimido pode ser feito por barcaças

ou caminhões-feixe, armazenado em feixe tubulações comprimindo a pressões de 230 kgf/m². O volume chega a 5000 m³ de gás natural por reboque, em caso de transporte rodoviário.

No caso de grandes volumes e variadas distâncias, o transporte é feito por gasodutos a pressões de até 120 kgf/cm², pois é um meio seguro e econômico.

O transporte na fase líquida - Para se tornar um gás líquido, o Gás Natural é refrigerado e mantido à temperatura de -160°C, à pressão próxima da atmosférica, exigindo um complexo sistema de armazenamento e transporte específico para a operação nessas condições. Em média, 600 m³ de Gás Natural quando liquefeito ocupam 1 m³, razão pela qual é a forma mais conveniente para ser transportado em navios ou barcaças e armazenado no terminal. O transporte marítimo do gás liquefeito (GNL) é efetuado em navios com capacidade de 135.000 m³ de GNL e o fluvial através de barcaças ou navios de pequeno porte com capacidade que varia de 600 a 6.000 m³ de GNL. Já o terminal marítimo armazena o GNL em tanques criogênicos e o gás é enviado ao sistema de transporte dutoviário com o auxílio de bombas centrífugas e vaporizador de GNL.

Transporte dutoviário - O transporte dutoviário do gás é composto de gasodutos de transporte e sistemas de compressão, redução de pressão, medição e supervisão e controle, com a finalidade de colocar o gás natural disponível às Companhias Distribuidoras em todos os pontos de entrega localizados ao longo da diretriz do gasoduto.

Os dutos utilizados para o transporte são de aço especial de grande resistência e durabilidade, totalmente soldado para evitar vazamentos, sendo revestido com uma fita plástica colada para evitar corrosão, o que o torna bastante seguro. Depois de enterrado, são colocadas placas de concreto 50 centímetros acima dos tubos para protegê-los contra acidentes no caso de escavação do local. Além disso, é colocada, sobre as placas de proteção, uma faixa laranja indicando o gasoduto enterrado.

Desta forma, o transporte do gás natural por gasoduto é totalmente seguro. Além de seguro, é ecologicamente correto.

2.2.5. Aplicações do gás natural

O gás natural, depois de tratado e processado, é utilizado largamente em residências, no comércio, em indústrias e em veículos. Nos países de clima frio, seu uso residencial e comercial é predominantemente para aquecimento ambiental. Já no Brasil, esse uso é quase exclusivo em cocção de alimentos e aquecimento de água.

Na indústria, o gás natural é utilizado como combustível para fornecimento de calor, geração de eletricidade e de força motriz, como matéria-prima nos setores químico, petroquímico e de fertilizantes, e como redutor siderúrgico na fabricação de aço. Já na área de transportes, é utilizado em ônibus e automóveis, substituindo o óleo diesel, a gasolina e o álcool (Ambiente Brasil, 2006).

A conversão de fornos, construídos para a queima de combustíveis sólidos e óleos pesados, para o uso de gás natural comprovam que o uso de tal combustível permite imprimir um ritmo mais forte no aquecimento da carga, notando-se uma economia de energética de aproximadamente 20% (Reeds, 1991).

No processo de queima, o calor mal distribuído resulta em peças, numa mesma fornada, cruas, sobrequeimadas e boas, dependendo do posicionamento do forno. A qualidade do produto final e o rendimento da queima, em termos do aproveitamento, é uma função do modo como a queima é conduzida.

O gás natural foi rapidamente incorporado a muitas indústrias, sobretudo nas indústrias cerâmicas de revestimento, como elemento indispensável na manutenção da qualidade dos seus produtos. Mas essa incorporação ainda não acontece em larga escala na indústria cerâmica vermelha.

O uso do gás natural como alternativa energética para a indústria cerâmica vermelha ainda depende de ajustes nos atuais preços praticados no mercado. Apesar da produtividade dos fornos túneis a gás natural ser superior a dos fornos a serragem, o preço ainda encontra-se elevado em relação ao preço da serragem. Isso faz com que o

custo total com gás natural seja cerca de duas vezes maior que o custo total com a serragem.

Entretanto, a utilização do gás natural possibilita às cerâmicas, a fabricação de produtos de melhor qualidade e, conseqüentemente, de maior valor agregado, ampliando suas receitas e compensando o aumento dos custos com combustível. Além do benefício ambiental da substituição que será bastante significativo, com uma redução de cerca de cinco vezes nos níveis de emissão de CO₂ por tonelada de produto e a redução no desmatamento de florestas nativas. Ferramentas de análises, de simulação e de medição estão sendo elaboradas com o objetivo de implantar novas tecnologias, através do estabelecimento de novos exemplos práticos que possam ser observados pelas demais empresas, de modo que em breve o gás natural irá tornar-se uma necessidade natural em vista do grau de desenvolvimento que se espera também para a indústria cerâmica vermelha.

De modo genérico, o gás natural pode substituir todos os combustíveis atualmente em uso na indústria cerâmica, ou seja, em fornos, secadores ou atomizadores. Excetuando a geração termoelétrica, serão as substituições de óleos combustíveis em fornos, caldeiras, geradores de gases quentes e geradores de atmosferas para tratamento térmico que irão se constituir nas utilizações mais importantes para o gás natural (Sousa, 1997).

2.3. Combustão

2.3.1. Fundamentos da combustão

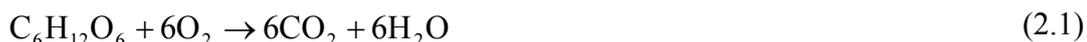
Somente no século XVIII, com a descoberta do oxigênio, é que se começou a entender as reações de combustão. Estudos feitos por Lavoisier (1743-1794) permitiram concluir que a combustão era na verdade uma reação com o oxigênio contido no ar atmosférico. Assim, o carvão, os óleos, o petróleo reagem com o oxigênio, formando outros materiais e liberando energia. É necessário, entretanto, fornecer certa quantidade de energia para que as reações iniciem. Portanto, combustão é a combinação rápida de um combustível com oxigênio e calor. Quando são queimadas substâncias que contém

carbono (petróleo, óleos, carvão etc.) ocorre à formação de dióxido de carbono (CO₂), um dos gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa (Geocities, 2006).

2.3.2. Reações químicas da combustão

Reação química é a combinação de duas ou mais substâncias, ou dois ou mais reagentes, formando os produtos desta. Para que o processo ocorra, é necessário um combustível, o material a ser queimado, um comburente, geralmente o oxigênio e uma “faísca”, para iniciar a queima (Geocities, 2006).

Nos animais e plantas; o alimento é o combustível. Considera-se a glicose como o principal e que tem fórmula C₆H₁₂O₆. A seguinte equação de combustão pode ser escrita:



Nos carros; usa-se como combustível a gasolina, o álcool ou o diesel. A gasolina tem como principal composto o n-octano C₈H₁₈. A seguinte equação de combustão para o n-octano é válida:



O álcool etílico tem fórmula C₂H₆O. Sua reação de combustão é do tipo:



Como explicar a fuligem e o monóxido de carbono (CO)? Quando ocorre falta de oxigênio no motor do carro, ocorre aquilo que chama-se de combustão incompleta; tomando o exemplo da gasolina, tem-se:

a) Com pouco O₂:



b) Com falta de O₂:



O carbono resulta na fuligem, ou seja, a fumaça preta que ocorre em motores desregulados. O CO é letal, por sua grande compatibilidade com a hemoglobina, inutilizando-a, impedindo o transporte de oxigênio para as células.

2.3.3. Classificação da combustão

A combustão de materiais pode ser classificada quanto ao estado físico dos mesmos e quanto a sua volatilidade.

Quanto ao estado físico:

- a) de sólidos (carvão, madeira, pólvora etc.).
- b) de líquidos (gasolina, álcool, éter, óleo etc.).
- c) de gasosos (metano, etano, etileno etc.).

Quanto à volatilidade:

- a) de voláteis (São aqueles materiais que, à temperatura ambiente, desprendem vapores e são capazes de se inflamar, tais como: álcool, éter, benzina etc.).
- b) de não - voláteis (São aqueles que para desprenderem vapores capazes de se inflamar, necessitam aquecimento acima da temperatura ambiente, tais como: óleo combustível, óleo lubrificante etc.).

2.3.4. Relação ar/gás e tipos de combustão

A combustão é completa quando a quantidade de ar utilizada na relação ar/gás é maior que a teórica. A quantidade de ar acima da teórica é chamada de excesso de ar. A combustão é incompleta se a quantidade de ar for menor que a teórica (ar insuficiente). Esta combustão dar origem a produtos tóxicos – monóxidos de carbono (CO), aldeídos, álcoois – e menos calor. Na combustão incompleta, parte do gás não sofre a reação de combustão por falta de oxigênio (Neri, 1998).

Diante do exposto sobre combustão, pode-se afirmar que:

- a) Há fogo quando há combustão.
- b) Combustão nada mais é do que uma reação química das mais elementares, geralmente uma oxigenação, pois o oxigênio é o principal comburente, onde associando quimicamente ao combustível, é capaz de fazê-lo entrar em combustão.
- c) Para que se processe esta reação, obrigatoriamente dois agentes químicos devem estar presentes: combustível e comburente. O combustível é tudo que é suscetível de entrar em combustão (madeira, papel, pano, estopa, tinta, alguns metais, etc.). O comburente é todo elemento que, associando-se quimicamente ao combustível, é capaz de fazê-lo entrar em combustão (o oxigênio é o principal comburente).
- d) Temperatura de ignição. Além do combustível e do comburente, é necessária uma terceira condição para que a combustão possa se processar. Esta condição é a temperatura acima da qual um combustível pode queimar.

Ainda pode-se citar três pontos sobre a temperatura:

Ponto de Fulgor – é a temperatura (uma para cada combustível), na qual um combustível desprende vapores suficientes para serem inflamados por uma fonte externa de calor, mas não em quantidade suficiente para manter a combustão.

Ponto de Combustão – é a temperatura do combustível acima da qual ele desprende vapores em quantidade suficiente para serem inflamados por uma fonte externa de calor, e continuarem queimando, mesmo quando retirada esta fonte de calor.

Ponto de Ignição – é a temperatura necessária para inflamar os vapores que estejam se desprendendo de um combustível.

Após ter visto todas estas definições, nota-se que ao abaixar-se a temperatura de um combustível, ou da região onde seus vapores fluuam, abaixo da sua temperatura de ignição, cessará a combustão. Este é um método básico de extinção de incêndios, e é conhecido como resfriamento. O agente universal utilizado no método do resfriamento é a água.

Existem ainda dois fenômenos secundários provenientes de uma combustão. São eles:

Explosão – existem combustíveis que, por sua altíssima velocidade de queima e enorme produção de gases, quando inflamados dentro de um espaço confinado, produzem o fenômeno da explosão. Como exemplo pode-se citar o TNT, a nitroglicerina e outros mais.

Combustão espontânea – certos materiais orgânicos, em determinadas circunstâncias, podem, por si só, entrar em combustão. Entre as substâncias mais suscetíveis de combustão espontânea, destacam-se: o carvão, os óleos em geral, as misturas contendo nitrato etc.

2.4. Fornos

Os fornos utilizados na indústria cerâmica vermelha podem ser classificados basicamente em dois grandes grupos: fornos intermitentes e fornos contínuos.

Pode-se definir forno como sendo uma construção, alvenaria ou metálica, dentro da qual é possível aquecer uma carga determinada a altas temperaturas. São usados fornos intermitentes e contínuos na Indústria Cerâmica. Nos fornos intermitentes, a

carga a ser aquecida é colocada em certa posição e permanece lá até alcançar a temperatura requerida, sendo depois resfriada até a temperatura ambiente e então retirada, geralmente através da porta pela qual entrou. Já os fornos contínuos funcionam da seguinte maneira: como o próprio nome diz o cozimento ou queima se faz de forma contínua, sem interrupção para descarga ou carregamento das peças; enquanto um lote de peças está chegando ao final da queima, outra quantidade igual ou semelhante está sendo iniciada, sem descontinuidade do processo. Os fornos cerâmicos contínuos surgiram como uma solução mais rentável a fabricação dos produtos cerâmicos.

Os fornos mais utilizados pela indústria cerâmica no Brasil são (Neri, 1998):

- a) fornos do tipo caieira, a lenha (intermitente);
- b) fornos do tipo chama reversível, a lenha ou óleo (intermitente);
- c) fornos do tipo plataforma (intermitente);
- d) fornos do tipo Hoffmann (contínuos);
- e) fornos do tipo túnel (contínuos).

2.4.1. Fornos intermitentes

Os fornos intermitentes são especialmente concebidos para cozeduras de pequenas séries de diversas formas e medidas. Graças aos isolamentos utilizados, especialmente fibra cerâmica, é grande a sua flexibilidade, permitindo ciclos curtos ou longos, dependendo dos produtos a cozer, tais como: barro vermelho, porcelana, sanitários, faiança, grés químico ou salgado e cerâmicas técnicas, utilizando temperaturas até 1800°C.

O emprego destes fornos ainda é muito comum no Brasil. Na Europa e em outros países, o emprego de fornos intermitentes é bastante limitado. Entretanto, apesar de seus inconvenientes, devido à necessidade de comercializar produtos personalizados e de maior valor agregado, estes fornos têm retomado seu espaço.

As principais inconveniências do uso de fornos intermitentes são:

- a) Baixo rendimento térmico, devido à grande quantidade de calor utilizada para aquecer a estrutura do forno a cada queima e à perda de calor pelos gases de exaustão na chaminé;
- b) Aquecimento irregular, com existência de pontos mais frios e mais quentes no interior do forno;
- c) Necessidade de maior número de operadores.

Pode-se citar as seguintes vantagens do uso de fornos intermitentes, tais como:

- a) Problemas de espaço para a instalação de um forno túnel são eliminados;
- b) Concepção simples e construção mais fácil e rápida;
- c) Maior flexibilidade da produção, podendo-se queimar materiais distintos e especiais, e materiais com diferentes parâmetros de queima;
- d) Manutenção sem parada da produção;
- e) Possibilidade de compensação das flutuações de mercado e sua demanda, reduzindo-se apenas o número de fornos em operação.

A Figura 2.3 mostra um forno intermitente com um elevado grau tecnológico atingido ao nível da concepção e isolamento. O uso dos mais sofisticados sistema de queima e controle, permitem construir fornos intermitentes de qualquer capacidade. Dependendo da sua capacidade e aplicação, vários tipos de portas podem ser instalado, com movimentação automática ou manual, de acordo com as necessidades de cada cliente.



Figura 2.3 – Forno intermitente com elevado grau de tecnologia. Fonte: CTGÁS (2006).

Em todos os fornos intermitentes estão instalados sistemas de controle e comando extremamente sofisticados dos quais sobressai a cabine com computador G.I.F. Há ainda possibilidade de aplicar aos fornos intermitentes de maior dimensão, sistemas semi-automáticos ou completamente automáticos de introdução e extração das vagonetas. Com capacidade que variam entre os 20 litros e os 5m³.



Figura 2.4 – Forno intermitente elétrico. Fonte: CTGÁS (2006).



Figura 2.5 – Forno intermitente elétrico de cabine para computador. Fonte: CTGÁS (2006).

Os fornos de menor volume são utilizados essencialmente em estúdios e ateliês, em laboratórios, escolas e centros de formação, sendo o tipo de forno mais aconselhado

para o uso experimental. Os de capacidade mais elevada podem equipar pequenas unidades cerâmicas, estando aptos a cozer todo tipo de produtos.



Figura 2.6 – Forno elétrico de pequeno porte. Fonte: CTGÁS (2006).

2.4.2. Fornos tipo chama reversível

Têm uma estrutura constituída de uma câmara com abóbada fechada, com piso feito de tijolos perfurados de modo a permitir a passagem dos gases da combustão para os dutos de tiragem. Sua seção horizontal é retangular ou quadrada com uma ou mais câmaras de combustão ao longo de uma ou duas paredes laterais de maior dimensão, ou então possui seção horizontal circular com seis fornalhas equidistantes entre si.

Em termos energéticos, o forno reversível é mais eficiente que o forno caieira, sendo usado nas cerâmicas de pequeno e médio porte (Neri, 1998).

2.4.3. Fornos contínuos

Os fornos tipo túnel (contínuo) consiste basicamente num longo túnel reto ou circular de superfície interior relativamente pequena. Ao longo deste túnel desloca-se um sistema de transporte dos materiais, que usualmente são carrinhos especiais que se deslocam sobre trilhos. Os materiais avançam contra uma corrente de ar que transfere calor daqueles que se encontram na seção de resfriamento e transferem esse calor para central do forno, conhecida como seção de queima dos materiais cerâmicos (Neri, 1998).

Os fornos túneis, cujo esquema de funcionamento é mostrado na Figura 2.7, são fornos mais modernos e eficientes no uso de energia. Possuem as seções de pré – aquecimento, queima e resfriamento, havendo o aproveitamento de calor de uma seção para outra. O ar quente, que sai da zona de resfriamento, é injetado na zona de queima e serve como ar de combustão. Os gases de combustão que deixam a zona de queima são dirigidos à zona de preaquecimento, aproveitando-se o calor residual.

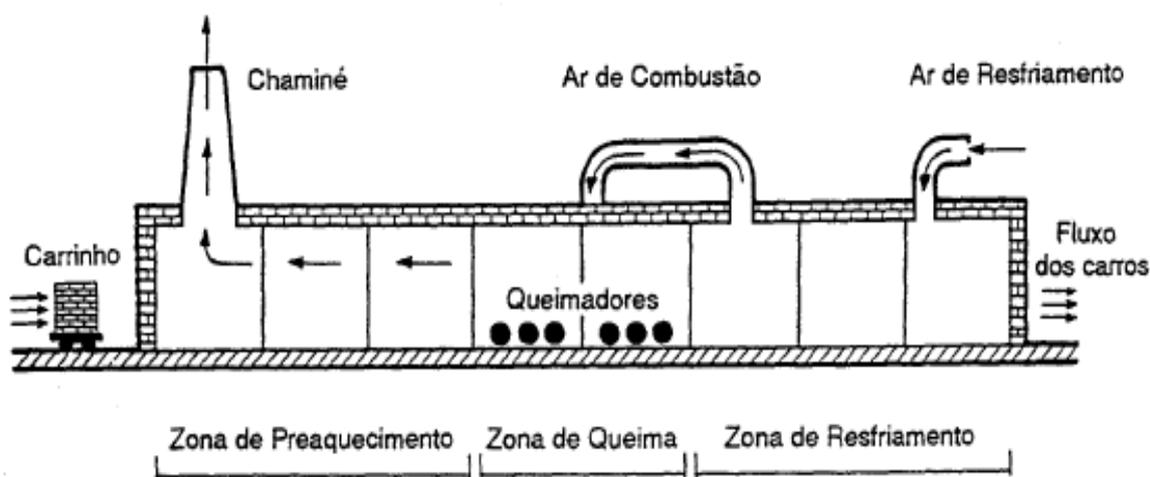


Figura 2.7 – Esquema de um forno túnel convencional. Fonte: Henriques Jr. et al. (1993).

O transporte da carga de peças cerâmicas a serem queimadas é realizado por meio de vagonetas especiais ou esteiras móveis, acionados através de sistema hidráulico automático. Este tipo de forno foi originalmente utilizado na indústria de cerâmica branca, mas devido as suas vantagens passou a ser empregado com sucesso também na indústria de cerâmica vermelha.

Os fornos túneis convencionais apresentam uma grande variedade de dimensões, de características construtivas como o aproveitamento dos gases, de ciclos de queima, de disposição de queimadores, de tipos de isolamentos empregados nas paredes e nas estruturas das vagonetas, de possibilidades de controle automático do processo. Tudo isso depende das disponibilidades econômicas e das necessidades produtivas.

Quanto as dimensões, em geral, estes fornos apresentam comprimentos entre 80 e 130 metros, altura de carga entre 1 e 2 metros e larguras entre 2 e 4 metros. Segundo o Centro de Estudios de la Energia (1980), em geral 2/5 do comprimento total do forno são reservados à zona de preaquecimento, 1/5 à zona de queima e outros 2/5 à zona de resfriamento. Os fornos podem ser construídos de maneira tradicional, onde são erguidas as paredes, ou em módulos pré-fabricados, constituídos por painéis moduláveis tanto na altura como na largura. Os ciclos de queima que normalmente se adotam em fornos túneis podem variar de 16 a 48 horas, de acordo com o tipo de forno e as características das peças a produzir.

Os queimadores, de acordo com as necessidades podem ser posicionados 100% lateralmente, para fornos de baixa largura, 100% no teto do forno, para fornos de baixa altura ou de forma mista (lateral e teto), para fornos de largura e altura elevadas. Os isolamentos empregados nas paredes dos fornos bem como nas vagonetas, vêm sendo cada vez mais aperfeiçoados, sendo que além do emprego de materiais refratários vem se fazendo uso também de fibras cerâmicas, que diminuem as perdas térmicas e, ainda, reduzem o custo e facilitam a construção dos fornos.

A indústria de cerâmica vermelha brasileira encontra-se bastante atrasada frente às novas tecnologias existentes, sobretudo, em países europeus como Espanha e Itália. Os fornos túneis são os mais utilizados em todo o mundo devido a maior capacidade produtiva e ao melhor aproveitamento da energia fornecida pelo combustível. No Brasil, as empresas estão começando a instalar fornos deste tipo, buscando melhorar sua produção e a qualidade de seus produtos. Há uma expectativa das entidades representativas do setor cerâmico de que, em médio prazo, as empresas que não passarem por essa transição deixará de funcionar. A utilização do gás natural para a queima nesses fornos é também uma tendência mundial, por ser um combustível mais nobre, menos poluente, que facilita o controle do processo de queima e a obtenção de produtos de maior qualidade. No Brasil, o uso de lenha e seus derivados, como a serragem, é bastante difundido, porém, encontra-se ameaçado. Deste modo, é importante conhecer o comportamento térmico dos fornos túneis frente à conversão para o uso de combustíveis mais nobres como o gás natural, de modo que se possa analisar a viabilidade deste processo de substituição.

Pode-se citar como vantagens do uso dos fornos contínuos:

- a) Maior rendimento térmico;
- b) Baixo ciclo de queima;
- c) Controle e aproveitamento dos gases de exaustão;
- d) Aquecimento mais homogêneo;
- e) Menor necessidade de mão-de-obra para operação.

Existem também desvantagens, como:

- a) Concepção mais complexa;
- b) Construção mais demorada e de custo mais elevado que os intermitentes;
- c) Parada de produção para manutenção;
- d) Menor flexibilidade de produção.

2.5. Conversão dos queimadores à lenha para o uso do gás natural

Segundo Santos (2001), as indústrias cerâmicas tendem a se modernizarem para que possam continuar a existir. Muitas destas empresas estão fazendo ou estudando como fazer a conversão de seus queimadores à lenha para o uso do gás natural. O conjunto de transformações necessárias ao equipamento para que se possa queimar um novo combustível com um comportamento correto, dá-se o nome de conversão. A conversão de um forno que utiliza lenha, serragem ou GLP para a utilização do GN não só é possível, como também, em decorrência do uso deste último combustível, além da melhoria das condições ambientais, ocorre melhoria na qualidade do produto final. No entanto, a conversão tem sido dificultada em função do baixo custo da lenha. Esse preço (R\$ 8,00/m³ em média) tem sido o grande empecilho na troca da matriz energética, porque o uso da lenha reduz praticamente à metade os custos do processo de produção.

O custo direto aproximado, por fornada, em um forno intermitente para 8.000 tijolos de 190 mm x 190 mm x 90 mm é em média de R\$ 200,00 com lenha, podendo se elevar até R\$ 400,00 com o gás natural. Mas esta diferença não leva em consideração, que na queima à lenha, a produção de peças de 2^a e 3^a qualidades é maior e o desperdício de peças é muito superior ao da queima a gás natural, sem contar o grande

impacto ambiental proveniente da desertificação e da poluição do ar atmosférico pelas impurezas contidas nos gases de exaustão. No caso da utilização de óleo BPF em substituição à lenha, a troca não se justifica, pois existe todo o sistema de atomização necessário para a queima à óleo, que requer uma manutenção preventiva constante, devido a resíduos tóxicos. Aliado a isto existe o grande impacto dos gases da combustão, que contém diversas impurezas, que como no caso da queima à lenha inviabiliza a recuperação da energia contida nesses gases (CTGÁS, 2006).

A conversão de fornos cerâmicos para a utilização de outro combustível requer uma análise do processo de queima e do balanço térmico do forno e uma análise econômica antes da conversão para se identificar a viabilidade ou não da mesma. Medições em campo e ferramentas de simulação que modelem o funcionamento do forno são muito úteis nessa análise (Santos, 2001).

Diante dos avanços na área de preservação ambiental, ocorridos no Brasil, o forno à lenha, muito utilizado na Indústria Cerâmica, será substituído por outros tipos de fornos que não utilizam lenha, tendo como causas principais, a escassez do combustível (madeira) na região (desertificação) e a poluição do meio ambiente quando queimada (grande quantidade de fuligem e impurezas tóxicas nos gases de exaustão). Em função disto, o gás natural se constitui no grande parceiro do setor, tornando-se o diferencial das empresas que desejam se firmar neste mercado competitivo, contribuindo para produção, qualidade e diversificação dos produtos e adoção de políticas ambientalmente corretas.

O forno reversível intermitente predomina em 99% das cerâmicas estruturais. São cerâmicas de pequeno e médio porte, que não têm condições de possuir um forno de maior eficiência (contínuo, Hoffman, etc.), o que também não se justifica devido à pequena produção.

As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram os tipos de fornos à lenha e a gás natural, respectivamente.



Figura 2.8 – Forno a lenha. Fonte: CTGÁS (2006).



Figura 2.9 – Forno a gás natural. Fonte: CTGÁS (2006).

2.6. Matéria-prima: Argila

2.6.1. Características gerais

A argila é um produto natural que queimada em forno torna-se dura e pouco quebradiça, recebendo o nome de cerâmica. (Figura 2.10). Os seus principais elementos constitutivos são a sílica e o alumínio.

Encontrada abundantemente na natureza, nas margens dos rios, nos manguezais etc., a argila é usada pelo homem para representar seus medos e alegrias por milênios. Extremamente barata e fácil de manipular, tem uma enorme elasticidade, permitindo a execução de trabalhos dos mais delicados (esculturas) aos mais rudes (utensílios de cozinha, etc.). Pode ser reciclada e mantida em seu estado natural por anos, somente

exigindo um pouco de cuidado e umidade. O valor da argila como matéria-prima para a produção de vários produtos cerâmicos baseia-se em sua plasticidade no estado úmido, dureza ao secar e rigidez ao ser queimada. Há milhares de anos já se faziam objetos de argila.

Argila é um material natural composto por partículas extremamente pequenas de um ou mais argilomineral. Argilominerais são minerais constituídos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo conter elementos de metais alcalinos - sódio, potássio - e alcalinos terrosos - cálcio, magnésio. Na natureza além dos argilominerais, as argilas estão geralmente associadas com outros materiais e minerais, como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais. Materiais naturais com granulação fina, textura terrosa e comportamento plástico quando umedecido, em geral recebem a denominação de argila. O termo não tem significado genético, sendo utilizado para materiais proveniente do intemperismo, ação hidrotermal, ou da sedimentação em ambientes fluviais, lacustres, marinhos ou eólicos. Caulins, bentonitas, argilas refratárias, terra fuller são tipos especiais de argilas que têm definições particulares decorrentes de aplicações tecnológicas, composição química/mineralógica ou origem geológica. O termo argila também é usado na classificação granulométrica de partículas. Compreende todos os produtos feitos com matérias-primas argilosas, que após queima apresentam coloração avermelhada. (Zandonadi, 1995).



Figura 2.10 – Foto demonstrativa do armazenamento da matéria-prima para fabricação posterior do tijolo. Fonte: Próprio autor (2007).

A Cerâmica é uma atividade que mantém inalterável, até hoje, os seus principais fundamentos: obter a argila, moldar, secar e queimar. São inúmeros os tipos de argila existentes. Algumas são usadas para confeccionar telhas, tijolos, manilhas, vasos de plantas etc.; outras para confeccionar pisos, azulejos, objetos etc.; para a chamada louça branca usada principalmente em banheiros, pias, vasos sanitários etc.; e ainda outras para a chamada cerâmica artística - artesanal - objetos utilitários, objetos decorativos, esculturas etc. A argila existe em toda superfície terrestre. Alguns tipos são encontrados a céu aberto e outros em minas subterrâneas. A argila quando retirada da natureza geralmente contém corpos indesejáveis, impurezas, e por isso necessita ser beneficiada através de processos mecânicos e químicos. Se for conveniente podem ser acrescentados ou retirados elementos de sua composição para usos específicos e regular sua plasticidade (ocorrência de rachaduras e esfarelamento).

As matérias-primas empregadas na fabricação dos produtos cerâmicos são de dois tipos:

plásticas – substâncias argilosas, matéria ativa (argila, caulim em cerâmica branca e talcos especiais);

desengordurantes – atuam reduzindo a retração e diminuindo a plasticidade (areia e carvão vegetal, por exemplo).

Os produtos do setor cerâmico podem ser subdivididos em:

- a) Cerâmica vermelha de massa porosa (tijolos, telhas, vasos, etc.)
- b) Cerâmica vermelha de massa semivitrificada (ladrilhos de piso, lajotas, etc.).

De acordo com a ABNT (1983), argila é “solo que apresenta características marcantes de plasticidade, quando suficientemente úmido, molda-se facilmente em diferentes formas, quando seco apresenta coesão bastante para constituir torrões dificilmente desagregáveis por pressão dos dedos; suas propriedades dominantes são devido à parte constituída pelos grãos de diâmetros máximos, inferiores a 0,005 mm”.

2.6.2. Origem e transformação

A argila se origina da desagregação de rochas que comumente contém feldspato, por ataque químico (por exemplo pelo ácido carbônico) ou físico (erosão, vulcanismo), que produz a fragmentação em partículas muito pequenas. Normalmente as jazidas são formadas pelo processo de depósito aluvial ou seja, as partículas menores (e portanto mais leves) são levadas por corrente de água e depositadas no lugar onde a força hidrodinâmica já não é suficiente para mantê-las em suspensão. As argilas assim geradas são chamadas de secundárias, já que a argila primária permanece no local onde se originou, sendo este o caso da formação das jazidas de caulino. As argilas nunca são encontradas puras, mas sim, misturadas com outras substâncias que determinam suas características. As argilas assim constituídas podem ser denominadas de argilas industriais.

Num processo inverso, de litificação, a argila pode se transformar em rocha sedimentar se um depósito de argila for desidratado e submetido a compactação (normalmente pela pressão de camadas superiores), dá origem a rochas clásticas mais finas (lutitos ou pelitos) cujos exemplos podemos citar: os folhelhos, que se apresentam bem estratificados, e os argilitos, que possuem pouca ou nenhuma estratificação (Figura 2.11).



Figura 2.11 – Foto ilustrativa da retirada da argila para armazenamento. Fonte: Próprio autor (2007).

2.6.3. Classificação das argilas

Pode-se classificar a argila segundo sua estrutura, emprego e plasticidade, como segue (<http://unoescjba.edu.br>, 2006)

2.6.3.1. Segundo a sua estrutura

Podem ser classificadas em:

- a) Laminares ou foliáceas.
- b) Caulinitas: mais puras, usadas na indústria de refratários, porcelana e louça sanitária.
- c) Montmorilonitas: pouco usadas, são muito absorventes e possuem alto grau de inchamento; são misturadas às caulinitas para corrigir a plasticidade.
- d) Micáceas: são mais abundantes e empregadas na fabricação de tijolos.
- e) Fibrosas não são usadas na fabricação de produtos cerâmicos.

2.6.3.2. Segundo o seu emprego

Podem ser classificadas em:

- a) Infusíveis: constituídas praticamente de caulim puro, após cozimento apresentam cor branca translúcida e são utilizadas para fabricação de porcelanas.
- b) Refratárias: muito puras, não se deformam até 1500°C, tem baixo coeficiente de condutividade térmica e são usadas para revestimento de fornos.
- c) Fusíveis: deformam-se e vitrificam-se a temperaturas inferiores a 1200°C e são usadas na fabricação de telhas e tijolos, material sanitário e na produção de cimento.

2.6.3.3. Segundo a plasticidade

Podem ser classificadas em:

- a) Gordas: ricas em material argiloso e pobres em desengordurantes, são plásticas e apresentam alta deformação quando cozidas;
- b) Magras: muito silicosas, geram produtos porosos e frágeis.

2.6.4. Propriedades das argilas

Segundo Tomazetti (2003) e Silva (2006), as argilas utilizadas para produção de produtos cerâmicos têm suas propriedades determinadas pela composição mineral, pela presença de matéria orgânica, sais solúveis e pela distribuição do tamanho de suas partículas. As propriedades cerâmicas das argilas são aquelas características que determinam sua conformidade e maneira de uso na produção de produtos cerâmicos.

Segundo Gonçalves (2003), as propriedades das argilas podem ser:

a) Cor

A cor não tem muita importância em cerâmica porque é alterada no cozimento. Entretanto, para a indústria do papel, a cor é muito importante, devendo ser medida com muita precisão.

b) Composição química

A composição química regula as aplicações específicas das argilas.

c) Propriedades plásticas

As argilas mais finas são muito plásticas, porém certas argilas, mesmo de granulometria grosseira, mas contendo pequena quantidade de matéria orgânica rica em humo podem ser plásticas.

A plasticidade das argilas varia com a quantidade de água. A argila seca tem plasticidade nula. Acrescentando água ela vai ganhando plasticidade até um limite máximo. Acima disso as lâminas se separam, a argila perde a plasticidade e se torna um líquido viscoso. A classificação das argilas quanto à plasticidade é feita segundo o

índice de consistência, variando de moles, médias, rijas a duras. O índice de consistência é calculado com base nos limites de liquidez e de plasticidade da argila, os quais são determinados por ensaios de laboratório (<http://unoescjba.edu.br>, 2006).

d) Retração por secagem

A retração é a propriedade que as argilas têm de variarem de volume com o teor de umidade; quando a umidade diminui, o volume acompanha, sendo a recíproca verdadeira. A retração está intimamente ligada à saída da água. A água forma vazios no interior das peças cerâmicas e, na sua saída, retrai o conjunto. Não ocorre de maneira uniforme em toda a peça, podendo deformar os objetos moldados. Varia de acordo com o teor de umidade e os tipos de argila. É uma propriedade que deve ser levada em conta para obtenção de um produto acabado de melhor qualidade. As argilas necessitam de água para obterem a plasticidade suficiente para moldagem, inevitavelmente retraindo-se durante os processos de secagem e queima. Quanto menor a quantidade de água, melhor o produto final (<http://unoescjba.edu.br>, 2006).

e) Resistência de ruptura à flexão

Esta propriedade é importante para facilitar o manuseio entre o secador e o forno sem danificar a peça. As argilas muito finas, principalmente aquelas que possuem montmorilonita e matéria orgânica são as mais resistentes.

f) Desagregabilidade em água

É importante conhecer o tempo de desagregação das argilas para se estabelecer o processo e equipamentos adequados para a obtenção da massa plástica no processo cerâmico.

g) Queima

As propriedades de queima são a retração, variações da porosidade, liberação e absorção de calor, perda de massa e mudanças petrográficas.

g1) Porosidade

A porosidade é a relação entre o volume de vazios e o volume aparente total de uma peça cerâmica (<http://unoescjba.edu.br>, 2006). Influi diretamente na absorção de água de uma peça, tornando-se assim uma propriedade importante. A porosidade também diminui:

- ❖ A resistência mecânica;
- ❖ A densidade;
- ❖ A condutividade térmica;
- ❖ A condutividade elétrica.

Alguns fatores diminuem a porosidade tais como materiais que causem a vitrificação da massa com a queima, como, por exemplo, a cal. Outros a aumentam, por exemplo:

- ❖ A presença de materiais que desaparecem durante a queima (serragem, pedaços de carvão);
- ❖ A adição de materiais porosos às argilas, como a vermiculita;
- ❖ Materiais que criem fase gasosa durante as reações químicas na queima.

h) Efeitos da temperatura

Uma maior quantidade de água presente na argila facilita a homogeneização, aumenta a plasticidade e facilita a moldagem. Porém, além de uma maior retração, gasta-se mais energia para secagem e queima.

A temperatura faz a argila sofrer dois efeitos:

- ❖ Primeiramente a secagem ou saída de água: até 150° C, saem as águas de amassamento e de capilaridade (presente nos poros preenchendo os vazios); entre 150° C e 600° C, sai a água zeolítica (presente em alguns tipos de argilas entre as moléculas);

❖ Em segundo lugar ocorrem as reações químicas: entre 600° C e 950° C, ocorre a desidratação química (perda da água de constituição das moléculas); mais de 950° C, ocorre a vitrificação e cristalização.

A qualidade de um artigo cerâmico depende, acima de tudo, da quantidade de vidro formado. Esta é a diferença básica entre os tijolos (quantidade ínfima de vidro) e as porcelanas (grande quantidade de vidro).

i) Impurezas

A seguir citam-se alguns tipos de impurezas e seus efeitos sobre a argila:

- ❖ Sílica livre: reduz a plasticidade, diminui a retração, facilita a secagem, reduz a resistência à tração, aumenta a brancura.
- ❖ Alumina livre: reduz a plasticidade, reduz o trincamento, reduz a resistência mecânica.
- ❖ Álcalis: rebaixam o ponto de fusão, aumentam a porosidade, facilitam a secagem, reduzem a plasticidade.
- ❖ Matéria orgânica: aumenta a porosidade.
- ❖ Sais solúveis: geram eflorescências.
- ❖ Óxido de ferro: diminui as características refratárias.
- ❖ Cálcio: clareia a cor da argila.

2.7. Processo produtivo da cerâmica vermelha

As seqüências de etapas para fabricação de produtos cerâmicos variam de processos mais simples como para a produção de tijolos e telhas, até processos mais sofisticados como para azulejos, pisos e louças sanitárias.

O preparo adequado das matérias primas melhora sua conformação e manuseio a cru, garantindo também melhorias no produto após a queima. A conformação envolve quatro processos (colagem, extrusão, prensagem e plástica), que vai depender da forma geométrica do objeto a ser produzido.

Os fornos de queima podem ser intermitentes (rudimentares e pouco usados atualmente) e contínuos (série de câmaras por onde as peças vão atravessando e passando por todas as etapas da queima).

Um fluxograma mais detalhado da produção da cerâmica vermelha pode ser visto na Figura 2.12, onde cada etapa, na sequência, é explicada.

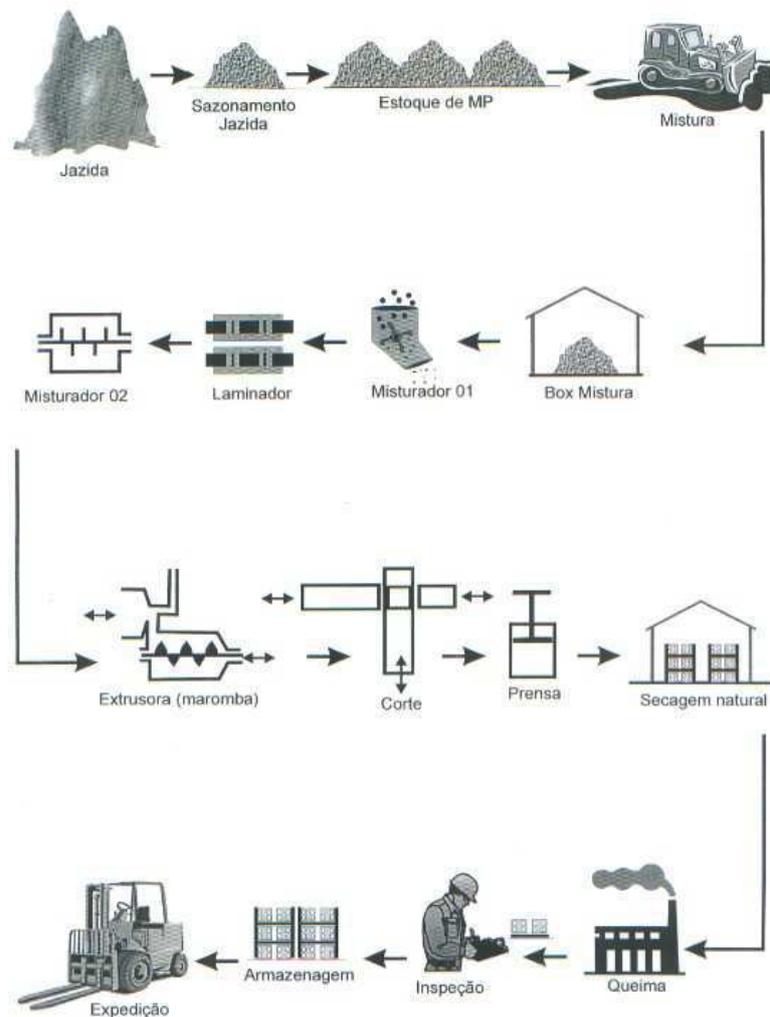


Figura 2.12 – Fluxograma de processo produtivo da cerâmica vermelha. Fonte: CTGÁS (2006).

Extração da argila: é realizada a céu aberto, utilizando-se retro-escavadeira ou equipamento semelhante. Normalmente, a mineração encontra-se próxima à empresa.

Sazonamento da jazida: é feito a céu aberto, em lotes separados, conforme as características da matéria-prima, para que ocorra a estabilidade nas reações físico-químicas, num período de 3 a 6 meses.

Estoque de matéria-prima: é feito a céu aberto, em lotes separados, conforme as características do material. Para que não haja infiltração de água, estes lotes devem ser bem compactados.

Homogeneização ou mistura: é feita manualmente ou com pás carregadeiras, conforme o percentual de cada matéria-prima utilizada, obtendo-se uma massa única e homogênea.

Box de mistura: é um galpão com uma correia transportadora que tem capacidade de armazenamento de 200 toneladas, em média, de matéria-prima já misturadas. O material preparado fica protegido das intempéries.

Misturador 01: é um equipamento que, através de movimentos circulares, permite a quebra de torrões e a homogeneização da massa juntamente com a água de mistura para a obtenção da plasticidade correta.

Laminador: é um equipamento composto de dois cilindros, responsáveis pela compactação e melhor homogeneização da massa de argila. Este processo permite uma significativa redução do consumo de energia.

Misturador 02: é um equipamento que, através de movimentos circulares, permite a quebra da argila compactada proveniente do laminador.

Extrusão: a argila homogeneizada entra no extrusor (maromba) que a comprime contra a boquilha, dando o formato de saída. O ar, ao ser retirado pela câmara de vácuo, permite que o produto forme bastões na dimensão correta para o corte e ou prensagem.

Na produção de vasos e elementos de decoração a argila vai para um torno, em lugar de ir ao extrusor. O torno é acionado por motor elétrico, e o trabalho é totalmente manual.

Corte: a massa saída do extrusor é cortada no comprimento desejado.

Prensagem: para a fabricação de telhas os elementos extrusados e cortados em formato favorável são prensados em prensa dotada de matrizes que comprimem os elementos cortados dando forma final ao produto.

Secagem: é feita em galpão coberto, contendo prateleiras fixas ou móveis, ou ainda empilhados no chão, a fim de perderem a maior parte da umidade. Permanecem aí por um período de até seis semanas. São também utilizadas, por algumas empresas, estufas para este fim, aproveitando o calor residual dos fornos, quando do seu resfriamento. O material permanece na estufa em torno de um a dois dias. A umidade final desejada, dependendo do produto, é da ordem de 3 a 4%, ocorrendo uma contração que pode variar de 4 a 10%.

Queima: o material proveniente da secagem é carregado no forno. Os fornos utilizam geralmente como fonte de energia a lenha, a serragem, os rejeitos de madeira, o óleo ou carvão mineral. O processo de queima dura aproximadamente 150 horas, em virtude do elevado nível de umidade proveniente da secagem natural.

Inspeção: é feita na saída do forno, rejeitando material quebrado, trincado, lascado, queimado em excesso e, no caso das telhas, as que possuem som chocho.

Armazenamento: é feito em área coberta, permanecendo aí até a expedição.

Expedição: efetuada através de caminhões por via rodoviária, utilizando equipamentos próprios ou fretistas.

A seguir citam-se algumas etapas básicas necessária ao processo produtivo da cerâmica vermelha.

2.7.1. Exploração das jazidas

Antes da exploração, as jazidas devem ser analisadas segundo os seguintes aspectos, para possibilitar a viabilidade técnica e econômica da mesma:

- a) Qualidade da argila;
- b) Volume total disponível de argila na jazida;
- c) Acesso para veículos pesados;
- d) Logística de distribuição ao consumidor;
- e) Necessidade de RIMA (Relatório de Impacto no Meio Ambiente).

2.7.2. Tratamentos da matéria-prima

Entre os tratamentos prévios à fabricação dos produtos cerâmicos pode-se citar a depuração, trituração, homogeneização e umidificação.

- a) *Depuração*: eliminação das impurezas que possam prejudicar o material, tais como grãos duros, nódulos de cal e sais solúveis. Estas impurezas podem dar origem a uma secagem anormal do produto, prejudicando a qualidade final do produto;
- b) *Trituração*: necessária para uma melhor homogeneização. As argilas devem ser reduzidas a pequenos fragmentos e os desengordurantes reduzidos a pó;
- c) *Homogeneização*: mistura da argila com o desengordurante;
- d) *Umidificação*: mistura de uma quantidade de água precisa para facilitar a homogeneização.

Os processos podem ser naturais ou mecânicos. Os processos naturais consistem em métodos bastante simples, como a estocagem da matéria prima em aterros sob as intempéries para a lavagem e desagregação. São métodos muito artesanais, usados apenas em olarias de pequeno porte.

Já os métodos mecânicos são mais usados e podem ser:

- a) *lavagem*: retira sais, areia, rochas, cal e cristais de gesso. É executada por processos de suspensão, sedimentação e filtragem para retirada das impurezas;
- b) *peneiramento*: retira fragmentos de rocha e pedaços maiores de matéria orgânica;
- c) *trituração*: quebra os torrões e fragmentos de rochas moles e é feita em destorroadores ou moinhos de rolos;
- d) *amassamento e mistura*: fazem a homogeneização e acerto da umidade do material. Geralmente são utilizados misturadores horizontais com filas duplas de pás helicoidais conforme a Figura 2.13;
- e) *laminação*: o laminador funciona como homogeneizador e triturador ao mesmo tempo e proporciona uma excelente homogeneização. É composto de dois rolos de velocidades diferentes que desintegram a argila e proporcionam atrito.

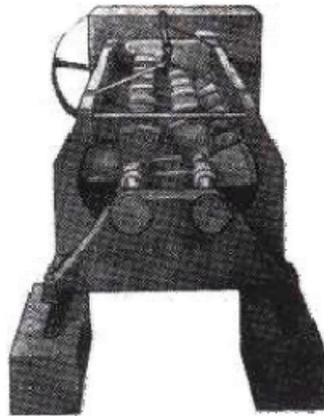


Figura 2.13 – Misturadora horizontal. Fonte: <http://unoescjba.edu.br> (2006).

2.7.3. Moldagem

É o processo que dar forma definitiva à pasta. Os tipos de moldagem estão ligados à plasticidade e à quantidade de água adicionada.

A moldagem pode ser, conforme a consistência da pasta:

- a) *À seco*: são os processos de prensagem. Produzem materiais de bom acabamento e boas características físicas. Como exemplo pode citar as telhas, tijolos maciços, azulejos e pastilhas;

- b) *Com pastas consistentes*: são os processos de extrusão, usados principalmente para confecção de peças vazadas. Usam-se câmaras de vácuo para retirar o ar, aumentando a plasticidade (Figura 2.14). São usados para confecção de tijolos furados e blocos cerâmicos;
- c) *Com pasta fluida*: usa-se o processo da barbotina. A matéria prima é utilizada no estado líquido e são aplicados processos de decantação e filtração para purificação. A barbotina é vertida em moldes de material poroso (gesso) para absorver água e o produto descola-se por retração. É usado na fabricação de louças sanitárias, porcelanas e isoladores elétricos.

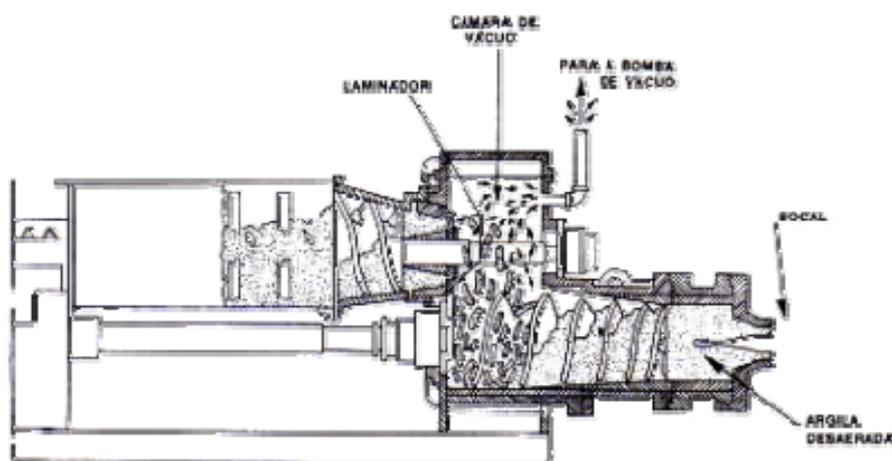


Figura 2.14 – Moldagem por bocal usando câmara de vácuo. Fonte: <http://unoescjba.edu.br> (2006).

2.7.4. Processamento térmico: secagem e queima

A importância do processamento térmico na área cerâmica concentra-se na secagem e na queima das peças já preparadas - tratamento térmico - uma vez que são durante essas operações que se dão as transformações de estrutura e composição responsáveis pela obtenção de propriedades finais, como brilho, cor, porosidade, resistência à flexão, ao ataque de agentes químicos, etc. Já na secagem, onde o corpo a verde perde significativa porção de água livre, é indispensável que a fonte energética empregada possibilite um cuidadoso controle de temperatura, umidade e homogeneidade do ambiente, de modo a agregar qualidade à produção e garantir custos

compatíveis. Na queima, estabelece-se um ciclo para o tratamento térmico das peças conformadas e secas em atmosfera controlada, a mais homogênea possível. As características finais do produto são fundamentalmente decorrentes dos fenômenos físicos e químicos que se desenvolvem ao longo do ciclo de queima, principalmente na região de mais alta temperatura, onde o emprego do gás natural mostra grande vantagem tendo em vista sua estabilidade de chama, isenta de resíduos e particulados (Lechner, 1997).

Portanto, dentre os aspectos fundamentais do processamento cerâmico voltados à utilização de fonte energética adequada, tem-se (Kotas, 1985):

- a) o forno se constitui no foco de atenção principal relacionado ao desempenho da fonte energética utilizada;
- b) o forno revela, como nenhum outro equipamento constituinte do processo cerâmico, as relações causa e efeito entre as diferentes etapas do processo;
- c) a necessidade de um rigoroso controle operacional da queima do combustível e do regime do forno.

2.7.4.1. A secagem

Em prosseguimento à conformação da cerâmica, seja em massa úmida ou semi-seca, faz-se necessária a secagem como processo preparatório à etapa de queima. As quantidades de água empregadas na conformação não são completamente eliminadas e o processo de secagem, mesmo que no produto permaneçam pequenos percentuais de umidade, considera-se concluído.

O processamento térmico pode ocorrer em várias etapas do processo cerâmico, mas sua maior importância está relacionada com a secagem e queima. Na secagem ocorre a eliminação de água livre e o corpo adquire resistência mecânica para a queima, evitando problemas de trinca e contrações diferenciais. Controla-se nesta etapa a temperatura, umidade e velocidade do produto e ambiente (Melo, 1998). Ao ser eliminada a água e ao surgirem os vazios por ela deixados ocorre uma aproximação das partículas em consequência das forças de atração eletrostática provocando o que se

chama de aglomeração ou adensamento. Após queima, a retração é consequência de fenômeno de sinterização. Sinterização é um processo de adensamento de partículas sólidas com eliminação ou redução dos poros mediante tratamento térmico, mantendo as partículas sua individualidade, mas estando ligadas entre si, seja como consequência de formação de fase líquida, seja por difusão de átomos no estado sólido. Propriedades como absorção de água, porosidade e massa específica aparente são relacionadas com sinterização (Zandonadi, 1995).

Após a moldagem, as peças ainda têm de 5% a 30% de umidade e é o processo de secagem que tira esta umidade para posterior queima. Um processo de secagem mal realizado e não uniforme pode provocar retração excessiva e descontínua da peça, com posterior fissuração. A retração da superfície é devida à evaporação da água que a submete a uma tensão elevada, dada à natureza incompressível do interior ainda molhado. A retração excessiva é causada por uma evaporação violenta, originando fendas e deformações. Para se evitar estes defeitos de secagem, é necessário não se produzir um gradiente de temperatura muito elevado.

Os processos de secagem podem ser naturais ou artificiais. Nos naturais a secagem é feita ao ar, com as peças protegidas do vento e dos raios solares. Já os artificiais, que podem ser contínuos ou intermitentes, em geral aproveitam o calor dos fornos de queima para melhor aproveitamento de energia.

A secagem é tão importante como o cozimento, porque, após a moldagem, ainda permanecem de 5% a 30% de água. O tijolo comum, por exemplo, conserva cerca de 1 kg de água após a moldagem. Se a argila for levada ainda úmida para o forno, a umidade interior ficará retida pela crosta externa, aparecendo tensões e o consequente fendilhamento. Por isso se faz a secagem prévia, controlada, e de grande importância. Se a secagem não for uniforme, aparecerão distorções nas peças, mas, se for muito lenta, a produção tornar-se-á antieconômico. A secagem pode levar de 3 a 6 semanas para as argilas moles, ou até só uma semana para as argilas rijas, quando feita ao ar, por secagem natural. Outros processos são mais rápidos e constantes. Influi muito as estações do ano: no inverno a produção diminui bastante. A secagem resultará em retração das peças e, conseqüentemente, em deformação, se não for bem conduzida.

Essa retração ocorre enquanto evapora a água absorvida. Já a água dos poros não causa deformação, porque é substituída imediatamente por ar (Bauer, 1994).

Segundo Bauer (1994), há quatro processos básicos de secagem:

a) secagem natural: é o processo comum nas olarias, mas é demorado e exige grandes superfícies. Ela é feita em telheiros extensos, ao abrigo do sol e com ventilação controlada. Às vezes é realizada em depósitos quase fechados, de madeira, colocados em torno e acima do forno, do qual aproveitam o calor;

b) secagem por ar quente-úmido: o material é posto nos secadores, onde recebe ar quente com alta umidade, até que desapareça a água absorvida. Aí então recebe só ar quente, para perder a água de capilaridade. Com isso as deformações são mínimas;

c) secagem em secadores de túnel: são túneis de alguma extensão, pelos quais se faz passar o calor residual dos fornos (de 40 a 150°). As peças são colocadas em vagonetas, que percorrem lentamente o túnel no sentido da menor para a maior temperatura;

d) secagem por radiação infravermelha: é pouco usada, em razão do custo e por só servir para peças delgadas. No entanto, dá alto rendimento e pouca deformação. É usada para peças de precisão.

Dos métodos de secagem existentes, os mais importantes para o ramo cerâmico, segundo Bristot (1996), são:

a) *Secagem por absorção* – Ocorre quando um corpo poroso com composição química que se altera frente à água, devido à absorção da mesma, entra em contato direto com massas que tenham elevado teor de água (barbotina principalmente); é o caso dos moldes de gesso (colado).

b) *Secagem por separação mecânica* – Pode ser realizada por filtração, compressão e centrifugação; entretanto, constitui na realidade uma etapa de pré-secagem, como é o caso também da absorção. É usada para certos tipos de massas cerâmicas, recuperação de esmalte, etc.; é o caso do filtro-prensa.

c) *Secagem por evaporação* – É o método universal de secagem de sólidos e líquidos não voláteis, acompanhado da absorção de calor. Sendo este o método usado universalmente para secagem de argila e corpos cerâmicos em geral.

2.7.4.2. Queima

No processo de queima controla-se o pré-aquecimento, cozimento e resfriamento, com levantamento de curvas de queima que possibilitará estudar os fenômenos físicos e químicos que determinam as características do produto final, como cor, resistência mecânica, absorção, etc. (Melo, 1998).

Durante o processo da queima, toda a água é eliminada e ocorre uma mudança na estrutura da argila. Por isso o processo de aquecimento e resfriamento das peças deve ser controlada: uma queima mais rápida é mais econômica, porém uma queima mais lenta gera produtos de melhor qualidade (<http://www.eps.ufsc.br/disserta99>).

As fases da queima são:

- a) Desidratação (150° C a 600° C): complementa a secagem;
- b) Oxidação (600° C a 950° C): queima a matéria orgânica e elimina o carvão e o enxofre;
- c) Vitrificação (950° C a 1200° C): a sílica se funde, formando pequenas quantidades de vidro que aglutina os demais elementos e fecha os poros.

Segundo Fortes (1998) e Almeida (2006), pode-se definir as etapas de queima, conforme a seqüência abaixo:

- a) Etapa da eliminação total de umidade: Zona de pré-aquecimento: 60°C à 200°C;
- b) Etapa de decomposição: Decomposição da pirita: 200°C à 540°C. Eliminação dos voláteis;
- c) Etapa da inversão do quartzo: Desidratação da caulinita: 540°C à 640°C;
- d) Etapa da queima: Início da formação da fase vítrea: 640°C à 1000°C;

- e) Patamar de queima: Responsável pela formação de fase vítrea, resistência mecânica, cor do produto: 800°C à 1000°C;
- f) Resfriamento rápido: De 1000°C à 640°C;
- g) Etapa da inversão do quartzo: 640°C à 500°C
- h) Resfriamento: 500°C à temperatura de saída do forno ao redor de 100°C.

A atmosfera dos fornos é sempre oxidante (presença de oxigênio). Os fatores determinantes do processo são:

- a) Ciclo: temperatura e tempo:
 - Características (geométricas e físicas) dos produtos;
 - Tipos de matérias primas
 - Tipo de forno

- b) Operação de controle: Temperatura, pressão, ciclo.

- c) Zonas típicas do processo:
 - Pré-forno (opcional): permite deferir parte da última fase da secagem (4-5% de umidade) imediatamente antes da queima; particularmente interessante para matérias que sofram reabsorção de água.
 - Pré-aquecimento: sistema de queima lateral (gás) e/ou sistema de recirculação de ar (ventilador centrífugo; ponteiros espalhadores).
 - Queima: grupos de gaseificação e grupos de injeção; distribuição seqüencial.
 - Resfriamento rápido: ventilador centrífugo (média pressão; registros para divisor de ar; injetores).
 - Contra-pressão: resfriamento final e definição das zonas com estabilização da massa de ar-regime de pressão; ventiladores axiais.

- d) Carga e empacotamento:
 - Compacto: Empilhamento com espaçamento entre peças (melhoria das trocas de calor entre o ar e o material a cozer; melhor uniformidade de cozedura).

- Curva de pressões: Depressões acentuadas no pré-aquecimento: elevada velocidade de arrastamento dos gases (gradientes de temperatura), entrada de ar parasita (porta, junta dos vagões); fator de diluição (queima e ar parasita) próximo de 1,5 (CO₂).

2.7.4.3. Principais defeitos na secagem e na queima

Na operação do forno cerâmico é muito importante controlar o processo de aquecimento e resfriamento, isto é, a velocidade com que a temperatura aumenta ou diminui ao longo do tempo. Esse cuidado se deve em virtude das variações dimensionais das peças (expansão e contração) que ocorrem durante o aquecimento ou resfriamento, significando que se os tempos adequados não forem obedecidos, poderão ocorrer deformações, fissuras ou quebras das peças. Cada argila tem sua curva de processamento individual, que deve ser seguida pelos operadores dos fornos. Podemos citar alguns defeitos ou perdas do material, e suas causas, submetido a uma secagem e/ou queima inadequados (Fortes, 1998):

- Rebentamento e lascamento: Excesso de umidade residual e velocidade de aquecimento demasiadamente rápido;
- Fissuras de aquecimento (fissuras com bordas abertas): Desajuste da velocidade de aquecimento e desajuste da temperatura no forno;
- Coração negro: Insuficiente oxidação da atmosfera, Rampa de aquecimento desajustada e Presença de matéria orgânica em excesso;
- Fissuras de resfriamento (Fissuras com bordas fechadas, desenhadas como um afluente, delicadas): Transição do quartzo, Desajuste da velocidade resfriamento e Massa com excesso de sílica / massa muito magra.

No lascamento do produto no forno, a umidade residual do produto, colocado em um ambiente com temperatura superior aos 100° C, tende a colocar sob pressão o interior da estrutura porosa. Se, devido a um rápido aquecimento, baixa porosidade do produto ou espessura relativamente grande dos septos, não ocorre a saída do vapor, as forças de pressão fazem lascas partes das paredes. Por esta série de razões, não é fácil de um modo geral pré-fixar o valor mais conveniente de umidade residual. Em linhas gerais, os teores de umidade residual variam numa amplitude de valores de:

- 2,5 à 3,0% - para materiais de mediana plasticidade e produtos com percentuais de vazios entre 35 e 45 %;
- 2,0 à 2,5% - para materiais mais plásticos, produtos leves de grandes dimensões, telhas;
- 0,8 à 1,0% - para produtos adaptados a fornos com ciclo curto de queima.

Nestes últimos tempos, face ao contínuo esforço para redução dos consumos energéticos, está em curso uma revisão dos limites de umidade residual. A tendência é extrair do secador materiais mais úmidos que, contudo, estejam em condições de apresentar uma estrutura robusta, apta ao empilhamento (mesmo se às vezes são necessárias máquinas especiais de manipulação), e uma porosidade suficientemente elevada, com a finalidade de se obter a secagem final com os gases de exaustão do forno.

Mais de 60 % da umidade é liberada do produto na primeira fase da secagem. Nesse período ocorre também retração, processo de grande interferência na qualidade da peça. O gradiente de umidade prevalecendo na secagem do produto é responsável pela tendência da formação de fissuras. Em algumas ocasiões as trincas são causadas mais por baixa resistência mecânica do que por pequenas contrações. O gradiente de umidade, responsável pelo risco de rachaduras, pode ser reduzido com a diminuição da velocidade de secagem. A tendência de a peça rachar também pode ser reduzida ao se aumentar o coeficiente de condutividade hidráulica da peça. Reduzir a velocidade de secagem e aumentar a temperatura do produto verde a um valor abaixo da temperatura crítica da matéria-prima são técnicas sutis, a fim de se obter produtos que não apresentem rachaduras.

2.7.5. Tempo e custo de secagem

À medida que os percentuais de umidade tendem a valores mínimos, são necessários tempos sempre mais longos para extrair quantidades iguais de água. Para compensar em parte o inconveniente, deve-se aumentar a temperatura do ar, o que influencia diretamente o acúmulo de calor pelo produto, que dificilmente é aproveitado. Na prática, são perdidas quantidades apreciáveis de calor. Além disso, a reabsorção de

umidade do ambiente externo pelo produto exige reevaporação, que se executada com ar quente de recuperação, custaria muito; se executada com os gases de exaustão do forno, o custo seria praticamente nulo devido à quantidade de calor disponível. Neste caso, porém, é necessária a construção de um ambiente adequado e o gasto de energia elétrica para desviarem-se os gases – o chamado pulmão.

2.7.6. Reabsorção de umidade pelo produto

O produto seco com ar quente perde umidade até um valor com o qual cria um equilíbrio com as condições higrométricas do ar do secador. À baixa temperatura, o ar deixa no produto uma umidade residual maior que em temperaturas elevadas. Se o produto seco é exposto ao ambiente em condições de maior umidade relativa do que a encontrada junto à superfície da peça, o equilíbrio exige uma passagem inversa de umidade, isto é, do ar para o produto. Para alcançar o equilíbrio, o percurso é muito longo e a reabsorção de umidade, mais veloz no início, torna-se cada vez mais lenta.

A alimentação do forno à noite e nos finais de semana, é feita com produto seco, acumulado, de reserva. A exposição por diversas horas ao ambiente favorece o estabelecimento do equilíbrio de umidade entre o ambiente e o produto, conforme mostra a Figura 2.15. Torna-se, portanto, inútil conduzir a secagem abaixo dos teores de reabsorção.

As argilas apresentam valores de reabsorção de algumas unidades percentuais em relação ao peso seco, que são características da origem mineralógica. Acima das condições higrométricas do ambiente, a reabsorção depende, além disso, do grau de secagem recebido e da extensão de superfície exposta. Com valores mínimos e máximos, a reabsorção vai de 0,5% a 3%; mais frequentemente se encontram teores compreendidos entre 1% e 2%. O fenômeno mais importante que segue a reabsorção é a notável redução da resistência mecânica a seco e a desagregação do material por expansão, como demonstra a Figura 2.16. Redução ainda maior de resistência por reabsorção de umidade se apresenta em produtos irregularmente secos, bons no aspecto, mas contendo fortes tensões internas ou micro fraturas (fortes diferenças nas velocidades de evaporação entre os septos internos e externos do produto furado, por exemplo).

A resistência às solicitações mecânicas, causadas no produto pelas máquinas de manipulação, é uma característica importante que a cerâmica deve ter para evitar descartes consideráveis de produção. Pequenos percentuais de reabsorção de umidade reduzem drasticamente as resistências, e os produtos com alto percentual de vazios (lajotas, tavelões etc), são aqueles mais sujeitos a tais inconvenientes.

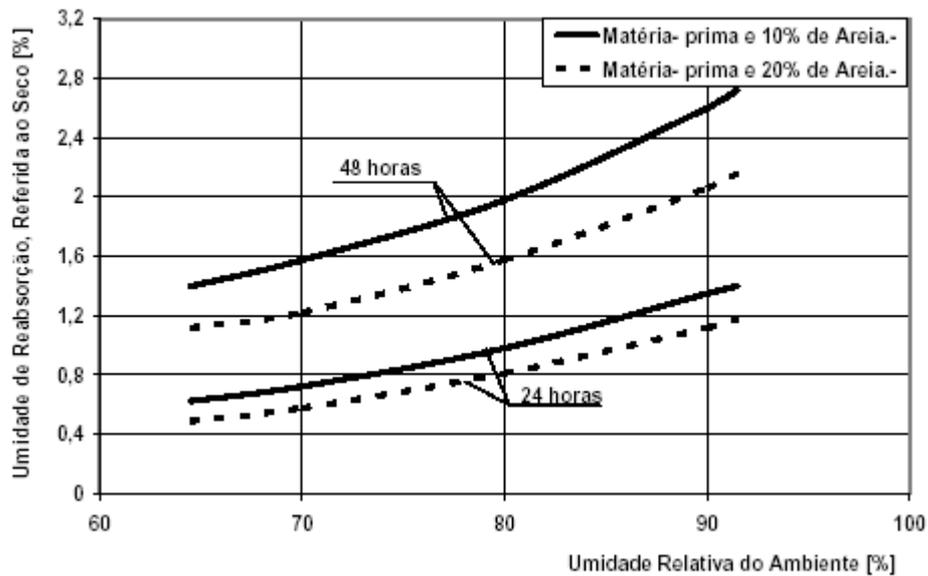


Figura 2.15 – Reabsorção de umidade pelo produto seco. Fonte: Facincani (1992)

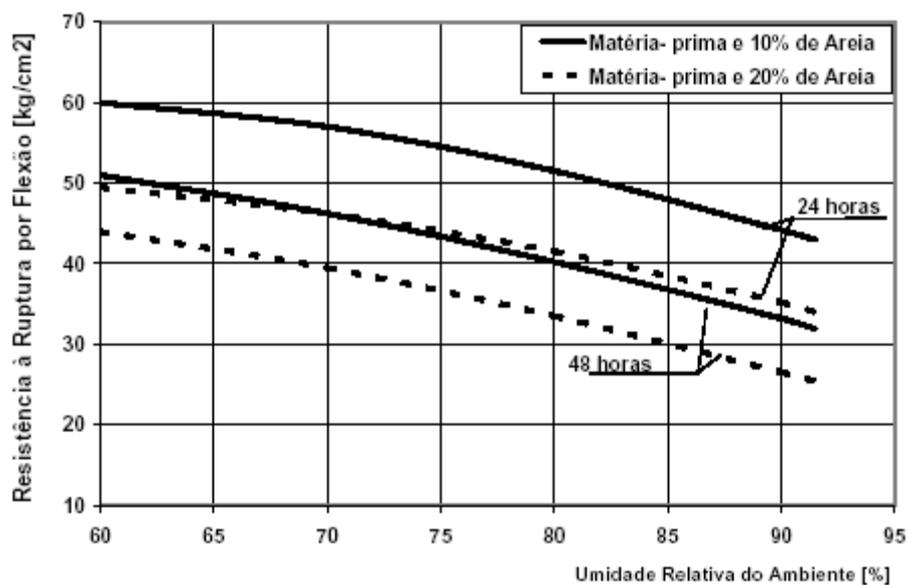


Figura 2.16 – Redução da resistência mecânica a seco. Fonte: Facincani (1992)

2.8. Produtos oriundos da indústria cerâmica (Tijolos e Telhas)

2.8.1. Fabricação dos tijolos comuns

Os tijolos comuns (Figura 2.17) são fabricados, geralmente, pelos processos mais econômicos possíveis. O barro varia de acordo com o produto que se quer obter, mas não há, comumente, necessidade de material de qualidade superior. A correção da argila, quando feita, é mínima, porque acarreta uma despesa maior. Procura-se sempre barros sem carbonatos calcários, que aumentam a fusibilidade e fazem aparecer gretas. O barro deve também ser limpo, sem muitos detritos orgânicos, que dão porosidade excessiva. Gravetos e pedras, evidentemente, são detritos indesejáveis. A moldagem é com pasta plástica consistente, em máquinas de feira. Eventualmente podem ser feitos tijolos com moldagem manual, com pasta plástica. A secagem é feita em grandes telheiros, que aproveitam o calor do forno. É comum e aconselhável que esses telheiros sejam cercados por tábuas horizontais graduáveis, semelhantes a venezianas, para melhor controle da secagem. O cozimento pode ser feito em qualquer tipo de forno, mas o usual é o intermitente nas pequenas olarias, e o forno de Hoffman (ou variantes) nas grandes olarias. A temperatura de cozimento é na ordem de 900 – 1000°C (Bauer, 1994). A Figura 2.18 apresenta as principais dimensões de tijolos cerâmicos (em centímetros).



Figura 2.17 – Tijolos comuns de nove furos. Fonte: Próprio autor (2007).

Também chamado de tijolo comum (ou tijolinho), pode ser caracterizado como um tijolo de baixo custo de fabricação (geralmente é moldado manualmente em moldes

de madeira, nas chamadas olarias) e normalmente utilizado em alvenaria de vedação (Bauer, 1994).

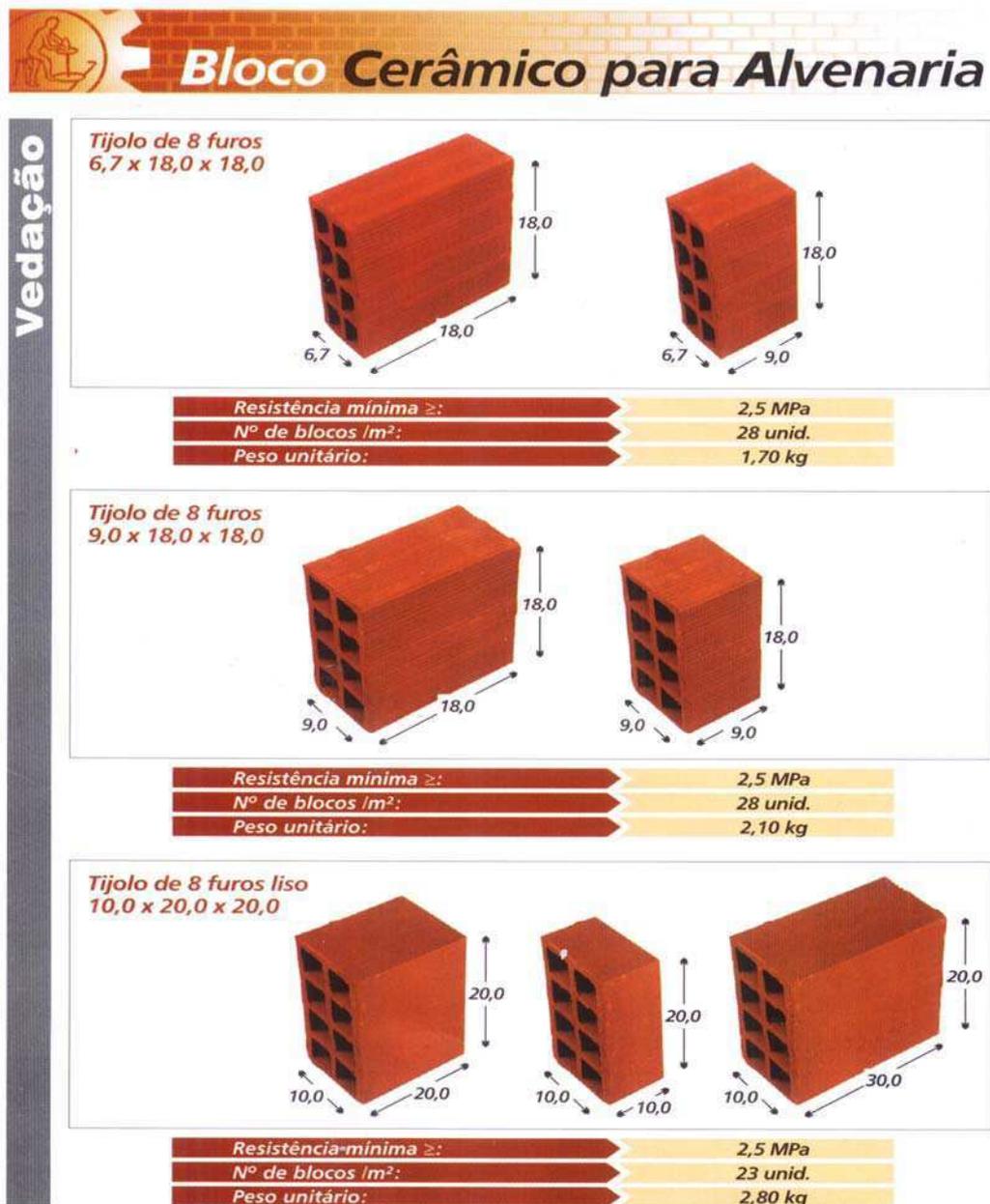


Figura 2.18 – Dimensões de alguns tijolos cerâmicos. Fonte: Folheto Indústria Cerâmica Cincera (2007).

Segundo Bauer (1994), os seguintes procedimentos podem ser adotados para avaliação dos tijolos maciços:

a) Verificar se existe a marca do fabricante na peça. Uma visita ao local de fabricação também pode fornecer informações importantes ligadas aos cuidados e controles que são ou não utilizados pelo fabricante.

b) Formato: regular ou não.

c) Dimensões: dimensões médias, medidas individuais (amostras) e desvio relativo máximo obtido.

d) Resistência: a observação da quantidade de peças quebradas no lote considerado pode ser um indício do nível de resistência, pois os únicos esforços sofridos pelas peças até então são ligados aos procedimentos de transporte. Pode-se, ainda, forçar um tijolo contra uma quina viva (de uma mesa, por ex.), e comparar o esforço necessário para quebrá-lo com o exigido por outras peças.

e) Exame de massa e da queima: as partes quebradas obtidas no teste de resistência permitem o exame visual da fratura (seção transversal que se apresenta após a quebra), onde se pode observar a presença de materiais indesejáveis (gravetos, pedras), vazios, e sinal de peça mal queimada). Ainda com relação à queima, pode-se verificar a que nível esta foi levada (se foi suficiente para transformar a argila em cerâmica ou não), molhando-se a fratura e macerando-a (friccionando-a com os dedos, por ex.), e observando se ocorre desagregação da massa, se chega a manchar os dedos, ou, em caso crítico, se a massa do tijolo volta a ser uma pasta de barro, denotando então queima insuficiente.

f) Absorção: pode-se comparar o tempo de absorção de uma determinada quantidade de água (por ex., uma caneca de café), colocada na superfície, que receberá a argamassa de assentamento.

2.8.2. Bloco cerâmico

Chamado também de tijolo baiano, é o bloco fabricado com matéria-prima (barro) em uma linha de produção bem definida, com preparação da matéria-prima em equipamentos como desagregadores, homogeneizadores e laminadores, consistindo em um barro de qualidade superior ao utilizado na fabricação de tijolos comuns, e são moldados em marombas saindo da boquilha (matriz) em feiras contínuas, onde são cortados nos tamanhos desejados quanto ao seu comprimento (Bauer, 1994).

2.8.3. Telhas comuns

A fabricação das telhas comuns é feita quase pelo mesmo processo empregado para os tijolos comuns. O barro deve ser mais fino e homogêneo, nem muito gordo nem muito magro, a fim de ser impermeável sem grande deformação no cozimento. A moldagem varia. Pode ser feita por extrusão, seguida de prensagem, ou diretamente por prensagem. As prensas são geralmente rotativas, como a prensa revólver. A secagem deve ser mais lenta que os tijolos, para diminuir a deformação. O cozimento é feito nos mesmos tipos de fornos (Bauer, 1994).

2.8.3.1. Tipos de telhas

A Figura 2.19 mostra alguns tipos de telhas (www.hinkel.arq.br/hhtelhas). As telhas cerâmicas podem ser agrupadas em dois tipos, as de encaixe e as de capa e canal. As de encaixe apresentam em suas bordas saliências e reentrâncias que permitem o encaixe (acoplamento) entre elas, quando da execução do telhado (Bauer, 1994).

Segundo Bauer (1994), dentre as telhas de encaixe encontramos a telha tipo francesa, a romana e a termoplan. A francesa é conformada por prensagem; possui, além dos encaixes laterais, um ressalto na face inferior para apoio na ripa. A romana é conformada também por prensagem, apresentando uma capa e um canal interligados (na mesma peça). A termoplan é fabricada por extrusão, apresenta furos ao longo de seu comprimento que permite a passagem do ar, com o intuito de melhorar o desempenho térmico da telha.

As telhas cerâmicas de capa e canal apresentam formato de meia-cana, fabricadas pelo processo de prensagem, caracterizadas por peças côncavas (canais) que se apoiam sobre ripas do telhado e por peças convexas (capas) que por sua vez se apoiam nos canais. Os canais apresentam um ressalto na face inferior, para apoio das ripas, e as capas geralmente possuem reentrâncias com finalidade de permitir o perfeito acoplamento com os canais; tanto as capas quanto os canais apresentam detalhes (encaixes, apoios etc.) que visam impedir o deslizamento das capas em relação aos canais. São três os tipos de telhas de capa e canal: a colonial, a paulista e a plan.

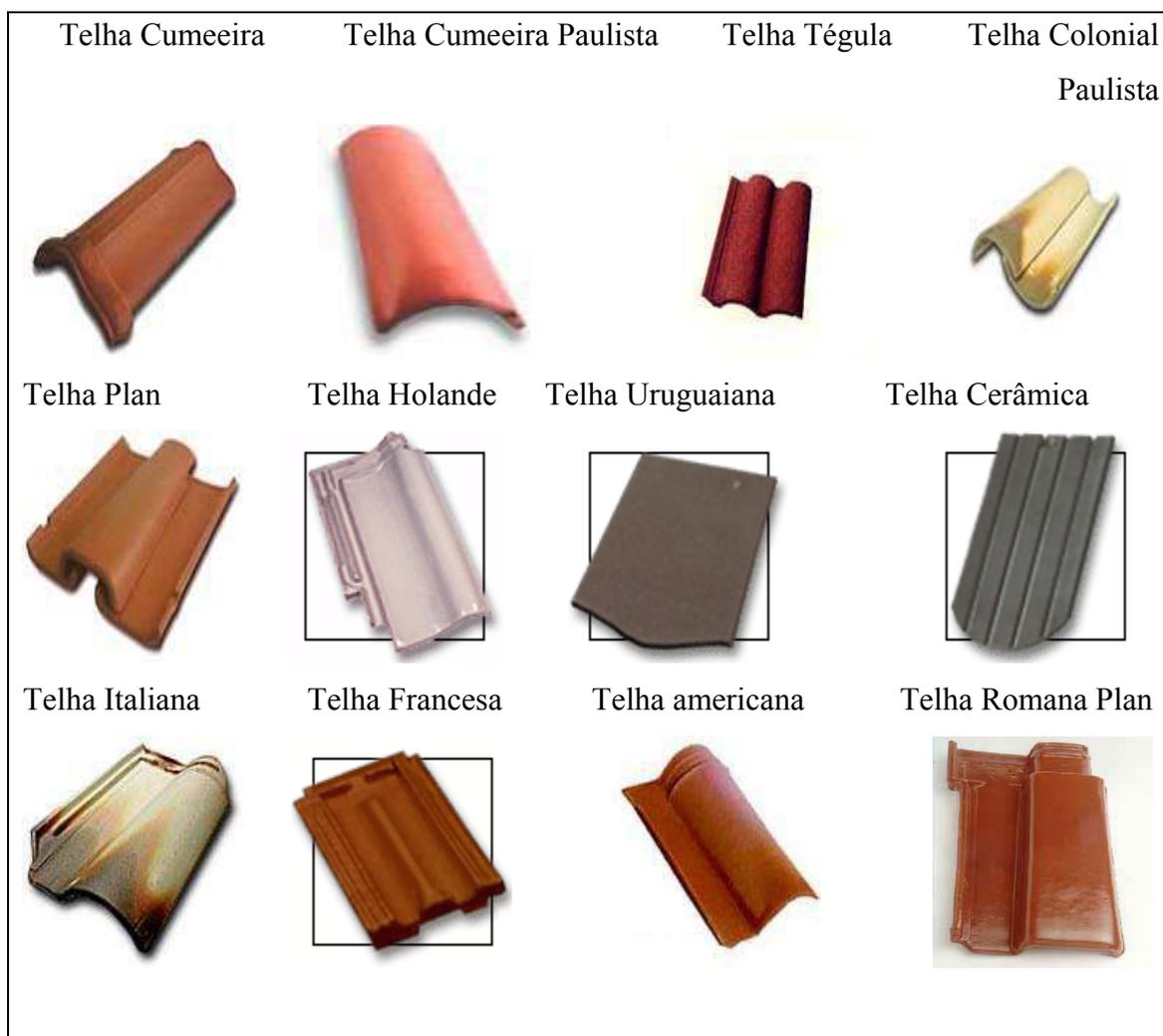


Figura 2.19 – Quadro ilustrativo de 12 tipos de telhas. Fonte: Folheto da Indústria de Cerâmica Cincera (2007).

2.9. Indústria de cerâmica brasileira: aspectos energéticos, tecnológicos, sociais e ambientais

2.9.1. Panorama tecnológico energético

Ao longo dos anos o setor da indústria de cerâmica vermelha tem experimentado as mais diversas mudanças referentes à política energética, principalmente quando o combustível utilizado é derivado do petróleo. Esta instabilidade leva o ceramista a procurar alternativas energéticas, na tentativa de adequar os seus custos produtivos à realidade do mercado consumidor, para permitir a sobrevivência da empresa (Dadam et al., 2006).

Segundo Abreu e Guerra (2000), as fontes e energia mais utilizadas nas indústrias de cerâmicas, no Brasil, são:

a) Óleo combustível (o tipo mais utilizado é o BPF).

Vantagem: Baixo custo e fácil manutenção.

Desvantagens: Considerado um produto "sujo", porque tem a possibilidade de emitir fumaça negra. Utilização restrita se considerar o uso de outros combustíveis como o dos gases combustíveis. Na queima emite gases de exaustão com enxofre. Necessidade de aquecimento para o uso.

b) Lenha.

Vantagem: Baixo custo.

Desvantagens: Manuseio trabalhoso. Necessidade de grande área para estoque. Queima ineficiente.

a) Gases combustíveis (GLP, gás natural, gás canalizado).

Vantagens: Facilidade de controle e operação. Queima limpa. Queima eficiente.

Desvantagens: Área para estoque (exceto no caso do gás canalizado). Preço elevado, se comparado com outros combustíveis. Necessidade de maior controle de segurança.

b) Energia elétrica

Vantagens: Simplicidade e facilidade operacional. Ausência de ruído. Ausência de poluição.

Desvantagem: Preço elevado.

Apesar da expectativa de escassez prevista para os próximos anos, o óleo BPF e a lenha, são os combustíveis mais utilizados na indústria de cerâmica estrutural, justamente porque é menos desenvolvida tecnologicamente e seus fornos na maioria das vezes, são do tipo abóbada e do tipo Hoffmann. Aqui, o uso da lenha e seus derivados, como a serragem, é bastante difundido, porém, encontra-se ameaçado. No caso da lenha a ameaça é devida às crescentes barreiras impostas pela legislação ambiental, no que diz respeito ao corte de madeiras nativas, a sua disponibilidade cada vez menor, os níveis de emissão de CO₂, o difícil controle da queima devido às variações no seu teor de umidade frente às mudanças climáticas, o maior número de funcionários para o manuseio e a necessidade de áreas de estocagem cobertas e de transporte interno. Já no caso dos derivados de madeira, a ameaça encontra-se no aumento da geração de energia elétrica a partir da biomassa no Brasil, previsto para os próximos anos, e no aumento da utilização destes derivados na fabricação de produtos para a indústria moveleira, como é o caso dos aglomerados.

Diante do exposto, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos em várias regiões do país, visando à busca de novas tecnologias para o setor, um aperfeiçoamento do produto e uma racionalização no consumo de energia. Neste sentido, o gás natural aparece como uma alternativa atrativa. A utilização do gás natural para a queima nesses fornos é também uma tendência mundial, por ser um combustível mais nobre, menos poluente, que facilita o controle do processo de queima e a obtenção de produtos de maior qualidade.

A conversão de fornos construídos para a queima de combustíveis sólidos e óleos pesados para o uso de gás natural comprovam que o uso de tal combustível permite imprimir um ritmo mais forte no aquecimento da carga, notando-se uma economia energética de aproximadamente 20% (Reeds, 1991).

Com a introdução do gás natural na matriz energética do país, principalmente com a construção do gasoduto Bolívia-Brasil, surge a expectativa para os ceramistas de uma solução mais duradoura para questão “combustível”, mas os investimentos para a

conversão dos fornos ainda não são expressivos, principalmente em um setor composto por pequenas empresas e que historicamente trabalha com margem de ganhos reduzida.

Investindo na modernização das indústrias, na adoção de processos de fabricação mais eficiente, na formação de profissionais especializados e no uso de um melhor combustível – GN, o empresariado do setor de cerâmica vermelha terá condições de conquistar fatias também do mercado no exterior.

2.9.2. Panorama social e ambiental

A cerâmica vermelha, classe à qual o tijolo pertence, é utilizada pela humanidade desde tempos remotos. O Brasil apresenta um atraso de mais de 50 anos quando comparado com os europeus. A indústria brasileira opera com sistemas antiquados e rudimentares. Esse atraso tecnológico é caracterizado pela origem em pequenas empresas familiares, que, em sua maioria, mantém-se no limiar mínimo da sobrevivência, e ao baixo grau de conhecimento e investimento necessário ao início das atividades. Tapia e Villar (2000) citam a faixa de 8.500 a 11.000 empresas no país, empregando em torno de 250.000 pessoas. Por representar um setor de grande importância na geração de empregos e na distribuição de renda, tem merecido a atenção de setores do governo, institutos de pesquisa, universidades e entidades diversas.

Não há como negar a importância do setor de cerâmica vermelha, também conhecida como cerâmica estrutural, dentro do próprio setor cerâmico e em toda cadeia do Macro Complexo da Construção Civil. A ABC (2003) mapeou milhares de empresas espalhadas por todo o país, produzindo, principalmente, blocos de vedação, telhas e componentes de lajes, além de blocos utilizados em alvenaria estrutural, pisos extrudados, manilhas (tubos cerâmicos) e elementos vazados.

Segundo dados do SENAI/CET (1996), empresas de pequeno porte representam 80% das empresas industriais, responsáveis por 48% da produção nacional, movimentando 42% da massa salarial, garantindo 70% de empregos e responsabilizando-se por 21% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional.

As unidades produtoras de cerâmica vermelha enquadram-se como de pequeno e médio porte, utilizando, em geral, tecnologias ultrapassadas. A produtividade média do segmento (~12.000 peças/operário.mês) é baixíssima, quando comparada com o padrão europeu de 200.000 peças/operário.mês. Verifica-se uma grande defasagem tecnológica tanto em termos de maquinário e nível de automação, como no próprio processo de produção em todas as suas quatro etapas básicas, a saber: extração e preparo das matérias-primas, conformação, secagem e queima.

O volume de matérias-primas manuseado pelo segmento é enorme, cerca de 83 milhões de ton/ano. A exploração de argilas, feita de forma não racional por um grande número de empresas, pode causar sérios problemas ao meio ambiente e mesmo escassez de matérias-primas, como já observado em alguns pólos produtores; o combustível empregado na grande maioria das empresas é a lenha, em várias regiões advindas de florestas naturais e até mesmo de mangues. A grande maioria das pequenas empresas utiliza fornos de baixíssima eficiência energética.

No global, as empresas do segmento de cerâmica vermelha geram centenas de milhares de empregos diretos, movimentam mensalmente milhões de toneladas de matérias-primas argilosas e faturam valores anuais superiores a outros importantes segmentos do setor cerâmico.

As atividades associadas à indústria de cerâmica estrutural são a extração de argila, o processo produtivo e o co-processamento (Abreu e Guerra, 2000). Dentre essas atividades a que produz maior impacto ambiental é a extração de argila, porém, é no processo produtivo que se pode encontrar o impacto ambiental associado às emissões atmosféricas dos fornos. Tal emissão depende do combustível utilizado e do tipo de forno. Os combustíveis alternativos menos agressivos ao meio ambiente são: gás natural; gás liquefeito de petróleo; bagaço de cana-de-açúcar; turfa; carvão vegetal; resíduos oleosos; finos de carvão; sucata de pneus; carvão energético; outros.

As vantagens da utilização de um combustível menos agressivo ao meio ambiente, está na possibilidade da Certificação Ambiental (ISO 14.000), maior facilidade da renovação da licença ambiental, na melhor qualidade do produto e menor possibilidade de peças com defeito.

No co-processamento pode-se misturar à argila, a turfa ou finos de carvão e assim diminuir a quantidade de combustível a ser queimado por milheiro de produto. Como por exemplo, 4% de turfa em base seca misturada à massa cerâmica equivale a uma substituição de aproximadamente 20% de lenha ou óleo e ainda determina uma queda no consumo de 20%, totalizando cerca de 40%.

Esse tipo de indústria na maioria das vezes não tem empregados especializados e possui uma relação trabalhista do tipo informal, sem vínculos e não obedecem a legislação vigente, porque o operário em algumas empresas trabalha além das 8 horas, inclusive sábados, domingos e feriados, sem direito, a receber horas extras e outros benefícios sociais. Em algumas empresas, pode-se detectar trabalho infantil. Na maioria delas, os trabalhadores podem apresentar problemas pulmonares e outros por falta de proteção, contra poeira e outros gases. Esse contexto arbitrário em relação a força de trabalho e também ao meio ambiente, leva ao não investimento em tecnologias mais avançadas e inviabiliza a utilização dos combustíveis menos poluentes. Tais procedimentos viabilizam um lucro maior e tendem a baixar o preço do produto no mercado, praticando uma concorrência predatória. Esse mesmo tipo de concorrência provocou a mudança de comportamento dos empresários, que estavam em regiões nas quais o sindicato dos trabalhadores era mais atuantes. Por não se comportarem de maneira tão negativa, algumas empresas tem optado por se reestruturar, procurando maximizar, em todos os sentidos, a eficiência.

Outro problema de ordem social e que não se pode deixar de citar, é que a pobreza é uma das principais causas de depredação do meio ambiente. O trabalho é energia em transição e esse, realizado por um ser humano, produz um valor que é intrínseco a qualquer mercadoria produzida. O pagamento realizado por esse trabalho produzido deve ser no mínimo aquele que permita a reprodução de sua força de trabalho com dignidade. Se algumas empresas desse setor apropriam-se dessa força de trabalho sem lhes pagar o salário mínimo estipulado por lei, esta colaborando indiretamente para a degradação do meio ambiente. Caso exista a apropriação da força de trabalho infantil, então está prejudicando não só essa geração, mas também as futuras, porque essas crianças estão deixando de freqüentar a escola e prejudicando a formação de sua cidadania.

Na indústria de cerâmica de pisos e revestimentos, além dos problemas da extração da argila, que são os mesmos que os do setor de cerâmica estrutural, ainda apresentam outros relacionados com o meio ambiente, advindos da produção, porém em termos energéticos, pode-se citar a mudança que as empresas então pretendendo implantar: a troca da utilização de GLP por gás natural. Essa troca ainda não se processou na maioria das cerâmicas de pisos e revestimentos por não haver rede de distribuição do gás natural suficiente para atendê-las de modo eficiente e por problemas criados por contratos com cláusulas de "take or pay" que obriga o contratante a pagar a quantidade de gás contratada, tendo utilizado-a ou não. Os ceramistas que conseguirem conectar-se ao gás natural, também têm intenção de implantar a co-geração para melhor aproveitamento dos gases de escape e para produção de eletricidade.

A indústria brasileira de cerâmica tem muito que aprender e melhorar quanto à eficiência energética e ao meio ambiente. A primeira, porque agora está dando os passos iniciais rumo a esses dois itens. A segunda, porque mesmo tendo um parque industrial desenvolvido, ainda necessita entender que a eficiência energética não se refere somente aos equipamentos em si, mas também a maneira de conduzi-los e ao preparo da matéria prima. O treinamento de mão-de-obra deve ser colocado em lugar de destaque porque não adianta ter um equipamento sofisticado se não houver alguém capaz para manejá-lo. A procura de combustível alternativo deve ser constante, uma vez que, essa indústria é energia-intensiva. Os órgãos do governo encarregados pelo setor ambiental devem estar atentos aos tratamentos de resíduos, a poluição causada tanto pelos gases, quanto pela poeira, pela contaminação do ar, dos rios e dos seres vivos.

2.10. O estado da arte na secagem e queima de materiais cerâmicos

Baseado na literatura sobre o assunto, esta pesquisa apresenta uma revisão bibliográfica, no sentido de evidenciar a importância do tema.

Abbakumov (1968) apresenta um modelo de forno cerâmico que considera a condução unidimensional ocorrendo na carga, onde o regime permanece e fluxos contínuos foram assumidos. O modelo calculou o consumo de combustível em cada queimador e apresentou estimativas do perfil unidimensional de temperatura dos gases e

da carga. Entretanto, o modelo não correlaciona todos os parâmetros conjuntamente, e a precisão é limitada.

Gardiek e Scholz (1981) assumiram um modelo de forno onde a carga tinha uma temperatura uniforme em cada seção transversal e que ela movia-se continuamente. As perdas de calor, as infiltrações e os vazamentos de ar foram negligenciadas. O modelo assume a zona de queima como sendo bem servida por queimadores, garantindo uma temperatura constante dos gases na direção axial. O modelo é limitado quanto a precisão, mas permite um entendimento dos princípios físicos do processo de queima em fornos túneis.

Abbakumov e Mociu (1981) propuseram um modelo de forno que considera as equações de balanço de energia e balanço de massa de gases e da carga, somente na zona de queima do mesmo. O modelo considera a transferência de calor em regime permanente. Os resultados obtidos apresentam boa concordância com dados experimentais.

Dugwell e Oakley (1988) apresentaram um modelo de forno no qual foi considerada a condução transiente bidimensional na carga. As temperaturas da carga e dos gases foram calculadas. Entretanto, segundo Yu (1994), este modelo não era condizente com as características dinâmicas de um forno túnel.

Yu (1994) apresentou um modelo matemático que descreve os processos dinâmicos de um forno túnel. Foram feitas simulações com duas diferentes atmosferas, um perfil de temperatura dos gases e três diferentes tipos de estruturas isolantes de vagonetas. Os resultados obtidos apresentam uma boa concordância com a situação prática, mostrada pelos dados experimentais apresentados no trabalho de Xu (1984).

Padrós (1995) mostra em seu trabalho a importância do emprego do forno túnel intermitente. O emprego destes tipos de fornos ainda é muito comum na indústria de cerâmica vermelha brasileira. Na Europa e em outros países, o uso de fornos intermitentes parecia estar terminado, se limitando exclusivamente a fabricantes, que por tradição ou necessidade utilizavam esses fornos para queima de seus produtos. Entretanto, apesar de seus inconvenientes, segundo Padrós (1995), devido a necessidade

de comercializar produtos personalizados e de maior valor agregado, estes fornos têm retomado seu espaço.

Justo (1999) apresentou em seu trabalho um modelo para simulação de um forno intermitente com tiragem ascendente. Este autor utilizou o método dos volumes finitos e considerou queimadores utilizando gás natural queimado em condições estequiométricas. A análise foi realizada utilizando um sistema de coordenadas tridimensionais considerando o problema sob a condição de transferência de calor através de um processo convectivo/difusivo em regime transiente. Seus resultados para a distribuição de temperaturas da atmosfera e da estrutura do forno, apresentaram boa concordância com um caso prático de um forno existente, comprovando a importância da transferência de calor por convecção na atmosfera do forno.

Santos (2001) apresenta em seu trabalho uma análise do comportamento térmico de um forno túnel, com vistas à conversão da queima de serragem para gás natural. Uma formulação matemática foi proposta para simular o comportamento térmico do forno, levando em considerações as trocas de calor entre seus diferentes componentes. Um programa computacional foi desenvolvido para resolver a formulação. Foram medidos diferentes variáveis como temperatura, pressão e composição dos gases ao longo do forno. Os resultados teóricos obtidos com simulações do forno operando com serragem apresentaram boa concordância com os resultados experimentais. Simulações com gás natural também foram realizadas para verificar as modificações no comportamento térmico do forno, devidas à conversão do combustível, e permitir futuras análises de viabilidade para o uso do gás natural na cerâmica vermelha.

Nicolau et al. (2002) desenvolveram um programa de simulação numérica, em diferenças finitas, o qual foi utilizado na previsão do comportamento de um forno contínuo tipo túnel de 80 m de comprimento, com seis fornalhas para queima, usando como combustível a serragem e posteriormente o gás natural. Resultados experimentais são comparados com os valores obtidos na simulação, incluindo as temperaturas em diversos pontos e o consumo de combustível. Balanços foram realizados, mostrando a destinação de cada parcela da energia proveniente da queima do combustível, bem como o desempenho do forno como um todo. A implantação do gás natural no forno representou um grande aprendizado para o setor de cerâmica vermelha, demonstrando

sua viabilidade térmica, bem como suas vantagens operacionais, quando comparados com os combustíveis sólidos.

Nascimento (2002) apresenta um estudo analítico/numérico/experimental da secagem de tijolos cerâmicos. Vários modelos matemáticos tridimensionais transientes para prever a transferência de calor e/ou massa foram desenvolvidos. Todos os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais e os coeficientes de transporte de massa foram determinados, usando a técnica do erro quadrático mínimo. Um excelente ajuste foi obtido.

Avelino (2006) apresenta em seu trabalho um estudo numérico da secagem de tijolos vazados. Um modelo matemático transiente foi apresentado para prever a transferência de massa e calor e simular a distribuição do teor de umidade e temperatura no interior do sólido. O método dos volumes finitos e a modelagem matemática utilizada para obtenção da solução numérica foram adequados. Neste sentido, a solução pode ser usada para prever processos transientes de secagem e aquecimento em tijolos cerâmicos vazados.

Almeida (2009) mostra em seu trabalho um estudo teórico e experimental sobre secagem de tijolos cerâmicos vazados em estufa e em secador industrial tipo túnel de fluxo cruzado, visando otimizar o processo de secagem. Um modelo matemático para descrever a transferência de calor e massa entre o ar e o produto que considera as propriedades termo-físicas variável, a porosidade do leito e a condensação do vapor de água no processo, foi apresentado. A solução numérica das equações governantes foi realizada usando o método dos volumes finitos. Foi desenvolvido um código computacional em linguagem do Mathematica®, para a obtenção dos dados numéricos. Para validar a metodologia numérica, foram realizados experimentos de secagem em tijolos cerâmicos vazados industriais, em estufa e em secador industrial tipo túnel. Resultados da temperatura, umidades absoluta e relativa do ar, e do teor de umidade, dimensões e temperatura do sólido durante o processo de secagem ao longo do secador, foram analisados e comparados com os dados experimentais. O autor concluiu que a secagem com temperatura variável (50 à 100°C) e umidade relativa alta (70 à 85%), assegura tijolos com excelente qualidade.

Silva (2009) mostra em seu trabalho um estudo das simulações computacionais capazes de prever o comportamento de variáveis como teor de umidade, temperatura e tensões no interior dos tijolos cerâmicos, demonstrando que é possível obter um processo de secagem mais rápido e otimizado, evitando desperdícios de matérias-primas e economia de combustíveis. Buscando melhorias para o processo de secagem de tijolos cerâmicos, o autor apresenta um estudo numérico e experimental da secagem de tijolos vazados.

CAPÍTULO III

MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

O combustível utilizado nesta pesquisa foi o gás natural. Ele foi utilizado de duas formas: como combustível para aquecer o forno cerâmico e na modelagem matemática energética e exergética proposta.

O gás natural que será utilizado na modelagem matemática proposta, apresenta a seguinte composição química em base molar, conforme Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Composição do gás natural da Paraíba.

Metano	CH ₄	87,563%
Etano	C ₂ H ₆	9,586%
Propano	C ₃ H ₈	0,423%
Butano	C ₄ H ₁₀	0,086%
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,050%
Hexano	C ₆ H ₁₄	0,061%
Nitrogênio	N ₂	0,982%
Gás Carbônico	CO ₂	1,247%
Outros		0,002%

O gás natural é queimado à seco fornecendo produtos de combustão cuja composição em base molar é dado na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Produtos da combustão do gás natural em base molar

Dióxido de carbono (CO ₂)	7,80%
Monóxido de carbono (CO)	0,20%
Oxigênio (O ₂)	7,00%
Nitrogênio (N ₂)	85,00%

Nos experimentos, o gás natural utilizado foi o butano. Ele foi adquirido no comércio local de Campina Grande-PB, e armazenado em cilindros com capacidade para 190 kg cada. Na Figura 3.1 pode ser vista uma ilustração dos cilindros utilizados para armazenamento do gás natural.



Figura 3.1 – Vista frontal dos cilindros contendo gás natural. Fonte: Próprio autor (2007).

3.2. Metodologia

3.2.1. Experimental

3.2.1.1. Descrição do forno construído e analisado

O forno/secador experimental que utiliza o gás natural como combustível foi projetado por pesquisadores da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da UFCG e financiado pelo CNPq/CT – PETRO. O forno, construído com tijolo refratário, apresenta um total de seis queimadores que operam com gás natural. As Figuras 3.2 – 3.11 ilustram detalhes da construção do forno/secador em estudo.

O gás natural circula por toda dimensão do forno/secador, passando por canais nas partes inferiores, laterais e superiores. O gás entra e percorre todo o forno, sem apresentar contato com o produto, proporciona uma secagem e queima homogênea no tijolo. A Figura 3.2 mostra os canais por onde o gás natural circula, na parte inferior do forno.



Figura 3.2 – Foto ilustrativa dos canais por onde o gás é distribuído de forma homogênea. Fonte: Próprio autor (2005).

A base apresenta uma largura de 1,95 m, comprimento de 1,90 m e altura de 0,70 m. O forno/secador mede 1,90 m de altura, 1,64 m de profundidade e 1,62 de largura. As medidas dentro do forno são as seguintes: 1,13 m de profundidade e 1,15 m de largura. Como é em forma de abóbada, seu teto mede: 1,20 m na parte mais alta e 0,82 m na parte mais baixa. O forno/secador é reforçado com cantoneiras de ferro em forma de L de 1,5 por 3/8” presas por parafusos de 5/8”. As Figuras 3.3 a 3.8 ilustram outros aspectos da construção do forno/secador.

A tubulação do gás é composta de tubos de aço sem costura para alta pressão com 1/2” de diâmetro. Na saída dos cilindros, as válvulas reguladoras de pressão estão calibradas para 1,5 kgf/cm² e a pressão dentro do botijão entre 6 e 7 kgf/cm². As Figuras 3.9 a 3.19 ilustram detalhes do sistema de gás e queimadores.



Figura 3.3 – Foto da construção do forno, mostrando uma entrada para queimador.
Fonte: Próprio autor (2005).



Figura 3.4 – Vista do interior do forno (teto em forma de abóbada). Fonte: Próprio autor
(2005)



Figura 3.5 – Vista lateral do parafuso que prende a cantoneira de ferro ao forno. Fonte: Próprio autor (2005).



Figura 3.6 – Cantoneira de ferro para reforço forno/secador. Fonte: Próprio autor (2005).



Figura 3.7 – Construção da parte superior do forno secador. Fonte: Próprio autor (2005).



Figura 3.8 – Forno/secador em estudo. Fonte: Próprio autor (2005).



Figura 3.9 – Vista lateral dos seis queimadores do Forno/Secador. Fonte: Próprio autor (2005).



Figura 3.10 – Vista de um queimador operando com gás natural no forno construído com tijolo refratário. Fonte: Próprio autor (2007).



Figura 3.11 – Vista dos seis queimadores operando com gás natural. Fonte: Próprio autor (2007).

A porta do forno/secador é toda de ferro bem como sua fechadura; na parte interna da porta há uma boa vedação feita com fibra de amianto que impede a perda de calor para o meio externo. A chaminé, por onde são expelidos os gases de combustão, é feita de chapa de zinco (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Chaminé. Fonte: Próprio autor (2007).

3.2.1.2. Sistema de aquisição e armazenamento de dados

O sistema de aquisição de dados que foi usado para coletar informações da temperatura no interior do forno é composto por uma unidade de leitura e tratamento de sinal (placa de aquisição) e um micro computador que tem como função processar e armazenar todas as informações coletadas (temperatura no interior e exterior do forno) em tempo real. O armazenamento e gerenciamento dos dados coletados é feito via software LabVIEW. As Figuras 3.13 – 3.15 ilustram o sistema de aquisição de dados.



Figura 3.13 – Sistema de aquisição de dados – Lab VIEW. Fonte: Próprio autor (2007).

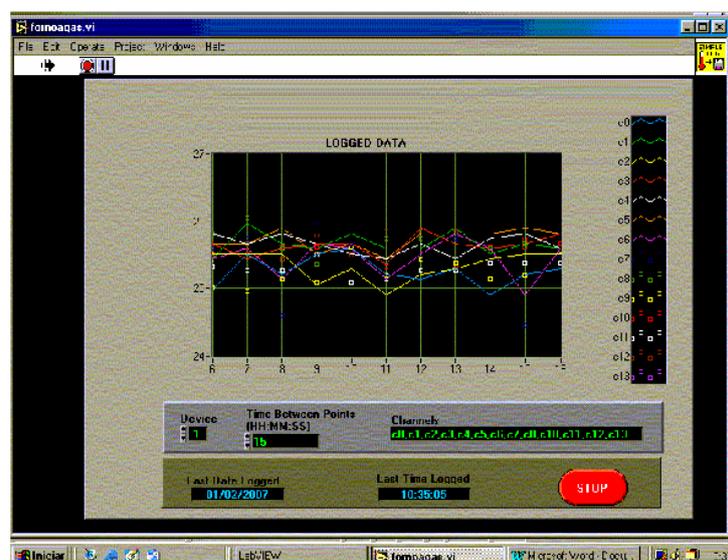


Figura 3.14 – Tela do Lab VIEW coletando dados. Fonte: Próprio autor (2007).

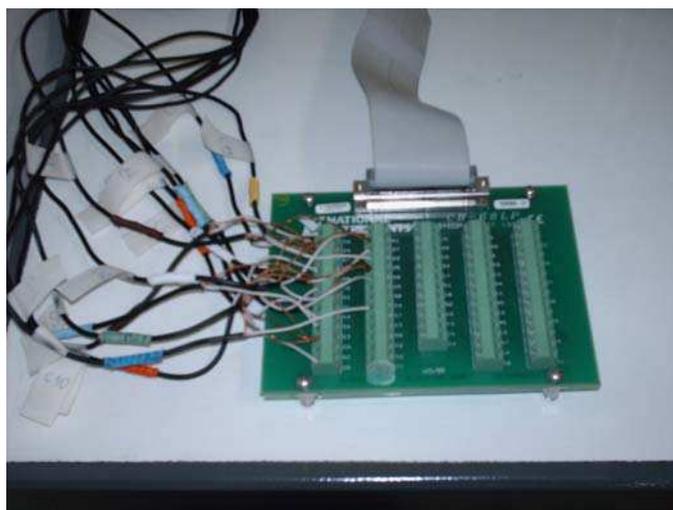


Figura 3.15 – Vista da placa de aquisição de dados. Fonte: Próprio autor (2007).

3.2.1.3. O sistema de medição de temperatura no forno

Para obtenção da temperatura no interior e exterior do forno foram instalados 11 termopares tipo K, ao longo do forno e chaminé. Os termopares utilizados foram de Cromel-alumel com faixa de medição de -50°C a 1300°C .

As Figuras 3.16 a 3.19 ilustram os termopares dos lados direito e esquerdo do forno-secador, de onde as temperaturas foram captadas, totalizando 10 termopares no forno, e onde o 11° estava dentro da chaminé.



Figura 3.16 – Vista lateral esquerda com os termopares instalados no forno. Fonte: Próprio autor (2007).

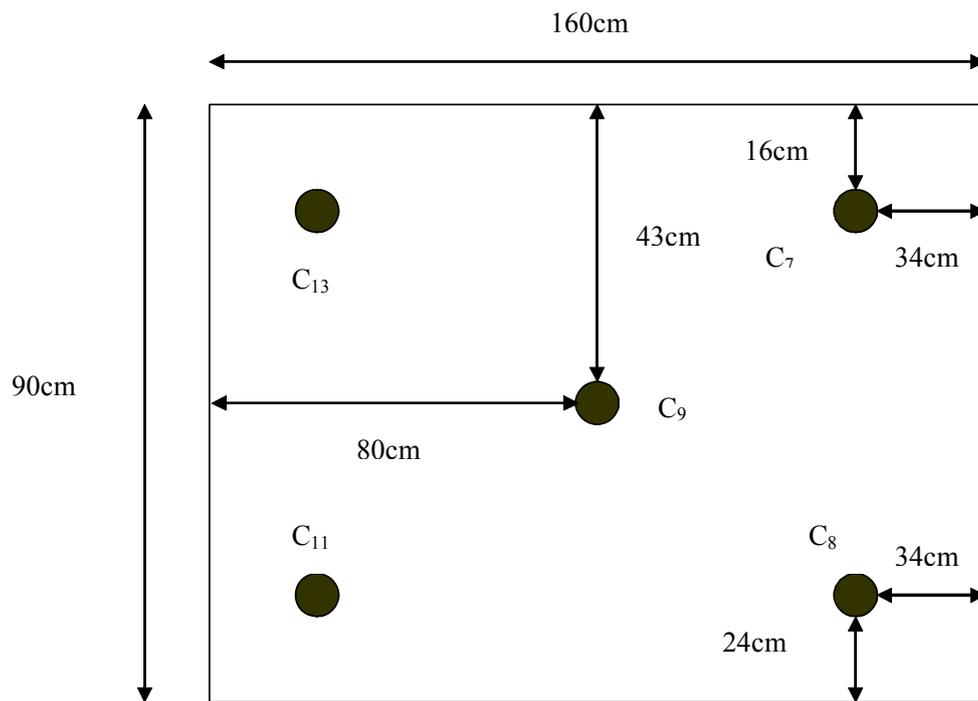


Figura 3.17 – Esquema da localização dos termopares no lado esquerdo do forno.

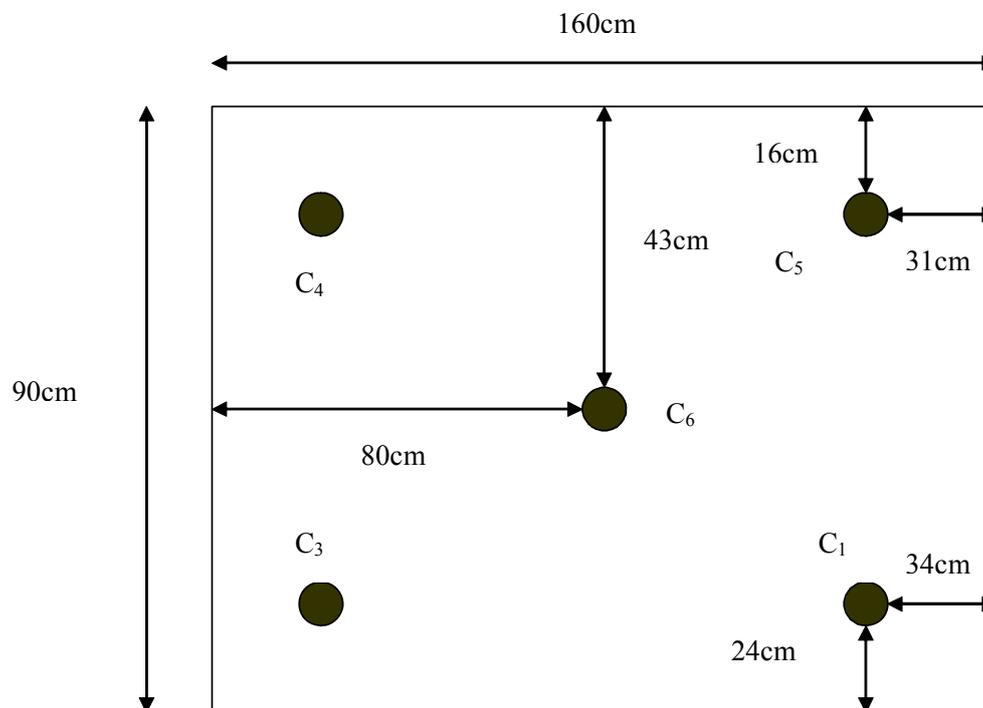


Figura 3.18 – Esquema da localização dos termopares no lado direito do forno.

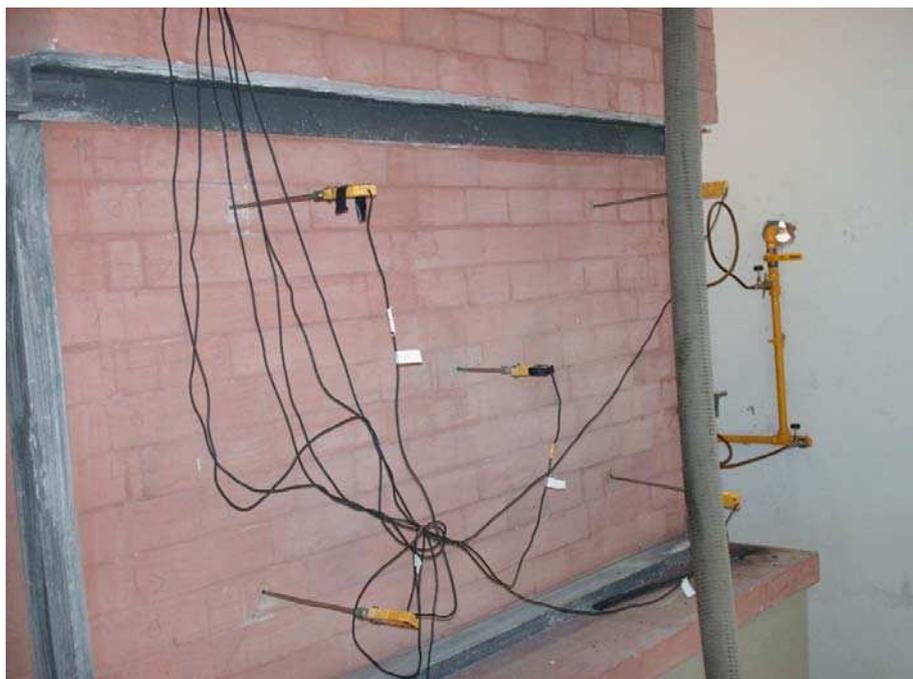


Figura 3.19 – Vista lateral direita com os termopares instalados no forno. Fonte: Próprio autor (2007).

Fora do forno, a medição da temperatura foi feita com um Termômetro Digital, modelo TI - 890 em 13 pontos (na porta, na chaminé, em uma barra de ferro próxima ao queimador e em 10 pontos laterais, 5 no direito e 5 no esquerdo.). A Figura 3.20 ilustra o instrumento de medição.



Figura 3.20 – Termômetro digital, modelo TI – 890. Fonte: Próprio autor (2007).

A Tabela 3.3 mostra detalhadamente a precisão com que atua o termômetro infravermelho.

Tabela 3.3 – Especificações do termômetro infravermelho.

Escala (automática)	Precisão
-50 ~ -20°C	± 5°C
- 20 ~ 200°C	± 1,5% da leitura ± 2°C
201 ~ 538°C	± 2% da leitura ± 2°C
539 ~ 750°C	± 3% da leitura ± 5°C

Foi utilizado também medidores de temperatura ambiente e umidade relativa do ar para monitorar as condições ambientais onde o forno está localizado. A Figura 3.21a-b, ilustram os termohigrômetros utilizados.

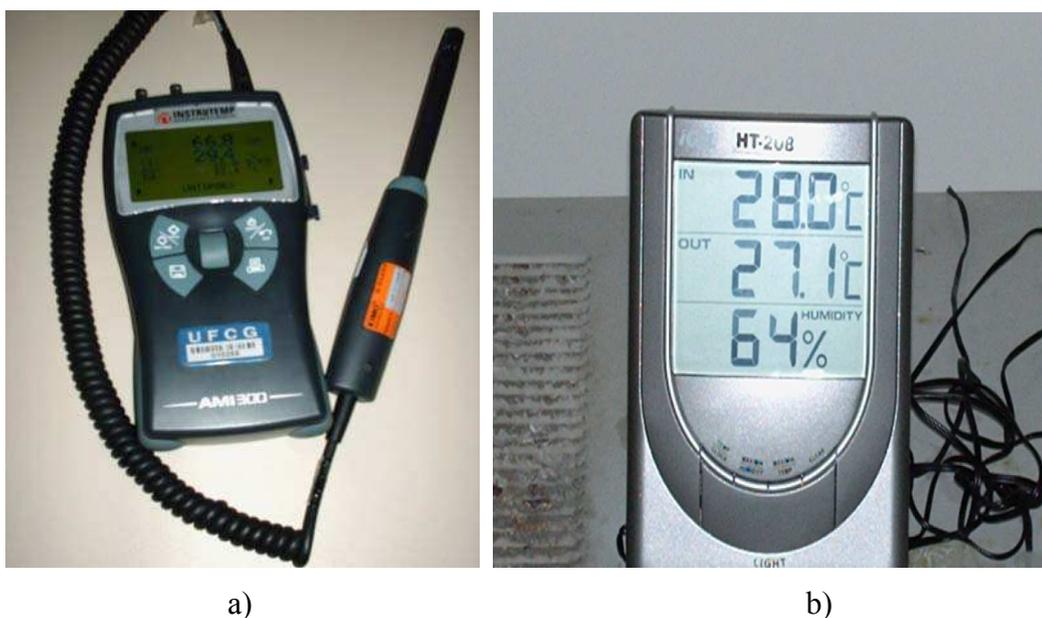


Figura 3.21 – Termohigrômetros digitais. Fonte: Próprio autor (2007).

3.2.1.4. Sistema auxiliar de injeção de ar

Para aumentar a vazão de ar utilizada na combustão do gás nos queimadores, foi usado um compressor marca Erbele (motor) e Eisol (parte mecânica). Uma mangueira de borracha instalada na saída do compressor foi conectada a chaminé, permitindo desta

forma que, o compressor ao ser ligado, aumentasse o arraste de ar nos canais de entrada do forno, no local de realização da combustão. Nas Figuras 3.22 e 3.23 pode-se ver as ilustrações do sistema auxiliar de injeção de ar.



Figura 3.22 – Compressor. Fonte: Próprio autor (2007).



Figura 3.23 – Tubo do compressor levando ar frio para chaminé. Fonte: Próprio autor (2007).

3.2.1.5. Sistema de análise dos gases de escape

Com o objetivo de se avaliar a emissão de poluentes do forno operando em condições previamente estabelecidas, foi utilizado um analisador de gases fabricado

pela empresa Kane International Limited, modelo KM 9106, com as especificações mostradas na Tabela 3.4, juntamente com uma sonda para coleta de gases no sistema de descarga do forno, em tempo real.

Tabela 3.4 – Especificações técnicas do analisador de gases

Parâmetro	Escala	Resolução	Precisão
Temperatura	0 - 1170°C	1,0°C	+/- 2,0°C +/- 3% Valor Medido
CO	0 - 10.000 ppm	1 ppm	±20 ppm <400 ppm±5% da leitura <2000 ppm±10% da leitura >2000 ppm
CO ₂	0 - CO ₂ Máximo	0,1%	+/- 0,2%
NO	0 - 10.000 ppm	1 ppm	+/- 5 ppm < 100 ppm+/- 5% da leitura > 100 ppm
NO ₂	0 - 5.000 ppm	1 ppm	+/- 5 ppm < 100 ppm+/- 5% da leitura > 100 ppm
SO ₂	0 - 5.000 ppm	1 ppm	+/- 5 ppm < 100 ppm+/- 5% da leitura > 100 ppm
C _x H _y	0 - 5% LEL (Metano)	0,01%	<1%: ±0.05%>1%: ±5% da leitura
Pressão	0 - 150 mbar	0,1 mbar	+/- 0,05% fundo da escala
Perdas	0 - 99,9%	0,1%	+/- 1% da Leitura
Eficiência de Queima	0 - 99,9%	0,1%	+/- 1% da Leitura
Excesso de Ar	0 - 250%	0,1%	+/- 0,2%
Índice de Toxicidade	0 - 99,9%	0,1%	±5% da Leitura
Relação CO/CO ₂	0 - 99,9%	0,001%	±5% da Leitura
Oxigênio	0 - 25%	0,1%	0,1 / +/- 0,2%

As Figuras 3.24 e 3.25 mostram a unidade de análise de gases de combustão e a unidade de programação e controle, respectivamente.



Figura 3.24 – Analisador de gases. Fonte: Próprio autor (2005).



Figura 3.25 – Unidade de controle do analisador. Fonte: Próprio autor (2006).

Na Figura 3.26, vê-se a sonda do analisador de gases instalada na chaminé do forno, onde os gases são captados para análise.



Figura 3.26 - Sonda do analisador de gases. Fonte: Próprio autor (2005).

Para verificar se o analisador de gases estava apresentando resultados coerentes, comparou-se os resultados de CO e CO₂ com aqueles obtidos com outro analisador. A Figura 3.27 mostra os resultados de uma análise. Conforme pode ser visto, os resultados estão bem próximos, indicando que as análises são confiáveis. Destaca-se que o equipamento utilizado para comparação, de marca Confor, é usado de forma intensiva na análise de gases de escapamento de caldeira à óleo e lenha.

3.2.1.6. Procedimento experimental

Todos os experimentos foram realizados no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande.

Para obtenção dos resultados de temperatura no interior do forno liga-se o sistema de aquisição de dados e em seguida, abre-se as válvulas de alimentação de gás e

inicia-se a combustão do mesmo. A intervalos de 15 minutos são coletados dados de temperaturas no interior do forno, na parede externa do forno, nos gases de escape na chaminé, e temperatura e umidade relativa do ar ambiente externo ao forno.



Figura 3.27 – Vista dos analisadores de gases. Fonte: Próprio autor (2005).

Durante a realização do experimento, o forno fica aquecendo até ser atingido a temperatura desejada (queima ou secagem) onde a partir daí desliga-se a alimentação de gás (cessando a combustão) e registra-se as temperaturas no forno e ambiente durante o resfriamento do mesmo até atingindo a temperatura ambiente.

A análise de gases de combustão foi feita em 3 tempos de processos. Foram coletados dados da fração volumétrica à seco dos seguintes componentes: CO₂, CO, NO, NO₂, NO_x, SO₂, C_xH_y e da eficiência da combustão.

3.2.2. Teórico (Modelagem matemática)

3.2.2.1. Considerações sobre o problema analisado

Considere a Figura 3.28, onde se apresenta um forno/secador de combustão interna de forma esquemática. Neste caso, o combustível entra no forno de combustão interna operando em regime permanente com uma vazão mássica \dot{m}_c e é misturado com

uma quantidade de ar \dot{m}_a . O combustível entra no forno à temperatura T_c e à pressão P_c , enquanto o ar entra no forno com a temperatura T_a e à pressão P_a . A mistura queima completamente e os produtos da combustão deixam o forno à temperatura T_p e à pressão P_p com o fluxo de massa \dot{m}_f . A combustão transfere uma quantidade de calor \dot{Q} para o ambiente interno do forno.

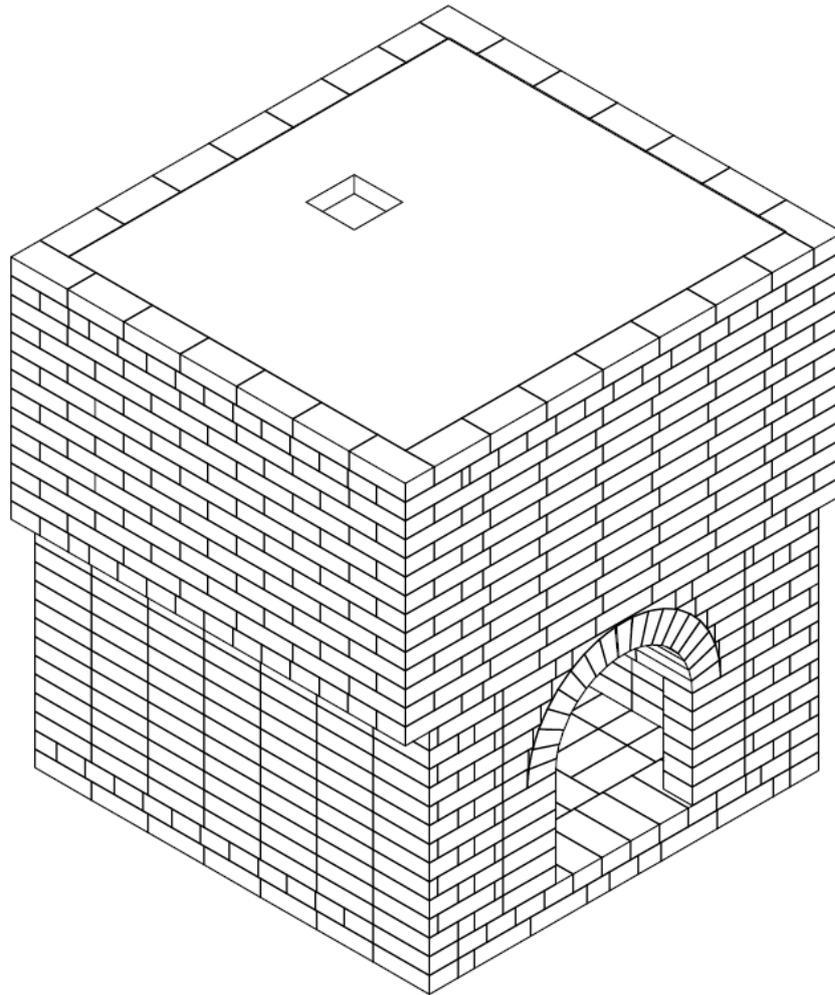


Figura 3.28. Esquema de um forno de combustão interna. Fonte: Próprio autor (2007).

3.2.2.2. Distribuição do consumo térmico nos fornos

A energia utilizada nos fornos é fornecida pela queima do combustível, gás natural. Esta energia é destinada, basicamente, para aquecer a carga, evaporar a umidade e fornecer o calor necessário para a decomposição e cristalização dos componentes

químicos do material cerâmico. Em termos gerais, para se fazer o balanço térmico em um forno, deve-se levar em conta que a energia fornecida pelo combustível é consumida dos seguintes modos:

- a) Aquecimento da estrutura do forno;
- a) Evaporação da umidade residual dos produtos;
- b) Promover reações endotérmicas nos produtos;
- c) Aquecer os gases de exaustão na chaminé;
- e) Perdas por radiação e convecção para o ambiente através das paredes;
- f) Acúmulo térmico no material queimado, no revestimento das vagonetas e nos suportes das peças, na saída do forno;
- g) Aquecer o ar de resfriamento reaproveitado para o processo de secagem ou para o aquecimento dos produtos em outro forno;
- h) Perdas por infiltrações de ar por aberturas e frestas.

Neste trabalho não se abordará tais aspectos, mas apenas a quantidade de calor liberada da combustão e as eficiências energéticas e exergéticas do equipamento.

a) A mistura ar-combustível

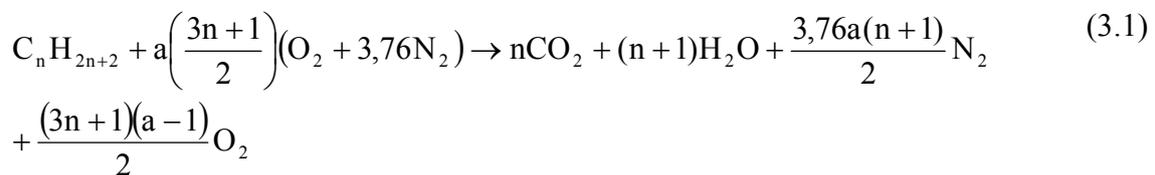
De modo simplificado, a queima de um combustível se constitui em uma reação química rápida, a alta temperatura, com velocidade de reação crescente e com intensa liberação de calor e luz. Assim sendo, a garantia de uma mistura íntima ar-combustível é essencial para uma boa combustão. Sem contato não há reação química. Ao aplicar esse conceito aos combustíveis sólidos que vêm sendo utilizados pela indústria cerâmica - lenha e carvão - entende-se a razão de sua baixa eficiência, mesmo quando utilizados em equipamentos e sistemas dimensionados para seu processamento.

Para que um combustível líquido como o óleo combustível atenda a esse requisito, ele deve ser aquecido, nebulizado (atomização – transformar 1 cm³ de o.c. em 10 milhões de gotículas = aumentar a superfície 250 vezes) e craqueado para que possa misturar-se perfeitamente com o ar. Desde seu bombeamento e utilização a temperaturas da ordem de 130°C, faz-se necessária uma boa nebulização. Nessa etapa, ocorre um

gasto energético no seu autocondicionamento (Pollini Filho, 1978; Henriques Jr. et al., 1993).

Todo esse procedimento para criar condições adequadas de mistura íntima ar-combustível é desnecessário quando se queima um combustível gasoso (GN). Os combustíveis gasosos são os que melhor se apresentam para se obter uma combustão rápida, segura e isenta de resíduos.

Para determinar a razão ar-combustível (AC), considere a seguinte equação da combustão completa, onde a é o decimal de ar teórico.



Nesta análise supõe-se o N_2 inerte.

A razão ar-combustível em uma base molar, (\overline{AC}), será:

$$\overline{AC} = \frac{a \left(\frac{3n+1}{2} \right) (1+3,76)}{1} = a(7,14n + 2,38) \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível}} \quad (3.2)$$

A razão ar-combustível em base mássica é dada por:

$$AC = \overline{AC} \frac{M_{ar}}{M_c} \quad (3.3)$$

onde M_{ar} é a massa molar do ar e M_c é a massa molecular do combustível.

A massa molar do ar é: $M_{ar}=28,97$ kg de ar/kmol de ar.

A massa molar do combustível é:

$$M_c = 12n + 1,01(2n + 2) = 14,02n + 2,02 \frac{\text{kg de combustível}}{\text{kmol de combustível}} \quad (3.4)$$

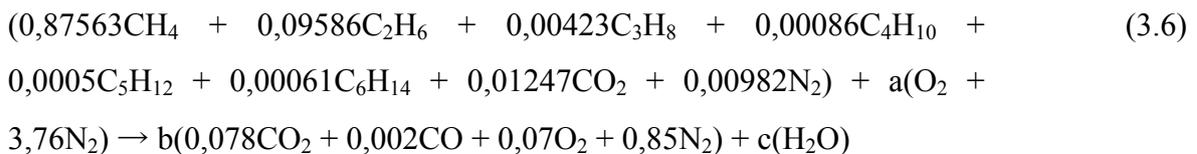
Com as massas molares do ar e do combustível, a razão ar-combustível pode ser expressa como:

$$AC = a(7,14n + 2,38) \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível}} \left(\frac{28,97 \frac{\text{kg de ar}}{\text{kmol de ar}}}{(14,02n + 2,02) \frac{\text{kg de combustível}}{\text{kmol de combustível}}} \right) \quad (3.5)$$

$$= \frac{a(206,8458n + 68,9486)}{14,02n + 2,02} \frac{\text{kg de ar}}{\text{kg de combustível}}$$

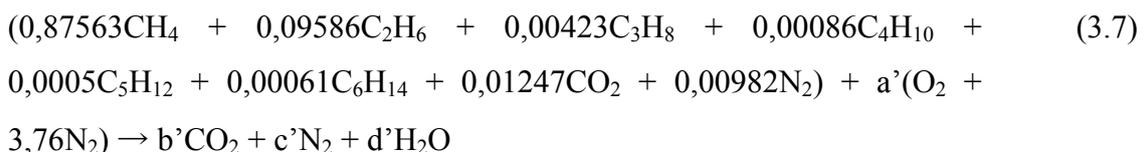
b) Análise da combustão do gás natural

Considerando a mistura como gás ideal, para 1 kmol de mistura de gases (gás natural) pode-se escrever a equação química abaixo:



onde \underline{a} , \underline{b} e \underline{c} são os coeficientes estequiométricos. Os números à frente de cada substância representam os percentuais de cada composto no gás natural da Paraíba, e retirados da Tabela 3.1. Os produtos consistem de \underline{b} kmoles de produtos secos e \underline{c} kmoles de vapor d'água, ambos por kmol da mistura combustível.

Para se ter conhecimento da quantidade percentual do ar, considere a equação para combustão completa da mistura combustível com a quantidade de ar teórica:



onde a' , b' , c' e d' são coeficientes estequiométricos a serem determinados por balanceamento de equação química.

c) Equação da Energia para o forno operando com gás natural

Baseado nos conceitos da Termodinâmica Clássica, a 1ª Lei da Termodinâmica (balanço de energia) para o sistema reagente, em regime permanente, quando o trabalho é nulo e as energias cinética e potencial são consideradas desprezíveis, assume a forma:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s \quad (3.8)$$

Para as entalpias expressas por mol de combustível, o balanço de energia toma a forma:

$$\frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{n}_c} = \bar{h}_P - \bar{h}_R = \sum_P \hat{n}_s \bar{h}_s - \sum_R \hat{n}_e \bar{h}_e = \bar{h}_{RP} \quad (3.9)$$

onde \dot{n}_c é a vazão molar do combustível; \bar{h}_P e \bar{h}_R simbolizam, respectivamente, as entalpias dos produtos e dos reagentes por mol de combustível; \hat{n} correspondem aos respectivos coeficientes na reação química que fornecem os moles dos reagentes e produtos por mol de combustível e \bar{h}_{RP} é a entalpia de combustão na base molar.

Segundo van Wylen e Sonntag (1976) e van Wylen et al. (1993), a entalpia de combustão, \bar{h}_{RP} é definida como a diferença entre a entalpia dos produtos e reagentes quando ocorre combustão completa a uma dada temperatura e pressão. Isto é,

$$\bar{h}_{RP} = H_P - H_R \quad (3.10)$$

A entalpia específica de um composto em um estado, que não o estado padrão, é determinada pela adição da variação de entalpia específica $\Delta \bar{h}$, entre o estado padrão e o estado de interesse, e a entalpia de formação, como dado abaixo:

$$\bar{h}(T, P) = \bar{h}_f^0 + [\bar{h}(T, P) - \bar{h}(T_{ref}, P_{ref})] = \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} = \bar{h}_f^0 + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (3.11)$$

A entalpia \bar{h}_f^0 está associada com a formação do composto a partir de seus elementos e $\Delta\bar{h}$ está relacionada a uma variação de estado em uma composição constante, e representa a parcela de calor sensível que o composto recebe (ou libera) para passar da temperatura de referência T_{ref} até a temperatura desejada T .

A entalpia de formação é a energia liberada ou absorvida quando o composto é formado pelos seus elementos, estando ambos, o composto e os elementos, a T_{ref} e P_{ref} , que determinam o estado de referência padrão ($T_{ref}=298,15$ K e $P_{ref}= 1$ atm).

O poder calorífico representa a quantidade de calor transferida da câmara durante a combustão ou reação a temperatura constante. No caso de pressão constante, ou processo de escoamento em regime permanente, conclui-se, pela 1ª Lei da termodinâmica, que eles são iguais à entalpia de combustão com o sinal contrário.

Junto com o termo poder calorífico, são usados os termos “superior” e “inferior”. O poder calorífico superior é a quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado líquido. Já o poder calorífico inferior é a quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado vapor.

O poder calorífico inferior (PCI) do combustível é dado por:

$$PCI_C = \sum_i PCI_i \quad (3.12)$$

A eficiência da combustão, η_{comb} , será:

$$\eta_{comb} = \frac{|\dot{Q}_{vc} / \dot{m}_c|}{(PCI \text{ ou } PCS)_{25^0 C, 1 atm}} \quad (3.13)$$

d) **Equação da exergia para o forno operando com gás natural**

A exergia, x , associada em um estado especificado é composta por duas contribuições: a contribuição termomecânica, x^{term} , e a contribuição química, x^{qui} . Em uma base unitária de massa, a exergia total, x , será:

$$x = x^{\text{term}} + x^{\text{qui}} = \left[(h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \right] + x^{\text{qui}} \quad (3.14)$$

Em que o termo entre colchetes é a contribuição termomecânica e x^{qui} é a contribuição química.

Quando se avalia uma variação de exergia, ou de exergia de fluxo entre dois estados onde a composição química da substância é a mesma, a contribuição química se cancela, permanecendo apenas a diferença das contribuições termomecânicas. Entretanto, em várias avaliações torna-se necessário levar em conta, explicitamente, a contribuição da exergia química. Alguns exemplos são os problemas que envolvem reações químicas, como é o caso da combustão.

A exergia química para uma mistura de gases ideais a T_0 e P_0 é obtida pela soma das contribuições de cada componente. O resultado, por mol da mistura, é:

$$\bar{x}^{\text{qui}} = \frac{\bar{x}^{\text{qui}}}{M} = \bar{R}T_0 \sum_i y_i \ln \left(\frac{y_i}{y_i^e} \right) = \sum_i y_i \bar{x}_i^{\text{qui}} + \bar{R}T_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (3.15)$$

onde y_i e y_i^e simbolizam, respectivamente, a fração molar do componente i na mistura a (T_0, P_0) e no ambiente.

Para uma ampla gama de aplicações de engenharia, a conveniência de utilizar valores padronizados, geralmente compensa a pequena falta de precisão que tal procedimento pode trazer. Particularmente, o efeito de pequenas variações nos valores de T_0, P_0 em torno de seus valores padrões podem ser desprezadas.

Para hidrocarbonetos (C_aH_b), a exergia química pode ser aproximada em termos do poder calorífico inferior como segue (Kotas, 1985):

a) Para hidrocarbonetos gasosos isoladamente:

$$\frac{\bar{x}^0}{(\text{PCI})^0} = 1,033 + 0,0169 \frac{b}{a} - \frac{0,0698}{a} = \varphi \quad (3.16)$$

onde $1,04 \leq \varphi \leq 1,06$ para gases naturais

b) Para hidrocarbonetos líquidos

$$\frac{\bar{x}^0}{(\text{PCI})^0} = 1,04224 + 0,011925 \frac{b}{a} - \frac{0,042}{a} \quad (3.17)$$

onde $1,04 \leq \varphi \leq 1,08$ para óleo diesel

Há muitas situações onde o combustível hidrocarboneto C_aH_b é um componente de uma mistura de gases ideais. Quando a mistura está no estado (T_0, P_0) , o combustível hidrocarbonado C_aH_b está no estado (T_0, y_i, P_0) . A exergia química do combustível nesta condição tem um valor diferente. A seguinte equação pode se usada:

$$\bar{x}^{\text{qui}} = \bar{x}_i^{\text{qui}}(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \sum_i \ln y_i \quad (3.18)$$

onde y_i é a fração molar do componente i de combustível hidrocarbonado na mistura.

Se a potência do forno é tomada como o produto do forno e se a transferência de calor juntamente com os gases produzidos na saída são vistos como perdas, uma expressão para a eficiência exérgica, ε , que mede o quanto de exergia na entrada do forno é convertida em produtos é:

$$\varepsilon = \frac{|Q_{vc}|}{\dot{x}_c} \quad (3.19)$$

onde \dot{x}_c significa a taxa pela qual a exergia entra com o combustível.

Para analisar os efeitos da temperatura dos gases de exaustão e do ar na entrada do forno, sobre a quantidade de calor liberada na combustão do gás e sobre eficiências energética e exergética do forno, foi desenvolvido um código computacional utilizando o software EES (Engineering Equation Solver) (Apêndice).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimental

Durante o experimento, o forno permaneceu ligado por 14 horas (das 7:40 às 21:40 hs, do dia 17 de janeiro de 2007). O seu resfriamento iniciou a partir da hora em que foi desligado o sistema de aquecimento (gases de combustão do gás natural), até às 18:00 horas, do dia 19 de janeiro de 2007.

Na Figura 4.1 apresenta-se as temperaturas no processo de aquecimento, regime permanente e resfriamento nas partes externas do forno, bem como a temperatura e umidade relativa do ar nas vizinhanças do forno/secador, em função do tempo de processo. Os pontos indicados estão relacionados com as Figuras 3.17 e 3.18.

Analisando-se a figura, observa-se que a temperatura máxima atingida foi de 303,7°C, no ponto C9 no instante 820 min de processo. Há uma ligeira variação de temperatura nas paredes externas do forno de 74°C, aproximadamente.

Na Figura 4.2 plota-se a temperatura do ar em diferentes pontos na parte interna do forno, em função do tempo de processo.

Verifica-se que a temperatura máxima atingida no interior do forno foi de 941,62°C em $t=825\text{min}$, indicando uma taxa de aquecimento de 1,10°C/min. As temperaturas lidas nas várias partes no interior do forno estão praticamente coincidentes, exceção é feita àquela lida no termopar C2, localizado na chaminé. Isto mostra uma grande uniformidade no aquecimento no interior do forno, produzindo naturalmente produto de melhor qualidade.

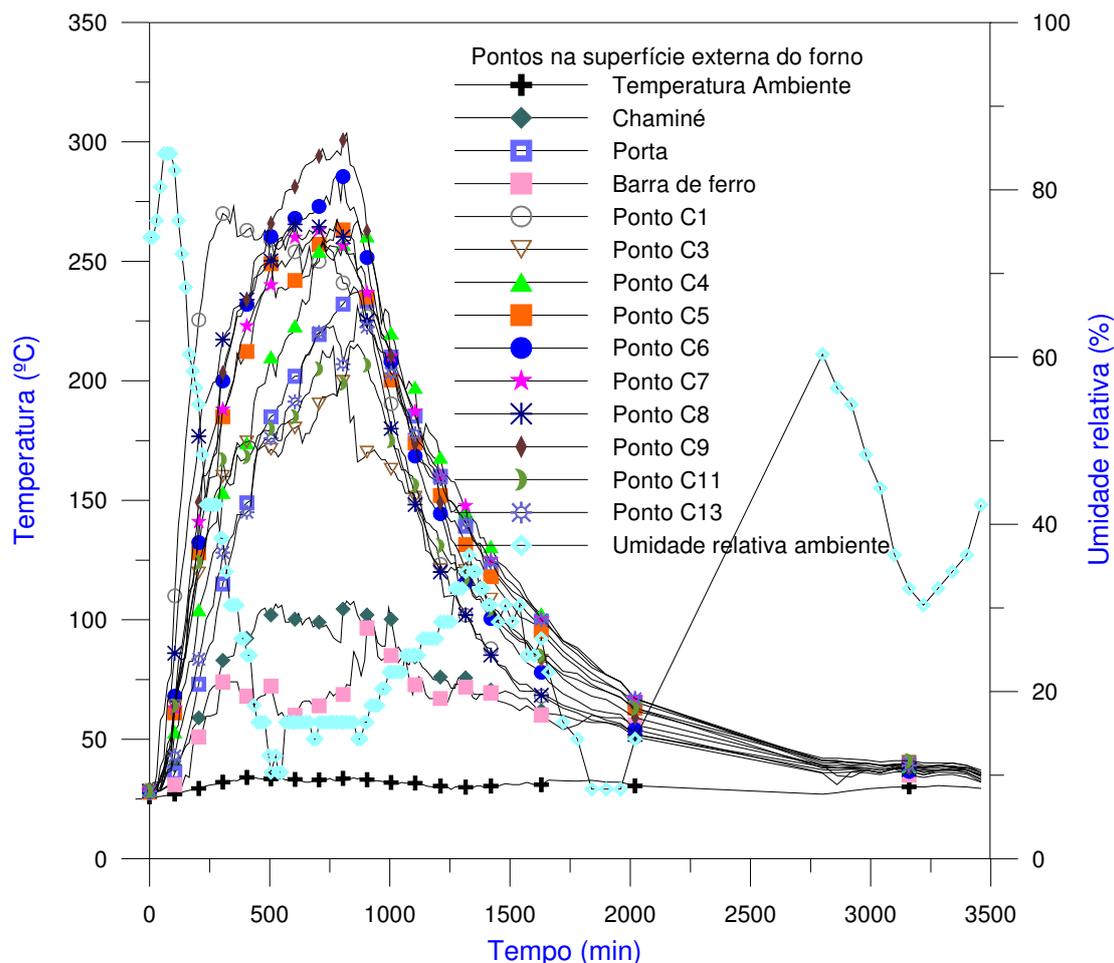


Figura 4.1 – Aquecimento e resfriamento do forno na parte externa.

Com o tempo transcorrendo e a temperatura elevando-se, ocorreram rachaduras em várias partes (dentro e fora do forno). Isto ocorreu devido ao fato de ser este o primeiro teste no secador após ter sido construído. Não havendo, portanto, tempo suficiente para que toda a massa cerâmica usada para vedação do secador e união dos tijolos estivesse completamente seca. Essas rachaduras podem ser observadas nas Figuras 4.3 a 4.6.

Isto evidencia que o processo de aquecimento do forno foi muito rápido, produzindo fortes tensões internas na argila que geraram seu rompimento.

Naturalmente é necessário novos estudos para indicar a velocidade ótima de aquecimento. Vale salientar que o forno não estava isolado termicamente, e portanto, seu desempenho energético será ainda superior ao apresentado nesta pesquisa, ao ser revestido com isolamento térmico.

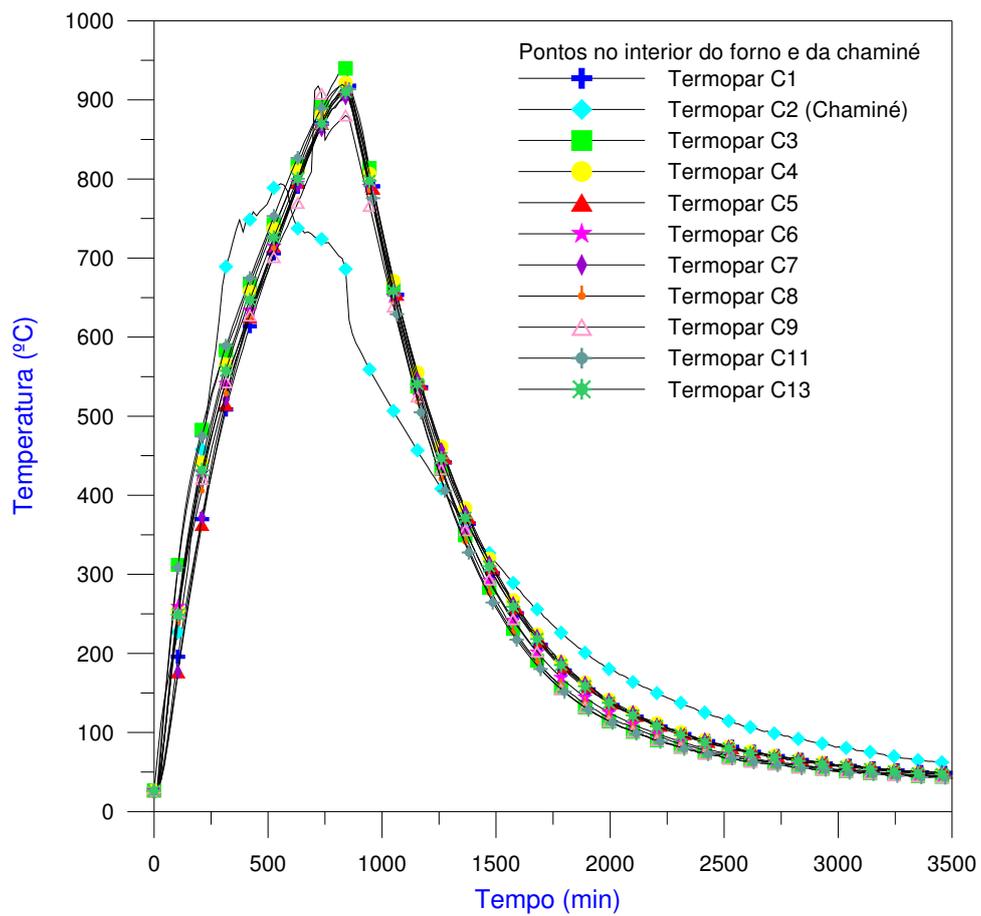


Figura 4.2 – Aquecimento e resfriamento no interior do forno.



Figura 4.3 – Vista das rachaduras na parte superior do forno. Fonte: Próprio autor (2007).



Figura 4.4 – Vista das rachaduras do forno durante os processos de secagem e queima.

Fonte: Próprio autor (2007).



Figura 4.5 – Vista lateral das rachaduras do forno. Fonte: Próprio autor (2007).



Figura 4.6 – Vista das rachaduras internas do forno. Fonte: Próprio autor (2007).

A análise de gases de combustão foi feita em 3 tempos de processos e os resultados obtidos estão postos na Tabela 4.1, a seguir.

Tabela 4.1 – Dados relativos à análise dos gases e eficiência de combustão

Local	T (°C)	t (min)	CO (ppm)	η_c (%)	E_{ar} (%)	CO ₂ (%)	CO/CO ₂ (R)	PI	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)	O ₂ (%)	CxHy (ppm)
Mesa	25,8	0	2	97,1	20	0,0	0,0000	0,00	0	0	0	0	20,9	0
Chaminé	58,1	15	12257	81,9	64	6,6	0,1857	18,57	41	0	41	833	8,1	-1
Mesa	29,8	240	0	93,3	20	0,1	0,0000	0,00	0	0	0	0	20,8	0
Chaminé	541,0	240	26189	59,1	19	8,8	0,2976	29,76	28	0	28	18	3,3	7
Mesa	34,2	360	1	80,0	20	0,0	0,0000	0,00	0	0	0	0	20,9	0

Mesa = nas proximidades do forno.

η_c = eficiência da combustão, dada pelo instrumento.

E_{ar} = excesso de ar

PI = relação entre CO e CO₂ expressa em porcentagem. Índice Poison

4.2. Teórico

Para se fazer uma análise energética e exergética no forno em estudo, principia-se aplicando a conservação da massa para o carbono na Equação 3.4.

Neste caso tem-se que:

$$b \times (0,078 + 0,002) = 0,87563 + 2 \times 0,09586 + 3 \times 0,00423 + 4 \times 0,00086 + 5 \times 0,0005 + 6 \times 0,00061 + 0,01247$$

De forma que:

$$b = \frac{1,10211}{0,08} \Rightarrow b = 13,776375$$

Procedendo de forma similar para o hidrogênio, obtém-se:

$$c \times (1,2) = 4 \times 0,87563 + 6 \times 0,09586 + 8 \times 0,00423 + 10 \times 0,00086 + 12 \times 0,0005 + 14 \times 0,00061$$

ou ainda:

$$c = \frac{4,13466}{2} \Rightarrow c = 2,06733$$

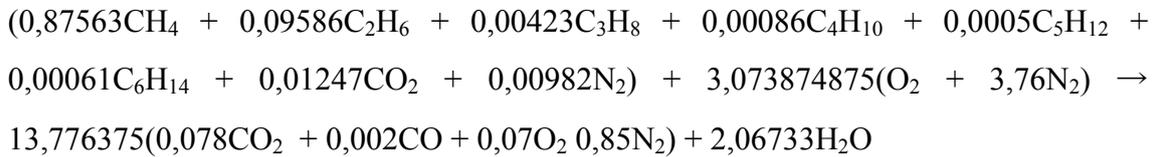
Aplicando a conservação da massa para o oxigênio:

$$2 \times 0,01247 + a(1 \times 2) = b(2 \times 0,078 + 0,002 + 2 \times 0,07) + c (0,02494) + 2a = 13,776375(0,156 + 0,002 + 0,14) + 2,06733$$

que dá como resultado:

$$a = \frac{6,14774975}{2} \Rightarrow a = 3,073874875$$

Então, a Equação 3.4 balanceada assume a forma:



Neste caso, a razão ar combustível em base molar é:

$$\overline{AC} = \frac{3,073874875(1 + 3,76)}{1} = 14,631664441 \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível}}$$

As massas molares do ar e do combustível são calculadas pelas expressões abaixo:

$$M_{\text{ar}} = 0,21 \times 2 \times 16 + 0,79 \times 2 \times 14 = 28,84 \frac{\text{kg de ar}}{\text{kmol de ar}}$$

$$M_c = 0,87563 \times (12 + 4 \times 1,01) + 0,09586 \times (2 \times 12 + 6 \times 1,01) + 0,00423 \times (3 \times 12 + 8 \times 1,01) + 0,00086 \times (4 \times 12 + 10 \times 1,01) + 0,0005 \times (5 \times 12 + 12 \times 1,01) + 0,00061 \times (6 \times 12 + 14 \times 1,01) + 0,01247 \times (12 + 2 \times 16) + 0,00982 (2 \times 14)$$

$$M_c = 18,0753266 \frac{\text{kg de combustível}}{\text{kmol de combustível}}$$

Logo, em base mássica, a razão ar combustível será:

$$AC = \overline{AC} \frac{M_{\text{ar}}}{M_c} = 14,631664441 \frac{28,84}{18,0753266} = 23,34544952 \frac{\text{kg de ar}}{\text{kg de combustível}}$$

A quantidade teórica de ar é obtida através do balanceamento da Equação 3.5, para combustão completa. Fazendo o balanço de massa para o carbono, obtém-se:

$$b' = 0,87563 + 2 \times 0,09586 + 3 \times 0,00423 + 4 \times 0,00086 + 5 \times 0,0005 + 6 \times 0,00061 + 0,01247$$

$$b' = 1,10211$$

Fazendo o balanço de massa para o hidrogênio, obtém-se:

$$d' \times (1 \times 2) = 4 \times 0,87563 + 6 \times 0,09586 + 8 \times 0,00423 + 10 \times 0,00086 + 12 \times 0,0005 + 14 \times 0,00061$$

obtém-se:

$$d' = \frac{4,13466}{2} \Rightarrow d' = 2,06733$$

Fazendo o balanço de massa para o oxigênio, obtém-se:

$$2 \times 0,01247 + a' \times (2 \cdot 1) = 2 \times 1,10211 + 2,06733$$

$$0,02494 + 2a' = 2,20422 + 2,06733$$

ou ainda:

$$a' = \frac{4,24661}{2} \Rightarrow a' = 2,123305$$

Fazendo o balanço de massa para o nitrogênio, obtém-se:

$$c'(1 \cdot 2) = 2 \times 0,00982 + 2,123305 \times (3,76 \cdot 2)$$

de onde obtém-se:

$$c' = \frac{15,9868936}{2} \Rightarrow c' = 7,9934468$$

Então a razão ar-combustível teórica em base molar será:

$$\overline{AC} = \frac{a'(1+3,76)}{1} = \frac{2,123305(4,76)}{1} = 10,1069318 \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível}}$$

Sendo assim, a percentagem de ar teórico é:

$$\% \text{ de ar teórico} = \frac{14,63164441 \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível}}}{10,1069318 \frac{\text{kmol de ar}}{\text{kmol de combustível}}} = 1,45 \quad \text{ou} \quad 145\%$$

Com referência ao armazenamento, a quantidade de combustível em kmoles, n_c , presente em 10 m^3 de mistura combustível a 300 K e a 1 bar (10^5 N/m^2), é dada por:

$$n_c = \frac{PV}{RT} = \frac{10^5 \text{ N/m}^2}{8314 \frac{\text{Nm}}{\text{kmol K}} \times 300 \text{ K}} = 0,400930158 \text{ kmol de combustível} \quad (4.1)$$

Isto corresponde a uma massa de:

$$m_c = n_c M_c = 0,400930158 \text{ kmol} \times 18,0753266 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 7,24694355 \text{ kg de combustível}$$

A quantidade total de produtos da combustão é:

$$b+c = 15,843705 \text{ kmol de produto/kmol de combustível.}$$

Consequentemente, a quantidade de mistura de produtos que será formada por 10 m^3 de mistura de combustível será:

$$n_p = 15,843705 \times 0,400930158 = 6,352219149 \text{ kmoles de produto gasoso.}$$

A massa total dos produtos será:

$$m_p = n_p \times M_p \quad (4.2)$$

onde:

$$M_p = \frac{13,776375}{15,843705} \left[0,078(12 + 2 \times 16) + 0,002(12 + 16) + 0,07(2 \times 16) + 0,85(2 \times 14) \right] +$$

$$(2 \times 1,01 + 16) \frac{2,06733}{15,843705} = 25,67510571 + 2,351298921 = 28,02640463 \quad \frac{\text{kg de produto}}{\text{kmol de produto}}$$

então:

$$m_p = 167,05136 \text{ kg de produto}$$

A massa de produto também pode ser dada por:

ou ainda:

$$m_p = m_c + m_a = 7,24694355 + 23,34544952 \times 7,24694355 \text{ kg de produto}$$

$$m_p = 176,43009837 \text{ kg de produto}$$

A diferença nos dois cálculos de m_p acima é proveniente de erros de arredondamento na massa atômica dos átomos e nas operações matemáticas.

Já que a água é formada na queima dos combustíveis hidrocarbonados, a fração molar do vapor d'água nos produtos gasosos da combustão pode ser significativa. Se os produtos gasosos da combustão forem resfriados a uma pressão de mistura constante, a temperatura de ponto de orvalho pode ser atingida quando a água começa a condensar. Como a água depositada no sistema de descarga (metálico) pode causar corrosão, o conhecimento da temperatura de ponto de orvalho é importante. Desse modo, de acordo com a equação química balanceada, a fração molar do vapor d'água, y_{vp} é:

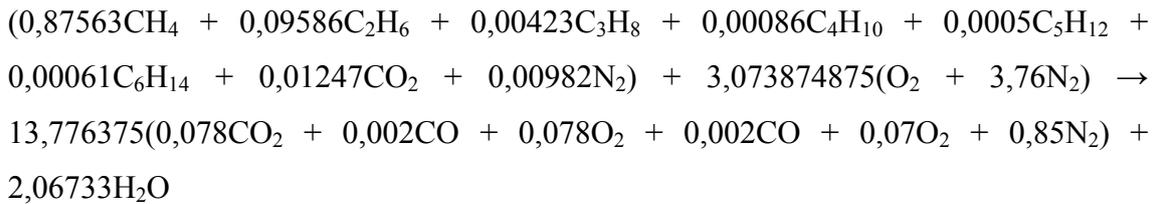
$$y_{vp} = \frac{a}{b+a} = \frac{3,073874875}{13,776375 + 3,073874875} = 0,182423103 \quad \text{ou} \quad 18,24231033\% \quad (4.3)$$

Por outro lado, a pressão parcial do vapor d'água nos produtos da combustão é dada por:

$$P_{vp} = y_{vp} P_p \quad (4.4)$$

Daí, conhecendo-se P_{vp} , obtém-se T_p a partir das tabelas termodinâmicas. A temperatura T_p é a temperatura de saturação a uma pressão P_{vp} , que também é a temperatura de ponto de orvalho.

Considerando a seguinte equação química balanceada:



e que o ar de combustão e os produtos de combustão são misturas de gases ideais, tem-se no forno a seguinte equação da energia:

$$\frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{n}_c} = +\bar{h}_P - \bar{h}_R = +\{13,776375[0,078\bar{h}_{\text{CO}_2} + 0,002\bar{h}_{\text{CO}} + 0,07\bar{h}_{\text{O}_2} + 0,85\bar{h}_{\text{N}_2}] + 2,06733\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}\} - \{0,87563\bar{h}_{\text{CH}_4} + 0,09586\bar{h}_{\text{C}_2\text{H}_6} + 0,00423\bar{h}_{\text{C}_3\text{H}_8} + 0,00086\bar{h}_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + 0,0005\bar{h}_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + 0,00061\bar{h}_{\text{C}_6\text{H}_{14}} + 0,01247\bar{h}_{\text{CO}_2} + 0,00982\bar{h}_{\text{N}_2} + 3,073874875[\bar{h}_{\text{O}_2} + 3,76\bar{h}_{\text{N}_2}]\} \quad (4.5)$$

Quando os elementos e os compostos são estáveis no estado padrão, suas entalpias de formação são nulas. Por exemplo, O_2 e N_2 presentes no ar de combustão são estáveis a 25°C e 1 atm, então $\bar{h}_{f_{\text{O}_2}}^0$ e $\bar{h}_{f_{\text{N}_2}}^0$ para estes elementos são iguais a zero.

Desta forma, os balanços de massa e energia para o forno assumem a forma:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{n}_c} = & + \left\{ 3,776375 \left[0,078(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{CO_2} + 0,002(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{CO} + 0,07(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{O_2} \right. \right. \\ & + 0,85(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{N_2} \left. \right] + 2,06733(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{H_2O} \left. \right\} - \left\{ 0,87563(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{CH_4} + 0,09586(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{C_2H_6} + \right. \\ & + 0,00423(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{C_3H_8} + 0,00086(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{C_4H_{10}} + 0,0005(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{C_5H_{12}} + 0,00061 \\ & (\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{C_6H_{14}} + 0,01247(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{CO_2} + 0,00982(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{N_2} + 3,073874875[(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{O_2} + 3,76 \\ & \left. (\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{N_2} \right] \left. \right\} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Considerando $\dot{m}_c = 0,0072 \text{ kg/s}$, $T_c = T_a = 27^\circ\text{C}$, $P_c = P_a = 1 \text{ atm}$, e $T_p = 616^\circ\text{C}$, então tem-se que:

a) À $25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$ e $P = 1 \text{ atm}$, a entalpia de formação dos reagentes e produtos são dadas por (Kotas, 1985; Moran e Shapiro, 2003):

$$\begin{aligned} (\bar{h}_f^0)_{CO_2} &= -393520 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{CO} &= -110530 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{O_2} &= 0 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{N_2} &= 0 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{H_2O(g)} &= -241820 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{H_2O(l)} &= -285830 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{CH_4} &= -74850 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{C_2H_6} &= -84680 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{C_3H_8} &= -103850 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{C_4H_{10}} &= -126150 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{C_5H_{12}} &= -146440 \text{ kJ/kmol} \\ (\bar{h}_f^0)_{C_6H_{14}} &= -167400 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

b) À $T_p=616^\circ\text{C}=889\text{ K}$, tem-se (Moran e Shapiro, 2003):

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = 36876 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{CO}} = 26740 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{O}_2} = 27584 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{N}_2} = 26568 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}(\text{g})} = 31429 \text{ kJ/kmol}$$

c) À $T_a=T_c=27^\circ\text{C}=300\text{ K}$, tem-se (Moran e Shapiro, 2003):

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = 9431 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{CO}} = 8723 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{O}_2} = 8736 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{N}_2} = 8723 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}(\text{g})} = 9966 \text{ kJ/kmol}$$

d) À $T_{\text{ref}}=25^\circ\text{C}=298\text{ K}$, tem-se (Moran e Shapiro, 2003):

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = 9364 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{CO}} = 8669 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{O}_2} = 8682 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{N}_2} = 8669 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}(\text{g})} = 9904 \text{ kJ/kmol}$$

Além disso, por definição, tem-se que o calor específico a pressão constante é dado por:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_{Pcte} \quad (4.7)$$

Integrando obtém-se:

$$h_2 - h_1 = \frac{\bar{h}_2 - \bar{h}_1}{M} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\bar{c}_p(T)}{M} dT = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\bar{c}_p(\theta)}{M} 100d\theta \quad (4.8)$$

onde $\theta=T(K)/100$ e $\bar{c}_p = \frac{c_p}{M}$

As seguintes equações para o calor específico à pressão constante na base molar de vários gases perfeitos e líquidos são conhecidos (van Wylen e Sonntag, 1976; Rohsenow et al., 1998):

$$N_2 \quad \bar{c}_p = 39,060 - 512,79\theta^{-1,5} + 1072,7\theta^{-2} - 820,40\theta^{-3} \text{ kJ/kmol}$$

$$O_2 \quad \bar{c}_p = 37,432 + 0,02010\theta^{1,5} - 178,57\theta^{-1,5} + 236,88\theta^{-2} \text{ kJ/kmol}$$

$$CO \quad \bar{c}_p = 69,145 - 0,70463\theta^{0,75} - 200,77\theta^{-0,5} + 176,76\theta^{-0,75} \text{ kJ/kmol}$$

$$H_2O \quad \bar{c}_p = 143,05 - 183,54\theta^{0,25} + 82,751\theta^{0,5} - 3,6989\theta \text{ kJ/kmol}$$

$$CO_2 \quad \bar{c}_p = -3,7357 + 30,529\theta^{0,5} - 4,1034\theta + 0,024198\theta^2 \text{ kJ/kmol}$$

$$CH_4 \quad \bar{c}_p = -672,87 + 439,74\theta^{0,25} - 24,875\theta^{0,75} + 323,88\theta^{-0,5} \text{ kJ/kmol}$$

$$C_2H_6 \quad \bar{c}_p = -6,895 + 17,26\theta - 0,6402\theta^2 + 0,00728\theta^3 \text{ kJ/kmol}$$

$$C_3H_8 \quad \bar{c}_p = -4,042 + 30,46\theta - 1,571\theta^2 + 0,03117\theta^3 \text{ kJ/kmol}$$

$$C_4H_{10} \quad \bar{c}_p = 3,954 + 37,12\theta - 1,833\theta^2 + 0,03498\theta^3 \text{ kJ/kmol}$$

$$C_5H_{12} \quad \bar{c}_p = 2,273 \text{ kJ/kmol (Líquido).}$$

$$C_6H_{14} \quad \bar{c}_p = 2,227 \text{ kJ/kmol (Líquido).}$$

Desta forma, tem-se para:

a) Produtos

$$\Delta \bar{h}_{\text{CO}_2} = (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{\text{CO}_2} = 36876 - 9364 = 27512 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{\text{CO}} = (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{\text{CO}} = 26740 - 8669 = 18071 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{\text{O}_2} = (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{\text{O}_2} = 27584 - 8682 = 18902 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{\text{N}_2} = (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{\text{N}_2} = 26568 - 8669 = 17899 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{\text{H}_2\text{O(g)}} = (\bar{h}_{T=616^\circ\text{C}} - \bar{h}_{T=25^\circ\text{C}})_{\text{H}_2\text{O(g)}} = 31429 - 9904 = 21525 \text{ kJ/kmol}$$

b) Reagentes

$$\begin{aligned} \Delta \bar{h}_{\text{CH}_4} &= \int_{298}^{300} \bar{c}_p(T) dT = \int_{2,98}^3 100 \bar{c}_p(\theta) d\theta = \\ &= \int_{2,98}^3 100(-672,87 + 439,74\theta^{0,25} - 24,875\theta^{0,75} + 323,88\theta^{-0,5}) d\theta = 72,243 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

$$\Delta \bar{h}_{\text{C}_2\text{H}_6} = \int_{2,98}^3 100(-6,895 + 17,26\theta - 0,6402\theta^2 + 0,00728\theta^3) d\theta = 78,36707 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{\text{C}_3\text{H}_8} = \int_{2,98}^3 100(-4,042 + 30,46\theta - 1,571\theta^2 + 0,03171\theta^3) d\theta = 147,673 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = \int_{2,98}^3 100(3,954 + 37,612\theta - 1,833\theta^2 + 0,03498\theta^3) d\theta = 198,9818 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{\text{C}_3\text{H}_{12}} = \int_{298}^{300} C_p dt = \int_{298}^{300} 2,273 dt = 2,273 \times 300 - 2,273 \times 298 = 4,546 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{C_6H_{14}} = \int_{298}^{300} C_p dt = \int_{298}^{300} 2,227 dt = 2,227 \times 300 - 2,227 \cdot 298 = 4,454 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{N_2} = (\bar{h}_{T=27^\circ C} - \bar{h}_{T=25^\circ C})_{N_2} = 8723 - 8669 = 54 \text{ kJ/kmol}$$

$$\Delta \bar{h}_{N_2} = (\bar{h}_{T=27^\circ C} - \bar{h}_{T=25^\circ C})_{N_2} = 8723 - 8669 = 54 \text{ kJ/kmol (do ar)}$$

$$\Delta \bar{h}_{O_2} = (\bar{h}_{T=27^\circ C} - \bar{h}_{T=25^\circ C})_{O_2} = 8736 - 8682 = 54 \text{ kJ/kmol (do ar)}$$

Assim sendo, tem-se que:

$$\bar{h}_p = \{13,776375[0,078(-393520 - 27512) + 0,002(-110530 + 18071) + 0,07(0 + 18902) + 0,85(0 + 17899)] + [2,06733(-241820 + 21525)]\} = -623442,5426 \text{ kJ/kmol}$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_R &= \{[0,87563(-74850 + 72,243) + 0,09586(-84680 + 78,367) + 0,00423(-103850 + 147,673) \\ &+ 0,00086(-126150 + 198,982) + 0,0005(-146440 + 4,546) + 0,00061(-167300 + 4,454) + \\ &0,01247(-393520 + 27512) + 0,00982(0 + 54)] + 3,073874875[(0 + 54) + 3,76(0 + 54)]\} = \\ &= -78083,28731 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

A vazão molar do combustível é dada por:

$$\dot{n}_c = \frac{\dot{m}_c}{M_c} = \frac{0,0072}{18,0753266} = 0,000398333 \text{ kmol de combustível/s} \quad (4.9)$$

Então a transferência de calor durante a combustão para o forno será:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{vc} &= \dot{n}_c (\bar{h}_p - \bar{h}_R) = 0,000398333(-623442,5426 - (-78083,34831)) = \\ &= -217,2345882 \text{ kW} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Utilizando a Equação (3.8) para o PCI e PCS, tem-se:

$$PCI_c = 0,87536 PCI_{CH_4} + 0,09586 PCI_{C_2H_8} + 0,00423 PCI_{C_3H_8} + 0,00086 PCI_{C_4H_{10}} + \\ + 0,0005 PCI_{C_5H_{12}} + 0,00061 PCI_{C_6H_{14}} + 0,01247 PCI_{CO_2} + 0,00982 PCI_{N_2}$$

Então:

$$PCI_c = 0,87536 \times 50020 + 0,09586 \times 47480 + 0,00423 \times 46360 + 0,00086 \times 45720 + \\ + 0,0005 \times 45351 + 0,00061 \times 45101 + 0,00982 \times 0 + 0,01247 \times 0 \\ PCI_c = 48622,54911 \text{ kJ/kg}$$

O poder calorífico superior do combustível (PCS) é dado por:

$$PCS_c = 0,87536 \times 55510 + 0,09586 \times 51870 + 0,00423 \times 50380 + 0,00086 \times 49500 + \\ 0,0005 \times 49010 + 0,00061 \times 48676 + 0,00982 \times 0 + 0,01247 \times 0 \\ PCS_c = 53873,36656 \text{ kJ/kg}$$

Então, a eficiência da combustão é dada por:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{vc}/\dot{m}_c}{(PCI)_{25^\circ C, 1atm}} = \frac{|-217,2345882/0,0072|}{48622,54911} = 0,620524245 \text{ ou } 62,05242451\% \quad (4.1)$$

Outra definição seria:

$$\eta_{comb} = \frac{(\overline{AC})_{teórico}}{(\overline{AC})_{real}} = \frac{10,1069318}{14,63164441} = 0,690758435 \text{ ou } 69,0758435\% \quad (4.12)$$

Para o problema em questão, o gás natural tem composição dada na Tabela 3.1. Isto indica que:

$$y_{CH_4} = 0,87563; \quad y_{C_2H_6} = 0,09586; \quad y_{C_3H_8} = 0,00423; \quad y_{C_4H_{10}} = 0,00086; \\ y_{C_5H_{12}} = 0,0005; \quad y_{C_6H_{14}} = 0,00061; \quad y_{N_2} = 0,1050 \quad \text{e} \quad y_{CO_2} = 0,01247$$

Por outro lado, a exergia química a T_0 e P_0 , dos constituintes são (Kotas, 1985):

$$\bar{x}_{\text{CH}_4}^0 = 836510 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \Rightarrow \bar{x}_{\text{CH}_4}^0 = \frac{836510}{16,042} = 52144,994 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\bar{x}_{\text{C}_2\text{H}_6}^0 = 1504360 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \Rightarrow \bar{x}_{\text{C}_2\text{H}_6}^0 = \frac{1504360}{30,068} = 50031,928 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\bar{x}_{\text{C}_3\text{H}_8}^0 = 2163190 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \Rightarrow \bar{x}_{\text{C}_3\text{H}_8}^0 = \frac{2163190}{44,094} = 49058,602 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\bar{x}_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^0 = 2818930 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \Rightarrow \bar{x}_{\text{C}_4\text{H}_{10}}^0 = \frac{2818930}{58,120} = 48501,893 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\bar{x}_{\text{C}_5\text{H}_{12}}^0 = 3477050 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \Rightarrow \bar{x}_{\text{C}_5\text{H}_{12}}^0 = \frac{3477050}{72,12} = 48212,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\bar{x}_{\text{C}_6\text{H}_{14}}^0 = 4134590 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \Rightarrow \bar{x}_{\text{C}_6\text{H}_{14}}^0 = \frac{4134590}{86,14} = 47998,490 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\bar{x}_{\text{CO}_2}^0 = 20140 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \Rightarrow \bar{x}_{\text{CO}_2}^0 = \frac{20140}{44} = 457,727 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\bar{x}_{\text{N}_2}^0 = 720 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \Rightarrow \bar{x}_{\text{N}_2}^0 = \frac{720}{28,013} = 25,702 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Desde que $\bar{R} = 8,314 \text{ kJ/kmol K}$, $T_0 = 298 \text{ K}$, tem-se que:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{\text{CH}_4}^{\text{qui}}(T_0, y_{\text{CH}_4}, P_0) &= \bar{x}_{\text{CH}_4}^0(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln y_{\text{CH}_4} = 836510 + 8,314 \times 298 \times \ln(0,87563) \\ &= 836180,9496 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{\text{C}_2\text{H}_6}^{\text{qui}}(T_0, y_{\text{C}_2\text{H}_6}, P_0) &= \bar{x}_{\text{C}_2\text{H}_6}^0(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln y_{\text{C}_2\text{H}_6} = 1504360 + 8,314 \times 298 \times \ln(0,09586) \\ &= 1498550,424 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{x}_{C_3H_8}^{qui}(T_0, y_{C_2H_6}, P_0) &= \bar{x}_{C_2H_6}^0(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln y_{C_2H_6} = 2163190 + 8,314 \times 298 \times \ln(0,00423) \\ &= 2149648 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{x}_{C_4H_{10}}^{qui}(T_0, y_{C_4H_{10}}, P_0) &= \bar{x}_{C_4H_{10}}^0(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln y_{C_4H_{10}} = 2818930 + 8,314 \times 298 \times \ln(0,00086) \\ &= 2801441,864 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{x}_{C_5H_{12}}^{-qui}(T_0, y_{C_5H_{12}}, P_0) &= \bar{x}_{C_5H_{12}}^{-0}(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln y_{C_5H_{12}} = 3477050 + 8,314 \times 298 \times \ln(0,0005) \\ &= 3458218,217 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{x}_{C_6H_{14}}^{-qui}(T_0, y_{C_6H_{14}}, P_0) &= \bar{x}_{C_6H_{14}}^{-0}(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln y_{C_6H_{14}} = 4134590 + 8,314 \times 298 \times \ln(0,00061) \\ &= 4116250,884 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{x}_{CO_2}^{-qui}(T_0, y_{CO_2}, P_0) &= \bar{x}_{CO_2}^{-0}(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln y_{CO_2} = 20140 + 8,314 \times 298 \times \ln(0,01247) = \\ &= 9277,26187 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{x}_{N_2}^{qui}(T_0, y_{N_2}, P_0) &= \bar{x}_{CH_4}^0(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{y_{N_2}}{y_{N_2}^0} \right) = 8,314 \times 298 \times \ln \left(\frac{0,00982}{0,7567} \right) \\ &= -10763,92491 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned}\bar{x}_{N_2}^{qui}(T_0, y_{N_2}, P_0) &= \bar{x}_{CH_4}^0(T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln \left(\frac{y_{N_2}}{y_{N_2}^0} \right) = 720 + 8,314 \times 298 \times \ln(0,00982) \\ &= -10734,64325 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\end{aligned}$$

Nas condições ambientais, a exergia termomecânica é nula. Então, a exergia total para o gás natural é justamente a exergia química dada por:

$$\bar{x}_c^{qui} = \bar{R}T_0 \sum_i y_i \bar{x}_{c_i}^{qui} = \sum_i y_i (\bar{x}_i^0 + \bar{R}T_0 \ln y_i)$$

$$\bar{x}_c^{qui} = 0,87563 \times 836180,9496 + 0,09586 \times 1498550,424 + 0,00423 \times 2149648,698 + 0,00086 \times 2801441,864 + 0,0005 \times 3458218,217 + 0,00061 \times 4116250,884 + 0,01247 \times 9277,260187 + 0,00982 \times (-10763,92491)$$

$$\bar{x}_c^{qui} = 891588,4303 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol de combustível}}$$

ou,

$$x_c^{qui} = \frac{\bar{x}_c^{qui}}{M_c} = \frac{891588,4303}{18,0753266} = 49326,26945 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para obtenção da eficiência exergética do forno, um balanço de exergia deve ser utilizado. Em regime permanente, a taxa pela qual a exergia entra no forno é igual à taxa pela qual a exergia sai acrescentada da taxa pela qual a exergia é destruída no interior do forno.

Conforme o ar de combustão entra na condição ambiente, e conseqüentemente com um valor nulo de exergia, apenas o combustível fornece exergia ao forno. A exergia sai do forno acompanhando o calor e com os produtos da combustão.

Já que o combustível entra a 27°C e 1 atm, o que corresponde aos valores aproximados de T_0 e P_0 do ambiente, e sendo os efeitos de energia cinética e potencial desprezíveis, a exergia do combustível é apenas a sua exergia química. Não existe contribuição termomecânica alguma. Assim,

$$\dot{X}_c = \dot{m}_c x_c^{qui} = 0,0072 \cdot 49326,26945 = 355,14914 \text{ kW}$$

Então, a eficiência exergética será:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{X}_c} = \frac{217,2345882}{355,14914} = 0,611671446 \text{ ou } 61,16714465\%$$

Como visto, os parâmetros de entrada são: o consumo do combustível (gás natural), valores de entalpia e exergia de acordo com a variação da temperatura na

entrada e na saída do forno-secador, dando como resultado, a perda de calor. Sendo assim, pode-se verificar em quais temperaturas de entrada e saída ocorrem maiores e menores rendimentos energéticos e exergeticos. Nesse sentido, as Figuras 4.7 – 4.9 ilustram a influência da temperatura dos produtos da combustão, na saída, e do ar, na entrada, sobre a eficiência do forno e quantidade de calor liberada na combustão do gás natural para o forno.

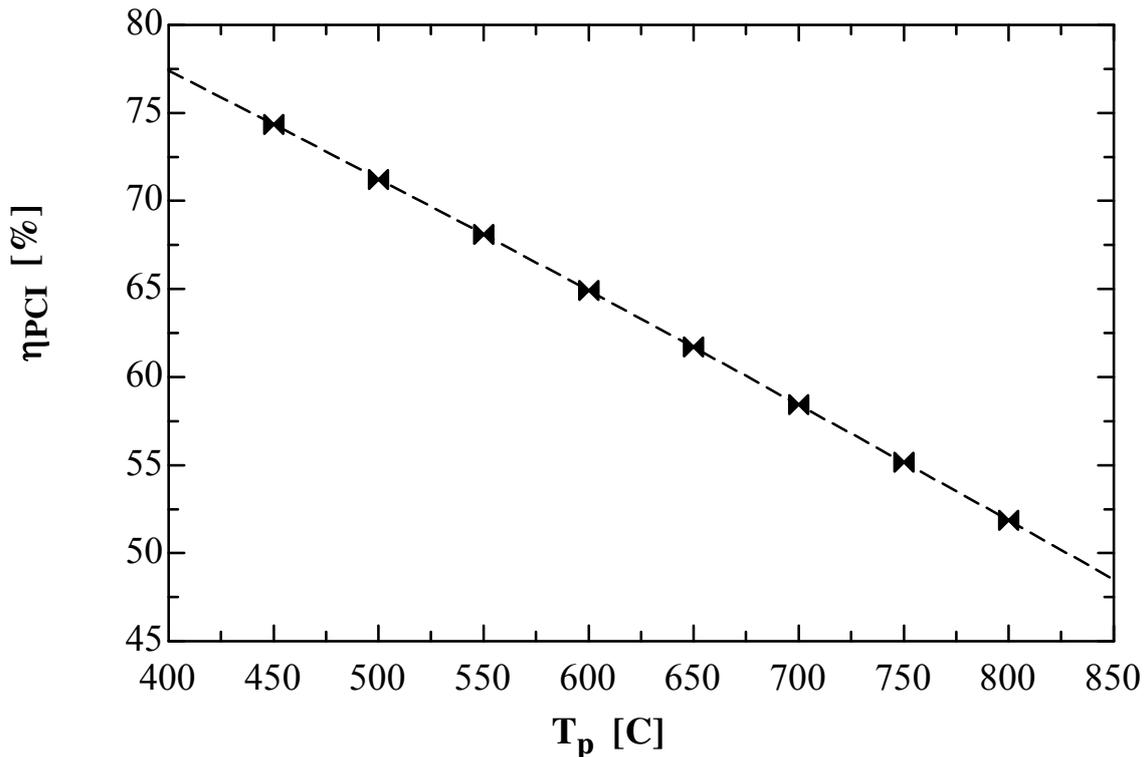


Figura 4.7 – Rendimento energético (baseado no PCI do gás natural) do forno em função da temperatura dos gases de exaustão.

Verifica-se nas Figuras 4.7 e 4.8 que a medida que a temperatura dos gases de combustão na saída do forno aumenta, a quantidade de calor disponível para ser usada no forno diminui. Isto ocorre de forma linear e está em concordância com a Figura 4.9. Observa-se que, enquanto a quantidade de calor disponível varia de $\cong 262$ kW até $\cong 165$ kW, seu rendimento energético variou de $\cong 77$ % para $\cong 47$ %, respectivamente.

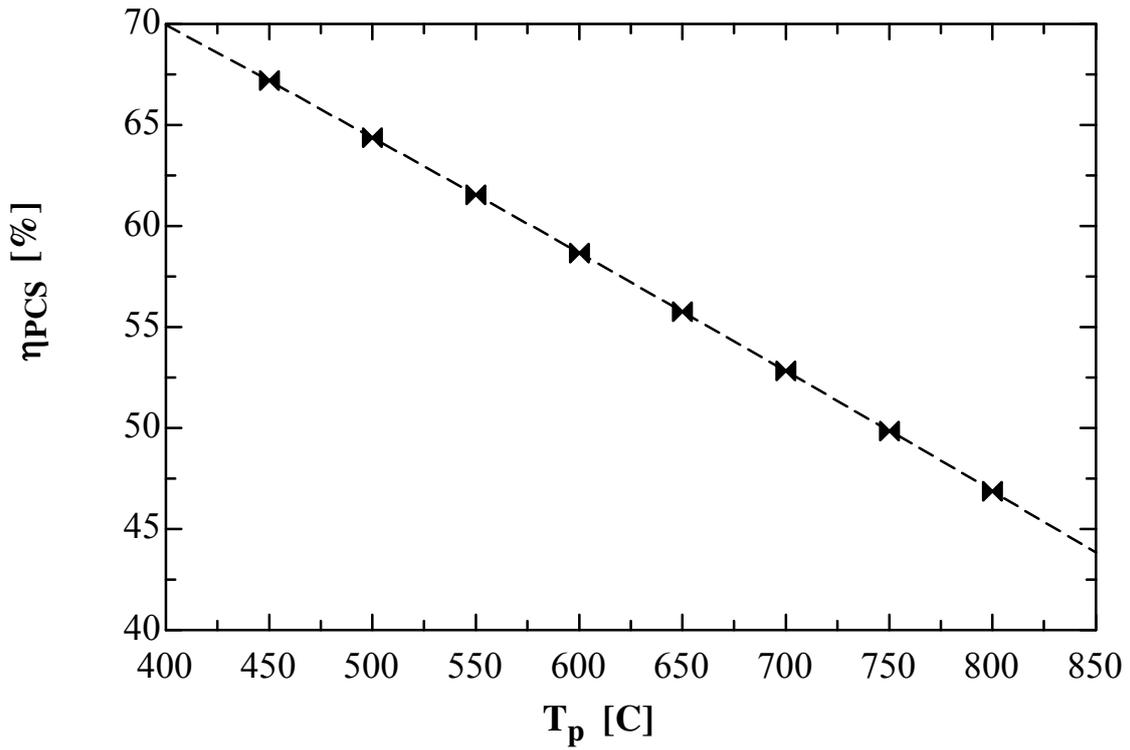


Figura 4.8 – Rendimento energético do forno (baseado no PCS do gás natural) em função da temperatura dos gases de exaustão.

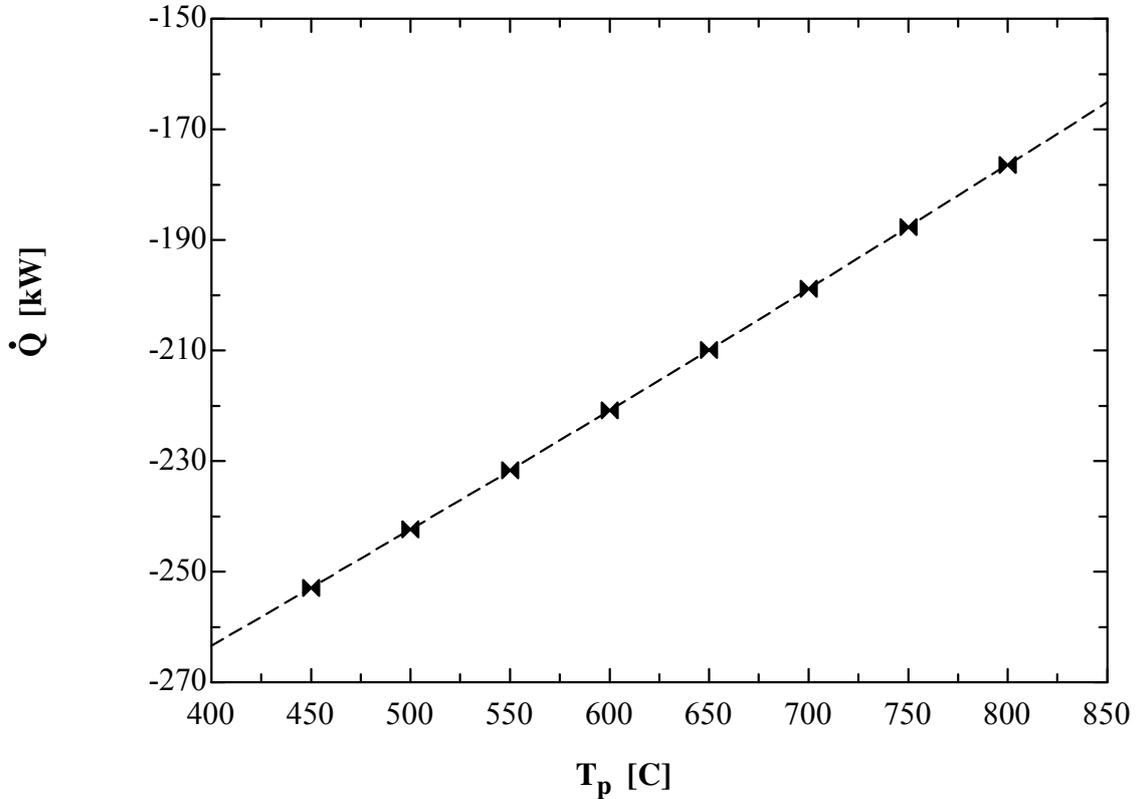


Figura 4.9 – Calor liberado durante a combustão do gás natural em função da temperatura dos gases de exaustão.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 apresentam-se o rendimento energético em função da temperatura do ar na entrada do forno. Verifica-se que quanto maior a temperatura, maior será o rendimento do forno e a quantidade de calor disponível para ser usada, no entanto, esta variação não foi tão significativa (Figura 4.12).

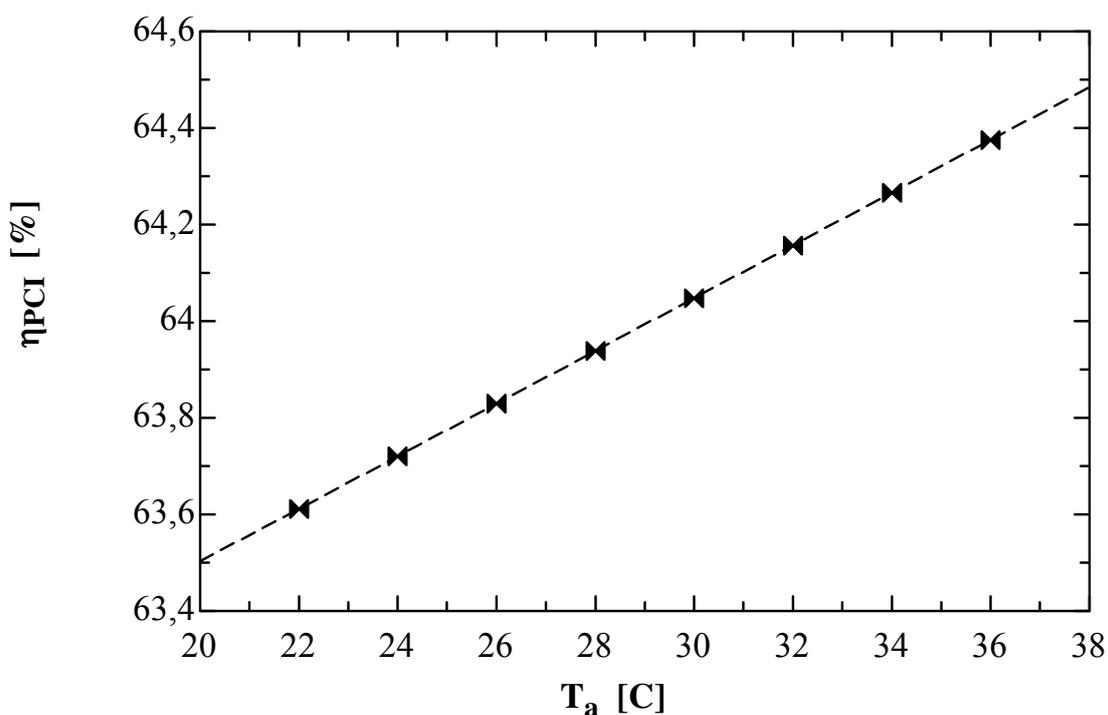


Figura 4.10 – Rendimento energético do forno (baseado no PCI do gás natural) em função da temperatura do ar na entrada do forno.

Nas Figuras 4.13 apresenta-se o rendimento exergético em função da temperatura do ar dos gases de exaustão. Nota-se que quanto maior a temperatura, menor será a eficiência do forno.

Na Figura 4.14 apresenta-se o rendimento exergético em função da temperatura do ar na entrada do forno. Verifica-se que quanto maior a temperatura, maior será o rendimento do forno e a quantidade de calor disponível para ser usada no mesmo. No entanto, esta variação foi insignificante, correspondendo a 1%.

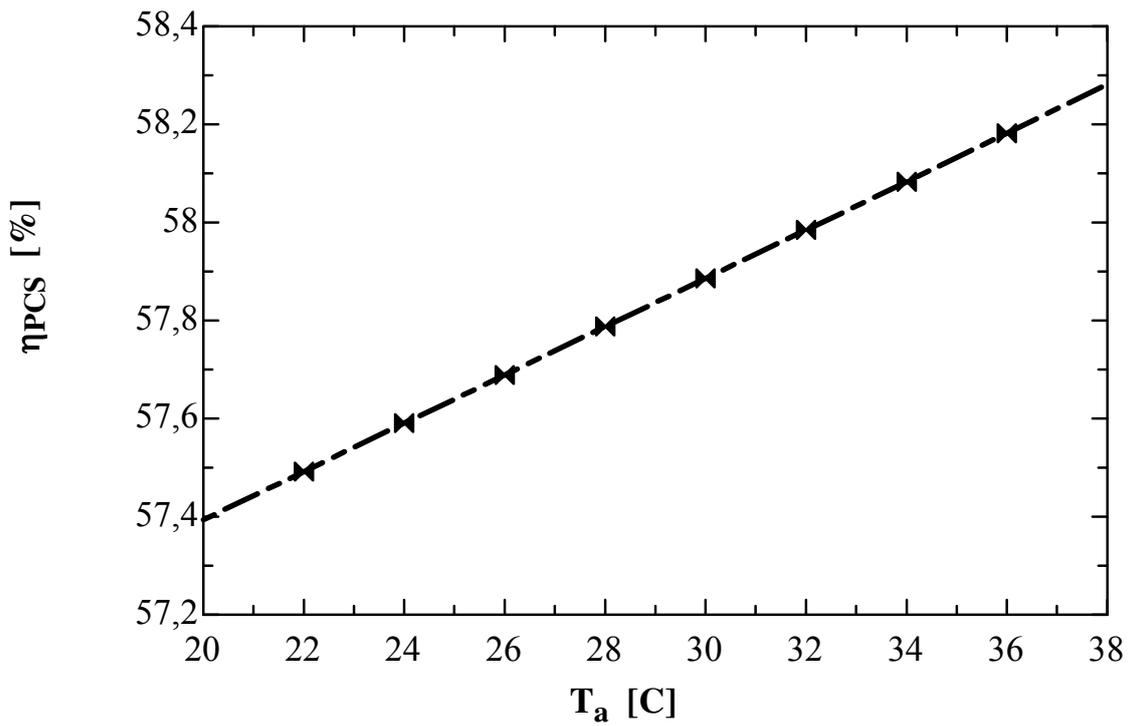


Figura 4.11 – Rendimento energético do forno (baseado no PCS do gás natural) em função da temperatura do ar na entrada do forno.

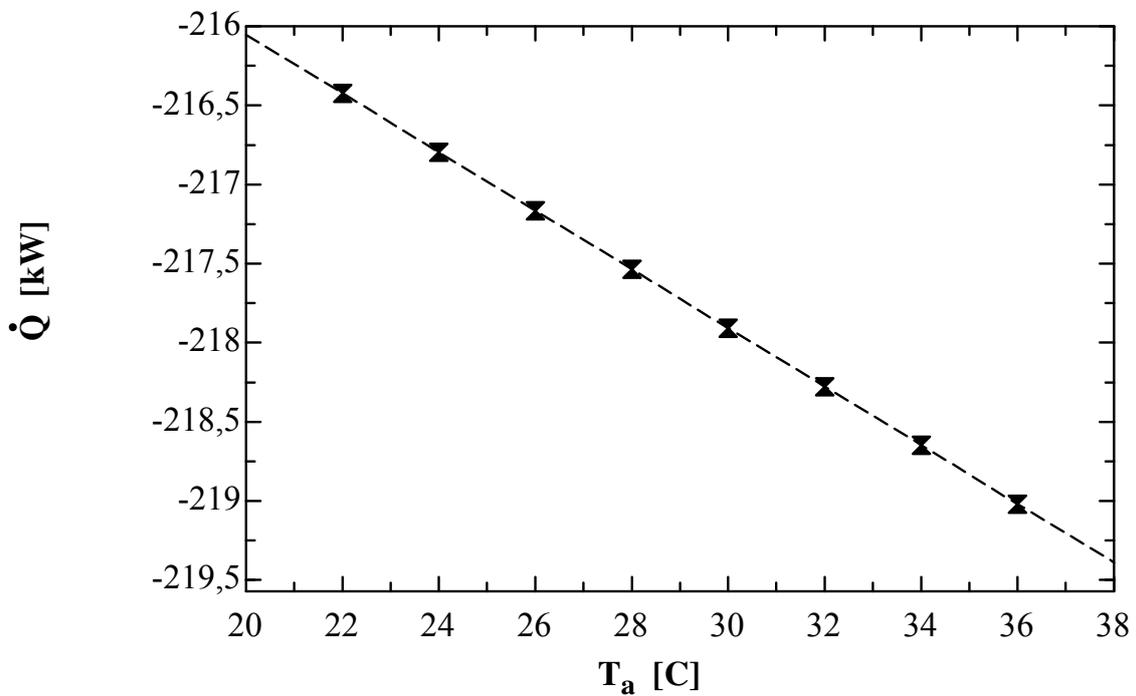


Figura 4.12 – Calor liberado durante a combustão do gás natural em função da temperatura do ar na entrada do forno.

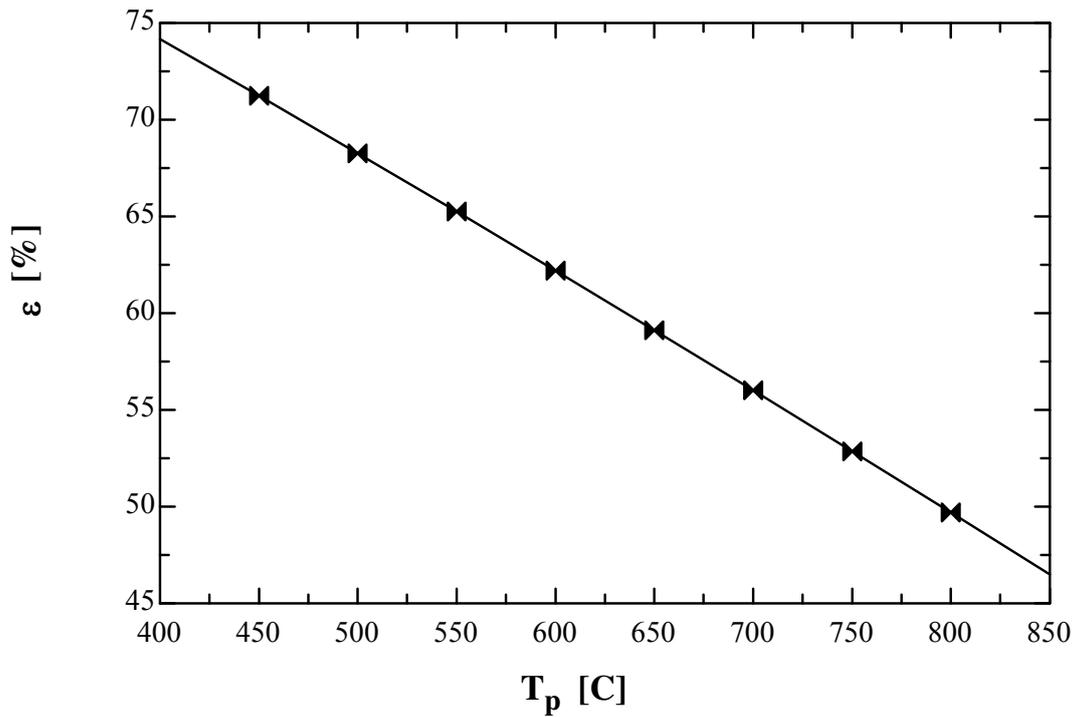


Figura 4.13 – Rendimento exérgico do forno em função da temperatura dos gases de exaustão.

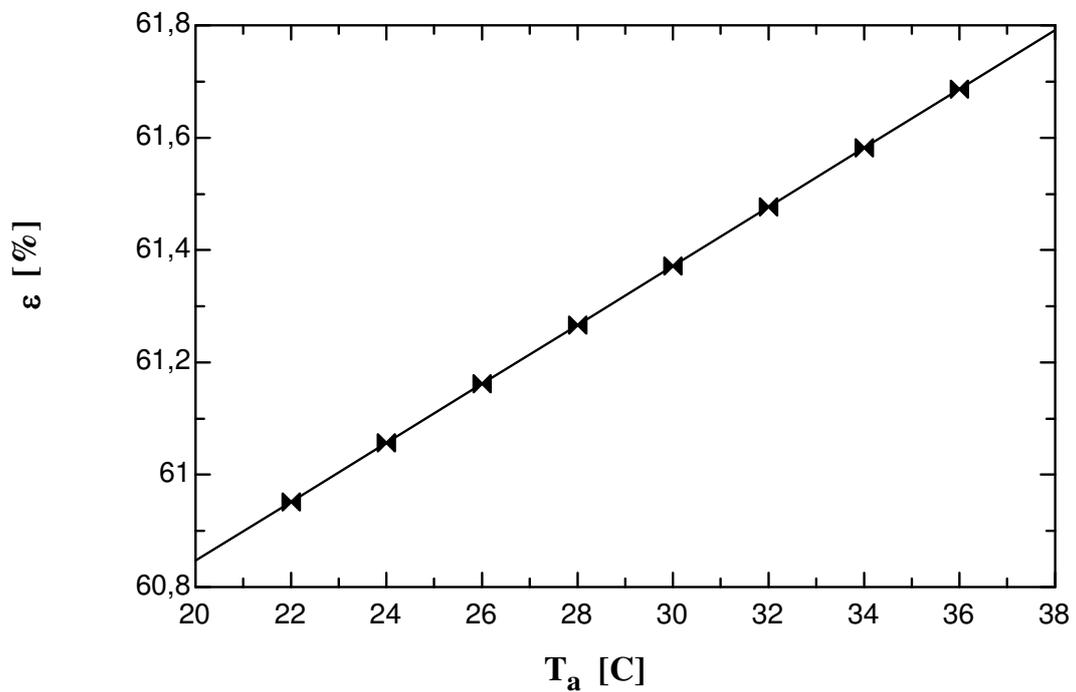


Figura 4.14 – Rendimento exérgico do forno em função da temperatura do ar na entrada do forno.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1. Conclusões

Baseado nos resultados teóricos e experimentais obtidos nesta pesquisa, as seguintes conclusões podem ser citadas:

- a) O forno-secador apresenta um bom rendimento térmico, visto que, a temperatura no seu interior alcançou 941.62°C , num tempo de 825 minutos, sem isolamento térmico.
- b) A uniformidade da temperatura dentro do forno pode ser destacada como um equipamento que produzirá produtos com boa qualidade térmica.
- c) A temperatura fora do forno não se elevou de forma brusca, mostrando que não ocorreu muita perda de energia para a parte externa do mesmo.
- d) A análise dos gases de combustão demonstra que há pouca emissão de gases poluentes. Desta forma, o gás natural é um combustível pouco poluidor da atmosfera terrestre.
- e) As paredes superiores do forno-secador não suportaram as altas temperaturas e racharam, com uma taxa de aquecimento de $1,10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.
- f) À medida que a temperatura dos gases de combustão aumenta de 400 à 850°C , o rendimento energético do forno diminuiu de $77,4$ para $48,5\%$.

- g) Para dias mais quentes, ou seja, temperatura ambiente mais elevada observa-se um maior rendimento energético do forno. Quando a temperatura do ar variou de 20 até 38°C, o rendimento energético do forno variou de 63,4 para 64,6%.

- h) A eficiência exergética do forno apresentou resultados muito próximos da eficiência energética, variando de 46,5 até 74,1% quando a temperatura dos produtos de combustão variou de 400 até 850 °C.

5.2. Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser citados:

- a) Fazer uma análise dos gases de exaustão, verificando o reaproveitamento dos mesmos para o processo de secagem ou para o pré-aquecimento de produtos.

- b) Analisar a evaporação da umidade residual dos produtos durante seu aquecimento até a temperatura de queima.

- c) Fazer um estudo energético do forno, desta vez sob o ponto de vista da estrutura do forno.

- d) Fazer um estudo energético do forno, desta vez com o forno isolado e analisando o comportamento do tijolo a ser seco e queimado no interior do forno.

- e) Analisar a viabilidade do forno-secador ser utilizado para secagem e/ou queima de diferentes produtos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAKUMOV, V. G. **Analyzing the heating and cooling of products in a high temperature tunnel kiln**. Refractories, v. 9, n. 2, p. 77-82, 1968.

ABBAKUMOV, V. G., MOCIU, E. F. **Mathematical model, computation method and insurance of the temperature distributions in the firing zone of a tunnel kiln**. Refractories, n. 2, p. 19-25, 1981.

ABC, Associação Brasileira de Cerâmica. **Anuário brasileiro de cerâmica 2003**. São Paulo: ABC, 2003.

ABNT, NBR 7171 – Bloco Cerâmico para Alvenaria – junho 1983.

ABREU, Y. V.; GUERRA, S. M. G. Indústria de cerâmica no Brasil e o meio ambiente. Chile: IV Congresso Nacional de Energía, 2000.

ALMEIDA, G. S. **Simulação e experimentação da secagem e queima de materiais cerâmicos em um forno/secador**. 2006. 37p. Relatório (Doutorado em Engenharia de processos), Departamento de Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

ALMEIDA, G. S. **Simulação e Experimentação da Secagem de Cerâmica Vermelha em Sistemas Térmicos Industriais**, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2009. 211p. Tese (Doutorado).

Ambiente Brasil S/S Ltda. Disponível em:
www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/gasnatural.html - 58k Acessado em 20 de julho de 2006, às 9h50min.

AVELINO, D. O. **Transporte de calor e massa durante a secagem de tijolos vazados via volumes finitos**. 2006. 61p. Relatório PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica). Departamento de Engenharia Mecânica. Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa. Universidade Federal da Paraíba.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. Novos materiais para construção civil. Volume 2. 5ª edição. JC Editora. Rio de Janeiro. 1994.

BRISTOT, V. M.. **Máquinas e equipamentos para cerâmica**: [s.l.].Luana Ltda, 1996.

Combustão. Disponível em: <http://us.geocities.com/organicabr/combustao.html>. Acessado em 20 de julho de 2006, às 10h40min.

CTGÁS (Centro Tecnológico do Gás). Disponível em www.ctgas.com.br. Acessado em 31 de julho de 2006, às 15h30min.

DADAM, A. P., NICOLAU, V. P., LEHMKUHL, W. A., HARTKE, R. F., KAWAGUTI, W. M., JAHN, T. G. **Uso do gás natural na queima de produtos de cerâmica vermelha**. LabCet – Depto. de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina.2006.

DUGWELL, D. R., OAKLEY, D. E. **A model of heat transfer in tunnel kilns used for firing refractories**. International Journal Heat Mass Transfer, v. 31, n. 11, p. 2381-2390, 1988.

FACINCANI, E. **Tecnologia ceramica: i laterizi**. 2.ed. Itália: Faenza, 1992.

FORTES, H. R. T. C., **Secagem e queima em cerâmica vermelha**, XXVII Encontro Nacional da ANICER – Seminário de Tecnologia em Cerâmica. São Paulo, 1998.

FREITAS, F. C. G. **Análises termográficas na queima de cerâmica vermelha, em fornos intermitentes a gás GLP, da região de Ceará-Mirim**. 2003. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Programa

de Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Tecnologias, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

GARDIEK, H. O., SCHOLZ, R. **Thermal technology for tunnel kiln firing in the ceramic industry**. Interceram, v. 30, p. 4-6, 1981.

GONÇALVES, J. A. S. **Materiais de construção para o seu projeto** – Coleção Aprendendo a Construir. 2003.

HENRIQUES JR., M. F., SCHWOB, M. R. V., FERREIRA JR., J. A 1993, **Manual de conservação de energia na indústria de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro. Ministério de Ciência e Tecnologia/INT.

Indústria de Cerâmica Cincera. Disponível em www.cincera.com.br. Acessado em 12 de julho de 2006, às 14:00h.

JUSTO, J. L. A. **Avaliação da distribuição de temperatura em forno cerâmico utilizando o método dos volumes finitos**. Dissertação de Mestrado. UFRN/POSMEC. Natal, 1999.

KOTAS, T. J., 1985 **The exergy method of thermal plant analysis**. Butterworths, 296p

LECHNER, H. **Queima de combustíveis gasosos versus combustíveis líquidos**. In: Seminário Gás Natural e Meio Ambiente. Palestras. São Paulo, 1997.

LEHMKUHL, W. A., **Análise numérica e experimental de um secador contínuo tipo túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha**. 2004. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

MELO M. A. F., **Caracterização de algumas matérias primas cerâmicas do Rio Grande do Norte para uso em cerâmica branca**. Relatório Técnico, FIERN/SENAI/UFRN/ FUNPEC (1998).

MORAN, M. S., SHAPIRO, H. N. X. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5ª Edição, New York: John Wiley e Sons. 2003.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômeno de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos**. 2002. 199 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica. Centro de Tecnologia. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba.

NERI, J. T. C. F., **Gás natural na indústria cerâmica**. Natal, CTGÁS, 1998.

NICOLAU, V. P., HARTKE, R. F., LEHMKUHL, W. A., KAWAGUTI, W. M. JAHN, T.G., SANTOS, G. M., 2002, **Análise numérica e experimental de um forno túnel utilizado em cerâmica vermelha**. In: ENCIT 2002 – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. Caxambu-MG.

PADRÓS, P. D. **El secadero túnel**. Técnica Cerâmica, n 235, p. 482-486, jul.-ago. 1995.

PBGÁS – Companhia Paraibana de Gás. Disponível em: <http://www.pbgas.pb.gov.br/gasnat.shtml>. Acessado em 20 de julho de 2006, às 11 h.

POLLINI FILHO, E., **Combustão e queimadores**. São Paulo, Associação Brasileira de Cerâmica, 1978.130 p.

READ, H. **O Significado da arte**. Portugal: Ulisseia, 1968.

REEDS, J. S. **Drying ASM** Internacional Handbook Committee, p. 131-134, 1991.

RESENDE, M. P., **A utilização da argila através dos tempos** Revista Expressão nº 2, 2001.

SANTOS, G. M., **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha**. 2001. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica) Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

SENAI/CET TIJUCAS. **Curso de tecnologia em cerâmica vermelha** – Módulo massa, secagem, queima. SENAI/CET Tijucas, 1996.

SILVA, J. B. **Secagem e queima de tijolos cerâmicos vazados: simulação e experimentação**. 2006. 43p. Relatório (Doutorado em Engenharia de Processos) Departamento de Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

SOUSA, F. D. A., **Alguns aspectos da substituição de óleos combustíveis por gás natural em equipamentos industriais**. In: Seminário Gás Natural e Meio Ambiente. Palestras. São Paulo, 1997.

TAPIA, R. E. C., VILLAR, S. C., **Manual para a indústria de cerâmica vermelha**. Série uso eficiente de energia. Rio de Janeiro: SEBRAE, 2000.

Tipos de Telhas. Disponível em: www.hinkel.arq.br/hhtelhas/hhtelhas.html. Acessado em 20 de julho de 2006, às 10h10min.

TOMAZETTI, R. R., 2003. **Análise da produção de cerâmica vermelha da região central do estado do Rio Grande do Sul – UFSM**.

Universidade do oeste de Santa Catarina. Disponível em <http://unoescjba.edu.br/~laila/disciplinas/mat.con.civ/cap>. Acessado em 15 de agosto de 2006, às 09h40min.

VIEIRA, C. M. F., FEITOSA, H. S., MONTEIRO, S. N. **Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot**, Cerâmica Industrial, 8 (1), Janeiro/Fevereiro, 2003.

WYLEN, V. G., SONNTAG, R., BORGNAKKE, C. 1993, **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 4ª Edição, Edgard Blucher LTDA, Ann Arbor, Michigan.

WYLEN, V. G. J. e SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 2ª edição. Jonh & Sons, 1976.

XU, Zhongsheng. **Energy saving ways of the refractory industrial tunnel kilns**. Refractories, n. 3, p. 51-53, 1984.

YU, Boming. **Dynamic modeling of a tunnel kiln**. Heat Transfer Engineering, v. 15, n. 2, p. 39-52, 1994.

ZANDONADI, R., **Estudo Tecnológico de Argilas Brasileiras**. 1995. Tese de Doutorado do Instituto de Química da USP, São Paulo.

APÊNDICE

Código Computacional no software Engineering Equation Solver (EES).

```

{ Análise Energética e Exergética de um Forno a gas}
{ Forno Operando com Gás}
" Dados: T_c : temperatura do combustível na entrada do motor em C"
"      P_c : pressão do combustível na entrada do motor em Pa"
"      T_a : temperatura do ar na entrada do motor em C"
"      P_a : pressão do ar na entrada do motor Pa"
"      T_p: temperatura dos produtos da combustão na saída do motor em C"
"      P_p : pressão dos produtos da combustão na saída do motor em Pa"
"      m_dot_f : fluxo de massa dos produtos da combustão"
"      W_dot: Potência desenvolvida pelo motor"
"      Q_dot: Taxa de transferência de calor para o ambiente"
"      M_c: massa molecular do combustível em kmol de comb/kg de ar"
"      M_ar: massa molecular do ar= 28,97 kg de ar/kmol de ar"
"      M_Car: Massa molec do carbono = 12 kmol de C/kg de C"
"      M_H: Massa molec do hidrogenio = 1,008 kmol de H/kg de H"
"      M_O: Massa molec do oxigenio= 16 kmol de O/kg de O"
"      M_N: Massa molec do nitrogenio = 14,01 kmol de N/kg de N"
"      AC_bar: razão ar-combustível em base molar em kg de ar/ kg de combustível "
"      AC: Razão ar-combustível em base mássica em kg de ar/ kg de combustível"
"      AC_bar_t: razão ar-combustível em base molar em kg de ar/ kg de combustível "
"      AC_t: Razão ar-combustível em base mássica em kg de ar/ kg de combustível"
"      n_comb10: numero de kmoles de combustível presentes em 10 m**3, a 300 K e 1
bar"
"      m_c: massa de combustível em kg"
"      M_p: massa molecular dos produtos em kmol/kg"
"      m_prod: massa total dos produtos"
"      n_p: quantidade total de produtos da combustão em kmol de produto/kmol de
combustível"
"      n_prod10: quantidade total em kmoles de produtos formados por 10 m**3 de
combustível"
"      P: percentagem de ar teórico"
"      y_CH4: fração molar de CH4 ou coeficiente da equação química"
"      y_C2H6: fração molar de C2H6 ou coeficiente da equação química"
"      y_C3H8: fração molar de C3H8 ou coeficiente da equação química"
"      y_C4H10: fração molar de C4H10 ou coeficiente da equação química"
"      y_N2: fração molar de N2 no combustível ou coeficiente da equação química"
"      y_CO2: fração molar de CO2 ou coeficiente da equação química"
"      y_CO: fração molar de CO ou coeficiente da equação química"
"      y_O2: fração molar de O2 ou coeficiente da equação química"
"      y_N2p: fração molar de N2 nos produtos de combustão ou coeficiente da equação
química"
"      y_H2Ovp: Fração molar do vapor água, por kmol de produto"
T_a=27 [C]
P_a=100000 [Pa]
T_p=616 [C]
P_p=100000 [Pa]

"1- Pesos moleculares em kg/kmol"

M_ar = MOLARMASS(Air)
M_CH4=MOLARMASS(CH4)
M_C2H6=MOLARMASS(C2H6)
M_C3H8=MOLARMASS(C3H8)
M_C4H10= MOLARMASS(C4H10)
M_C5H12= MOLARMASS(n-pentane)
M_C6H14= MOLARMASS(C6H14)
M_CO2= MOLARMASS(CO2)
M_CO=MOLARMASS(CO)
M_N2=MOLARMASS(N2)

```

M_O2=MOLARMASS(O2)
M_H2O = MOLARMASS(H2O)

"2 - Determinação da mistura ar-combustível para uma queima completa"

"Equação química: $C_n H_{2n+2} + a \left(\frac{3n+1}{2} \right) (O_2 + 3,76 N_2) = n CO_2 + (n+1) H_2 O + (3,76 a \left(\frac{n+1}{2} \right) N_2 + \left(\frac{3n+1}{2} \right) (a-1) O_2$ "

" Nesta análise supõe-se o N₂ um gás inerte"

" Razão ar-combustível em base molar: $AC_{bar} = a \left(\frac{3n+1}{2} \right) (1+3,76) / 1 = a (7,14n+2,38)$ kmol de ar/kmol de combustível "

" Razão ar-combustível em base mássica: $AC = AC_{bar} \cdot M_{ar} / M_c = (a(206,8458n+68,9486) / (14,02n+2,02))$ kg de ar/kg de combustível "

" Massa molecular do combustível considerado: $M_c = n \cdot \text{massa molec do carbono} + (2n+2) \cdot \text{massa molec do hidrogenio} = 14,02n + 2,02$ kg de comb/kmol de comb"

"3- Análise da combustão do gás natural"

"3.1- Problema analisado. Um gás natural apresenta a seguinte composição química na base molar: Considerando a

mistura combustível como um gás ideal e para 1 kmol dessa mistura, temos a seguinte equação química:

$y_{CH4} \cdot CH_4 + y_{C2H6} \cdot C_2H_6 + y_{C3H8} \cdot C_3H_8 + y_{C4H10} \cdot C_4H_{10} + y_{C5H12} \cdot C_5H_{12} + y_{C6H14} \cdot C_6H_{14} + y_{CO2} \cdot CO_2 + y_{N2} \cdot N_2 + a(O_2 + 3,76 N_2) =$

$b(y_{CO2} \cdot CO_2 + y_{CO} \cdot CO + y_{O2} \cdot O_2 + y_{N2} \cdot N_2) + c H_2O$

onde a, b e c são coeficientes a serem determinados da equação química "

"3.2- Frações molares do combustível em kmol do componente/kmol de combustível"

y_CH4=0,87563	"kmol de CH4/kmol de combustível"
y_C2H6=0,09586	"kmol de C2H6/kmol de combustível"
y_C3H8=0,00423	"kmol de C3H8/kmol de combustível"
y_C4H10=0,00086	"kmol de C4H10/kmol de combustível"
y_C5H12=0,00050	"kmol de C5H12/kmol de combustível"
y_C6H14=0,00061	"kmol de C6H14/kmol de combustível"
y_N2=0,00982	"kmol de N2/kmol de combustível"
y_CO2=0,01247	

"3.3 - Frações molares dos produtos em base seca"

yp_CO2=0,0782	"kmol de CO2/kmol de combustível"
yp_CO=0,002	"kmol de CO/kmol de combustível"
yp_O2=0,07	"kmol de O2/kmol de combustível"
yp_N2=0,85	"kmol de N2 nos produtos/kmol de combustível"

"4- Determinação dos coeficientes a, b e c da equação química"

$y_{CH4} \cdot 1 + (y_{C2H6}) \cdot 2 + y_{C3H8} \cdot 3 + y_{C4H10} \cdot 4 + y_{C5H12} \cdot 5 + y_{C6H14} \cdot 6 + y_{CO2} \cdot 1 = b(y_{CO2} + y_{CO})$
 $y_{CH4} \cdot 4 + (y_{C2H6}) \cdot 6 + y_{C3H8} \cdot 8 + y_{C4H10} \cdot 10 + y_{C5H12} \cdot 12 + y_{C6H14} \cdot 14 = 2 \cdot c$
 $y_{CO2} \cdot 2 + 2 \cdot a = b(y_{CO2} \cdot 2 + y_{CO} + y_{O2} \cdot 2) + c$

"4-1 Cálculo da razão ar-combustível em base molar para 1 kmol de combustível"

$$AC_{\text{bar}} = a \cdot (1 + 3,76) / 1 \quad \text{"kmol de ar/kmol de combustível"}$$

"4-2 Cálculo da razão ar-combustível em base mássica"

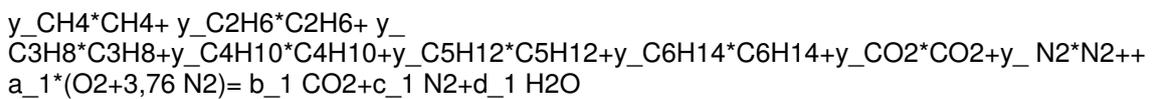
"Massa molecular do combustível: M_c "

$$M_c = y_{\text{CH}_4} \cdot (M_{\text{CH}_4}) + y_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot (M_{\text{C}_2\text{H}_6}) + y_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot (M_{\text{C}_3\text{H}_8}) + y_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot (M_{\text{C}_4\text{H}_{10}}) + y_{\text{C}_5\text{H}_{12}} \cdot (M_{\text{C}_5\text{H}_{12}}) + y_{\text{C}_6\text{H}_{14}} \cdot (M_{\text{C}_6\text{H}_{14}}) + y_{\text{CO}_2} \cdot (M_{\text{CO}_2}) + y_{\text{N}_2} \cdot (M_{\text{N}_2}) \quad \text{"kg/kmol de combustível"}$$

$$AC = AC_{\text{bar}} \cdot M_{\text{ar}} / M_c \quad \text{"kg de ar/kg de combustível"}$$

"4.3- Cálculo da quantidade de ar teórica"

"Para o cálculo da quantidade de ar teórica considere a equação abaixo:



4.4- Determinação dos coeficientes a_1 , b_1 , c_1 e d_1 da equação da combustão completa acima que fornece a quantidade de ar teórico"

$$\begin{aligned} y_{\text{CH}_4} \cdot 1 + (y_{\text{C}_2\text{H}_6}) \cdot 2 + y_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot 3 + y_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot 4 + y_{\text{C}_5\text{H}_{12}} \cdot 5 + y_{\text{C}_6\text{H}_{14}} \cdot 6 + y_{\text{CO}_2} \cdot 1 &= b_1 \\ y_{\text{CH}_4} \cdot 4 + (y_{\text{C}_2\text{H}_6}) \cdot 6 + y_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot 8 + y_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot 10 + y_{\text{C}_5\text{H}_{12}} \cdot 12 + y_{\text{C}_6\text{H}_{14}} \cdot 14 &= d_1 \cdot 2 \\ y_{\text{CO}_2} \cdot 2 + 2 \cdot a_1 &= 2 \cdot b_1 + d_1 \\ (y_{\text{N}_2}) \cdot 2 + a_1 \cdot 3,76 \cdot 2 &= c_1 \cdot 2 \end{aligned}$$

"4.5- A razão ar-combustível teórico em base molar é dada por:"

$$AC_{\text{bar}_t} = a_1 \cdot (1 + 3,76) / 1 \quad \text{"kmol de ar/kmol de combustível"}$$

"4.6- A percentagem de ar teórico P é dada por:"

$$P = (AC_{\text{bar}} / AC_{\text{bar}_t}) \cdot 100 \quad \text{"em percentagem"}$$

"4.7- A quantidade de combustível em kmoles presentes em 10 m^3 de mistura a 27°C e $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$, é dada por:"

$$\begin{aligned} V &= 10 \text{ [m}^3\text{]} \\ R_{\text{bar}} &= 8314 \text{ [N.m/kmol.k]} \\ n_{\text{comb}10} &= (P_a \cdot V) / (R_{\text{bar}} \cdot 300) \quad \text{"kmoles"} \end{aligned}$$

" 4.8 - A massa de combustível, $m_{\text{comb}10}$, em kg, neste volume é dada por:"

$$m_{\text{comb}10} = n_{\text{comb}10} \cdot M_c \quad \text{"kg"}$$

"4.9 - Quantidade total de produtos da combustão, n_p , em kmoles de produto para um kmol de combustível"

$$n_p = b \cdot (y_p_{\text{CO}_2} + y_p_{\text{CO}} + y_p_{\text{O}_2} + y_p_{\text{N}_2}) + c \quad \text{"kmoles de produtos de combustão/kmoles de combustível"}$$

"4.10 - Quantidade total em kmoles de produtos formados por 10 m^3 de combustível, $n_{\text{prod}10}$, é dado por:"

$$n_{\text{prod}10} = n_p \cdot n_{\text{comb}10} \quad \text{"kmoles de produtos formado na combustão de } n_{\text{comb}10} \text{ kmoles de combustível"}$$

"4.11-Massa molecular dos produtos: M_p ($b(0,078 CO_2+0,002 CO+0,07 O_2+0,85 N_2)+c H_2O$) em kg de prod/kmol de produto"

$M_p=(1/n_p)*(b*(y_p_{CO2}*M_{CO2}+y_p_{CO}*M_{CO}+y_p_{O2}*M_{O2}+y_p_{N2}*M_{N2})+c*M_{H2O})$
"kg/ kmoles de produto"

"4.12 Massa de produto formada com a queima de de $10 m^3$ de combustível, onde é gerado n_{prod10} kmoles de produto"

$m_{prod10}=M_p*n_{prod10}$ "kg"

"4.13 Verificação da conservação da massa entre combustível e produtos gerados"

"Massa de ar necessária para queimar $10 m^3$ de combustível, m_{ar10} "

$m_{ar10}=n_{comb10}*AC_{bar}*M_{ar}$ "kg"

"Massa presente em 10^3 de combustível+massa de ar necessária para queimar este combustível, $m_{combar10}$ "

$m_{combar10}=n_{comb10}*M_c+m_{ar10}$ "kg"

"O que concorda com os resultado de m_{prod} . A diferença é devido a erros de arredondamento"

"4.14- Fração molar do vapor água, y_{H2Ovp} em kmoles por kmol de produto"

$y_{H2Ovp}= c/n_p$ "kmoles de H2O/kmoles de produto"

"Pressão parcial do vapor d'água nos produtos em Pa, P_{vp} , é:"

$P_{vp}=y_{H2Ovp}*P_p$ "Pa"

{Temperatura de ponto de orvalho, ou seja, temperatura de saturação correspondente a P_{vp} , em C}

$T_{orvalho}=T_{SAT}(Steam;P=P_{vp})$ "C"

"Para temperatura dos gases de descarga inferiores a $T_{orvalho}$ o vapor d'água nos produtos se condensará"

"5. Análise energética para o motor operando com gás natural "

"Considere a equação química abaixo, onde os coeficientes já foram determinados anteriormente:

$y_{CH4}*CH_4+ y_{C2H6}*C_2H_6+ y_{C3H8}*C_3H_8+y_{C4H10}*C_4H_{10}+y_{C5H12}*C_5H_{12}+y_{C6H14}*C_6H_{14}+y_{CO2}*CO_2+y_{N2}*N_2+a*(O_2+3,76 N_2)=$

$b*(y_p_{CO2}*CO_2+y_p_{CO}* CO+y_p_{O2}* O_2+y_p_{N2}*N_2)+c H_2O$

onde todos os componentes são tratados como gases ideais. A primeira lei da termodinâmica para sistemas onde existem reações químicas é dada por:

$Q_{dot}/n_{dot}_c= W_{dot}/n_{dot}_c+ h_{bar}_p-h_{bar}_r$

onde n_{dot_c} é a vazão em kmol/s da mistura combustível. As entalpias dos componentes envolvidos neste problema são:"

$h_{bar_27c_CH4}=ENTHALPY(CH4;T=T_a)$
 $h_{bar_27c_C2H6}=ENTHALPY(C2H6;T=T_a)$
 $h_{bar_27c_C3H8}=ENTHALPY(C3H8;T=T_a)$
 $h_{bar_27c_C4H10}=ENTHALPY(C4H10;T=T_a)$
 $h_{bar_27c_C5H12}=-146435+2,273*(T_a-25)$
 $h_{bar_27c_C6H14}=ENTHALPY(C6H14;T=T_a)$
 $h_{bar_27c_CO2}=ENTHALPY(CO2;T=T_a)$
 $h_{bar_27c_N2}=ENTHALPY(N2;T=T_a)$
 $h_{bar_27c_O2}=ENTHALPY(O2;T=T_a)$
 $h_{bar_616p_CO2}=ENTHALPY(CO2;T=T_p)$
 $h_{bar_616p_CO}=ENTHALPY(CO;T=T_p)$
 $h_{bar_616p_O2}=ENTHALPY(O2;T=T_p)$
 $h_{bar_616p_N2}=ENTHALPY(N2;T=T_p)$
 $h_{bar_616p_H2O}=ENTHALPY(H2O;T=T_p)$

"5.1-A entalpia dos reagentes é dada por:"

$h_{bar_27R}=y_{CH4}*h_{bar_27c_CH4}+ y_{C2H6}*h_{bar_27c_C2H6} +$
 $y_{C3H8}*h_{bar_27c_C3H8}+y_{C4H10}*h_{bar_27c_C4H10}+y_{C5H12}*h_{bar_27c_C5H12}+y_{C6}$
 $H14*h_{bar_27c_C6H14}+y_{CO2}*h_{bar_27c_CO2}+y_{N2}*h_{bar_27c_N2}+a*(1*h_{bar_27c_O2}+3$
 $,76*h_{bar_27c_N2})$
 "kJ/kmol de combustível"

"5.2- A entalpia dos produtos é dada por:"

$h_{bar_616P}=b*($
 $yp_{CO2}*h_{bar_616p_CO2}+yp_{CO}*h_{bar_616p_CO}+yp_{O2}*h_{bar_616p_O2}+yp_{N2}*h_{bar_6}$
 $16p_N2)+c*h_{bar_616p_H2O}$ "kJ/kmol de combustível"

"Considerando que a vazão em massa de combustível é 0,0072 kg/s, a vazão molar do combustível em kmoles/s é dada por:"

$m_{dot_c}=0,0072$ [kg/s]
 $n_{dot_c}=m_{dot_c}/M_c$ "kmoles/s"

"A taxa de transferência de calor do motor, em kW, para a vizinhança é dada por:"

$Q_{dot}=n_{dot_c}*(h_{bar_616P}-h_{bar_27R})$ "kW"

"5.3- Calculo do poder calorífico inferior, PCI, do combustível"

"O poder calorífico do combustível é definido como a diferença entre as entalpias dos produtos e a entalpia dos reagentes quando ocorre uma combustão completa

em uma certa temperatura e pressão. O poder calorífico de um combustível é um numero positivo. A reação para combustão completa é:

$y_{CH4}*CH4+ y_{C2H6}*C2H6+ y_{$
 $C3H8}*C3H8+y_{C4H10}*C4H10+y_{C5H12}*C5H12+y_{C6H14}*C6H14+y_{CO2}*CO2+y_{N2}*N2+$
 $a_1*(O2+3,76 N2)= b_1 CO2+c_1 N2+d_1 H2O$

O valor do poder calorífico será o módulo de (Q/m_c) em kJ/kg de combustível"

$T_{ref}=25$ [C]
 $P_{ref}=100000$ [Pa]

$h_{bar_25c_CH4}=ENTHALPY(CH4;T=T_{ref})$

$h_{bar_25c_C2H6}=ENTHALPY(C2H6;T=T_ref)$
 $h_{bar_25c_C3H8}=ENTHALPY(C3H8;T=T_ref)$
 $h_{bar_25c_C4H10}=ENTHALPY(C4H10;T=T_ref)$
 $h_{bar_25c_C5H12}=-146435+2,273*(T_ref-25)$
 $h_{bar_25c_C6H14}=ENTHALPY(C6H14;T=T_ref)$
 $h_{bar_25c_N2}=ENTHALPY(N2;T=T_ref)$
 $h_{bar_25c_O2}=ENTHALPY(O2;T=T_ref)$
 $h_{bar_25c_CO2}=ENTHALPY(CO2;T=T_ref)$
 $h_{bar_25p_CO2}=ENTHALPY(CO2;T=T_ref)$
 $h_{bar_25p_CO}=ENTHALPY(CO;T=T_ref)$
 $h_{bar_25p_O2}=ENTHALPY(O2;T=T_ref)$
 $h_{bar_25p_N2}=ENTHALPY(N2;T=T_ref)$
 $h_{bar_25p_H2O}=ENTHALPY(H2O;T=T_ref)$

"Poder calorífico inferior do combustível em kJ/kg"

$h_{bar_25R}=y_{CH4}*h_{bar_25c_CH4}+y_{C2H6}*h_{bar_25c_C2H6}+y_{C3H8}*h_{bar_25c_C3H8}+y_{C4H10}*h_{bar_25c_C4H10}+y_{C5H12}*h_{bar_25c_C5H12}+y_{C6H14}*h_{bar_25c_C6H14}+y_{CO2}*h_{bar_25c_CO2}+y_{N2}*h_{bar_25c_N2}+a_1*(1*h_{bar_25c_O2}+3,76*h_{bar_25c_N2})$ "kJ/kmol"

$h_{bar_25P}=b_1*h_{bar_25p_CO2}+c_1*h_{bar_25p_N2}+d_1*h_{bar_25p_H2O}$ "kJ/kmol "

$PCI=(h_{bar_25P}-h_{bar_25R})/M_c$ "kJ/kg"

"Poder calorífico superior do combustível"

"Entalpia de vaporização da água h_{vapor} em kJ/kg:"

$h_{bar_v}=ENTHALPY(Steam;T=T_ref;X=1)-ENTHALPY(Steam;T=T_ref;X=0)$

$h_{v_bar_25P}=b_1*h_{bar_25p_CO2}+c_1*h_{bar_25p_N2}+d_1*(h_{bar_25p_H2O}-h_{bar_v})$
 "kJ/kmol "

$PCS=(h_{v_bar_25P}-h_{bar_25R})/M_c$ "kJ/kg"

" A eficiência energética do motor de combustão interna baseada no PCI (a temperatura de ponto de orvalho não é atingida neste caso):"

$eta_PCI=((Q_dot/m_dot_c)/PCI)*100$ "em percentagem"

" A eficiência energética do motor de combustão interna baseada no PCS:"

$eta_PCS=((Q_dot/m_dot_c)/PCS)*100$ "em percentagem"

"Outro rendimento pela razão de ar"

$eta_raAC=(AC_bar_t/AC_bar)*100$

"3- A ANALISE EXERGÉTICA"

"A exergia associada a um dado estado especificado tem duas contribuições: a contribuição termomecânica, x^tmen , e a contribuição química, x^qui . A exergia total

por unidade de massa é dada por:

$$x_t = x^{tmech} + x^{quim} = [(h - h_0) - T_0 (s - s_0) + (V^2) / 2 + g \cdot z] + x^{quim}$$

Quando se avalia uma variação de exergia de um fluido onde sua composição química permanece a mesma, a contribuição da exergia química é nula

permanecendo apenas a diferença devido a contribuição termomecânica. Nos problemas de que envolvem combustão, a composição química do fluido é

modificada e a exergia química desempenha um papel importante. "

"A exergia química para uma mistura de gases ideais a T_0 e P_0 que consiste apenas nas substâncias presentes como gases no ambiente é obtida pela soma das

contribuições de cada componente e é dada por mol da mistura por:

$$x_{bar}^{quim} = (x_{quim}/M) = R_{bar} T_0 \sum (y_i \ln(y_i/y_i^e)) = \sum (y_i \cdot x_{bar}_i^{quim}) + R_{bar} T_0 \sum (y_i \ln(y_i))$$

onde y_i e y_i^e simbolizam,

respectivamente, a fração molar do componente i na mistura a T_0 e P_0 e no ambiente.

Para uma ampla gama de aplicações em Engenharia, a conveniência de utilizar valores padronizados geralmente compensa a pequena falta de precisão que tal

procedimento pode trazer. Particularmente, o efeito de pequenas variações de T_0 e P_0 em torno de seus valores padrões podem ser desprezadas.

Para hidrocarbonetos ($C_a H_b$), a exergia química pode ser aproximada em termos do poder calorífico inferior como segue (Li, 1996, pag 137).

Para hidrocarbonetos gasosos isoladamente

$$x_{bar}^{quim} / PCI^0 = 1,033 + 0,0169 (b/a) - (0,0698/a) = u$$

onde $1,04 \leq u \leq 1,06$ para gases naturais.

Para hidrocarbonetos líquidos

$$x_{bar}^{quim} / PCI^0 = 1,04224 + 0,011925 (b/a) - (0,042/a) = u$$

onde $1,04 \leq u \leq 1,08$ para óleos (diesel).

Há muitas situações onde o combustível hidrocarbonado $C_a H_b$ é parte de uma mistura de gases ideais. Quando a mistura está no estado (T_0, P_0) , o combustível

está no estado (T_0, y_i, P_0) . A exergia química do combustível nesta condição tem um valor diferente. A seguinte equação pode ser usada:

$$x_{bar}^{quim}(T_0, y_i, P_0) = x_{bar}^{quim}(T_0, P_0) + R_{bar} T_0 \ln(y_i)$$

onde y_i é a fração molar do componente i na mistura a T_0 e P_0 e no ambiente.

Para o problema em questão, o gás natural. As frações molares do gás são apresentadas no item 4.2.

A exergia química a T_0 e P_0 , segundo Kotas, 1985, é:"

$$x_{bar}_{CH4|0} = 836510 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$x_{bar}_{C2H6|0} = 1504360 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$x_{\text{bar_C3H8}|0} = 2163190 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$x_{\text{bar_C4H10}|0} = 2818930 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$x_{\text{bar_C5H12}|0} = 3477050 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$x_{\text{bar_C6H14}|0} = 4134590 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$x_{\text{bar_CO2}|0} = 20140 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$x_{\text{bar_N2}|0} = 720 \text{ [kJ/kmol]}$$

"As exergias químicas a T_0 e $y_i P_0$ são então:"

$$T_0 = 298 \text{ [K]}$$

$$x_{\text{bar_CH4}|quim} = x_{\text{bar_CH4}|0} + (R_{\text{bar}}/1000) * T_0 * \ln(y_{\text{CH4}})$$

$$x_{\text{bar_C2H6}|quim} = x_{\text{bar_C2H6}|0} + (R_{\text{bar}}/1000) * T_0 * \ln(y_{\text{C2H6}})$$

$$x_{\text{bar_C3H8}|quim} = x_{\text{bar_C3H8}|0} + (R_{\text{bar}}/1000) * T_0 * \ln(y_{\text{C3H8}})$$

$$x_{\text{bar_C4H10}|quim} = x_{\text{bar_C4H10}|0} + (R_{\text{bar}}/1000) * T_0 * \ln(y_{\text{C4H10}})$$

$$x_{\text{bar_C5H12}|quim} = x_{\text{bar_C5H12}|0} + (R_{\text{bar}}/1000) * T_0 * \ln(y_{\text{C5H12}})$$

$$x_{\text{bar_C6H14}|quim} = x_{\text{bar_C6H14}|0} + (R_{\text{bar}}/1000) * T_0 * \ln(y_{\text{C6H14}})$$

$$x_{\text{bar_CO2}|quim} = x_{\text{bar_CO2}|0} + (R_{\text{bar}}/1000) * T_0 * \ln(y_{\text{CO2}})$$

$$x_{\text{bar_N2}|quim} = x_{\text{bar_N2}|0} + (R_{\text{bar}}/1000) * T_0 * \ln(y_{\text{N2}})$$

"Nas condições ambiente, a exergia termomecânica é nula. Então, a exergia total para o gás natural é justamente a exergia química dada por:

$$x_{\text{bar_c}}^{\text{quim}} = \text{Somatório } (y_i * x_{\text{bar_ic}}^{\text{quim}}) = \text{Somatório } (y_i * (x_{\text{bar_i}}^{\text{quim}} + R_{\text{bar}} T_0 * \ln y_i)), \text{ ou seja:}"$$

$$x_{\text{bar_c}}^{\text{quim}} = y_{\text{CH4}} * x_{\text{bar_CH4}}^{\text{quim}} + y_{\text{C2H6}} * x_{\text{bar_C2H6}}^{\text{quim}} + y_{\text{C3H8}} * x_{\text{bar_C3H8}}^{\text{quim}} + y_{\text{C4H10}} * x_{\text{bar_C4H10}}^{\text{quim}} + y_{\text{C5H12}} * x_{\text{bar_C5H12}}^{\text{quim}} + y_{\text{C6H14}} * x_{\text{bar_C6H14}}^{\text{quim}} + y_{\text{CO2}} * x_{\text{bar_CO2}}^{\text{quim}} + y_{\text{N2}} * x_{\text{bar_N2}}^{\text{quim}}$$

$$x_{\text{c}}^{\text{quim}} = x_{\text{bar_c}}^{\text{quim}} / M_{\text{c}}$$

"Devido as irreversibilidades, dispositivos como os motores de combustão interna, produzem apenas uma fração uma do trabalho do valor máximo teórico que

poderia ser obtido em condições ideais. A razão entre o trabalho real desenvolvido e o trabalho máximo teórico é um tipo de eficiência exergética baseada na

Segunda Lei da Termodinâmica. Uma análise exergética pode sugerir maneiras termodinamicamente mais eficiente para uso do combustível utilizado no

desenvolvimento de potência. As limitações das melhorias são limitadas pelos custos adicionais envolvidos.

Para obtenção da eficiência exergética do motor, um balanço de exergia deve ser utilizado. Em regime permanente, a taxa na qual a exergia entra no motor é igual a

taxa na qual a exergia sai acrescentada da taxa na qual a exergia é destruída no interior do motor.

Considerando que o ar de combustão entra no motor na condição ambiente, e consequentemente com um valor nulo de exergia, apenas o combustível fornece a

exergia ao motor. A exergia sai do motor acompanhando o calor e o trabalho e com os produtos da combustão. Se a potência do motor é tomada como o produto do

motor e se a transferência de calor juntamente com os gases produzidos na saída são vistos como perdas, uma expressão para eficiência exergética, que mede

quanto da exergia na entrada do motor é convertida em produto é:

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{X}_c},$$

onde \dot{X}_c é a taxa na qual a exergia entra como o combustível.

Já que o combustível entra a 27 C e 101325 kPa, o que corresponde aos valores aproximados de T_0 e P_0 do ambiente, e sendo os efeitos de energia cinética e

potencial desprezíveis, a exergia do combustível é apenas a sua exergia química. Não existe contribuição termomecânica alguma. Assim:"

$$\dot{X}_c = \dot{m}_c \cdot x_{c|quim}$$

"E a eficiência exergética é: "

$$\epsilon = \left(-\frac{\dot{Q}}{\dot{X}_c} \right) \cdot 100$$