

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNO-CELULÓSICOS COMO
POTENCIAL ENERGÉTICO PARA A QUEIMA DE
BLOCOS CERÂMICOS: APLICAÇÃO EM UMA
INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA QUE
ABASTECE O DISTRITO FEDERAL**

DIRCEU MEDEIROS DE MORAIS

**ORIENTADORA: Prof^ª. Dr^ª. ROSA MARIA SPOSTO
CO-ORIENTADOR: Dr. WALDIR FERREIRA QUIRINO**

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**PUBLICAÇÃO: E.TD – 001 A/07
BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2007**

FICHA CATALOGRÁFICA

MORAIS, DIRCEU MEDEIROS DE

Briquetes de Resíduos Ligno-celulósicos como Potencial Energético para a Queima de Blocos Cerâmicos: Aplicação em uma Indústria de Cerâmica Vermelha que Abastece o Distrito Federal. [Distrito Federal, 2007].

xxviii, 229 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2007). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 1. Briquetes ligno-celulósicos | 2. Energia de biomassa |
| 3. Blocos cerâmicos | 4. Queima de blocos cerâmicos |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORAIS, D. M, Briquetes de Resíduos Ligno-celulósicos como Potencial Energético para a Queima de Blocos Cerâmicos: Aplicação em uma Indústria que Abastece o Distrito Federal. Tese de Doutorado, Publicação E.TD – 001A/07 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 230p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Dirceu Medeiros de Moraes.

TÍTULO: Briquetes de Resíduos Ligno-celulósicos como Potencial Energético para a Queima de Blocos Cerâmicos: Aplicação em uma Indústria que Abastece o Distrito Federal.

GRAU: Doutor. ANO: 2007

É cedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Dirceu Medeiros de Moraes
Rua Perimetral Norte, 182, Canarinho.
69.306-492 – Boa Vista/RR – Brasil.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre ter me guiado e dado entusiasmo para concluir esta missão de estudo;

A minha família, especialmente esposa e filhas, por ter compreendido os momentos ausentes, dedicados ao doutorado;

A orientadora, Dra. Rosa Maria Sposto, pela valiosa orientação e reconhecimento do meu trabalho;

Ao co-orientador, Dr. Waldir Ferreira Quirino, pela confiança e disponibilidade dos laboratórios do IBAMA/DF para realização parcial dos ensaios experimentais desta pesquisa;

A Universidade Federal de Roraima (UFRR) pela confiança e apoio financeiro, bem como a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES);

Aos professores da Universidade de Brasília (UnB) pelos ensinamentos ao longo do curso;

A Cerâmica União pela autorização do uso de suas instalações físicas, viabilizando a execução do trabalho de campo.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da UnB, pelos momentos acadêmicos e de entretenimento, em especial: Bruno, Carla, Cláudio, Elizandra, Getúlio, Isaura, Juliano, Michele, Nielsen, Otávio, Patrícia, Sávio e Tilson;

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios de Materiais da UnB, Severino e Xavier, pelo auxílio na realização de parte dos ensaios experimentais desta tese.

A todos os amigos de Boa Vista/Roraima que de certa forma contribuíram na realização desta conquista.

Dedicado a minha esposa DACILENE e
nossas filhas AYANA e NATÁLIA.

RESUMO

BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNO-CELULÓSICOS COMO POTENCIAL ENERGÉTICO PARA A QUEIMA DE BLOCOS CERÂMICOS: APLICAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA QUE ABASTECE O DISTRITO FEDERAL

Autor: Dirceu Medeiros de Moraes

Orientadora: Rosa Maria Sposto

Co-orientador: Waldir Ferreira Quirino

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, março de 2007

A indústria de cerâmica vermelha na cadeia produtiva da construção civil é uma das que mais consome energia, especialmente na fase de queima de seus produtos. Em alguns casos, como no Distrito Federal e Estado de Goiás, regiões consideradas neste trabalho, o combustível utilizado pela maioria das indústrias deste setor é a lenha nativa, o que tem causado impactos ambientais, tal como, a destruição da floresta nativa. Apesar disso, segundo a Associação Brasileira de Cerâmica, este segmento industrial apresenta, até hoje, um papel relevante para a economia nacional, gerando milhares de empregos e movimentando muitos recursos. Quanto à sua sustentabilidade ambiental, observa-se que os aspectos energéticos necessitam de mais pesquisas, como exemplo, desenvolvimento e aplicação de fontes alternativas de energia. Devido à escassez de lenha para a queima dos blocos, têm-se observado uma crescente utilização de resíduos florestais e agrícolas. O presente trabalho tem como objetivo o estudo da viabilidade técnica, energética e econômica de briquetes, resíduos ligno-celulósicos prensados, composto de serragem de madeira e casca de semente de algodão, utilizado em uma indústria de blocos cerâmicos que abastece o mercado de Brasília, tendo como referencial comparativo a lenha de eucalipto *urophilla*. Como metodologia procedeu-se à seleção do briquete, à sua caracterização, à análise da sua aplicação na fase de queima dos blocos cerâmicos e à avaliação de desempenho dos blocos queimados com este combustível. Os resultados indicaram um menor consumo de combustível quando da queima do briquete em comparação à lenha de eucalipto; entretanto a queima com lenha de eucalipto por sua vez mostrou-se mais econômica do ponto de vista financeiro.

ABSTRACT

BRIQUETTES OF LIGNOCELLULOSIC RESIDUES AS A POTENTIAL ENERGETIC SOURCE FOR BURNING CERAMIC BLOCKS: APPLICATION IN AN INDUSTRY OF RED CERAMIC THAT SUPPLIES DISTRITO FEDERAL

Autor: Dirceu Medeiros de Moraes

Supervisora: Rosa Maria Sposto

Co-supervisor: Waldir Ferreira Quirino

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, March of 2007

Red ceramic industry in the civil construction productive network is one of the industries that more consumes energy, especially in its burning products stage. In some cases, as in *Distrito Federal* and the state of *Goiás*, the areas considered in this work, the most consumed fuel by the industries was the native firewood. In spite of that, according to *Associação Brasileira de Cerâmica*, this industrial segment represents, as yet, a relevant role to the national economy, by engendering thousands of jobs and lots of resources. As for its environmental sustainability, it's clear that the energetic aspects need more researches, like the development and application of alternative sources of energy. Due to the firewood shortage to burn the blocks, the use of forest and agricultural residues is increasing each day. This research has as main objective to study the technical, energetic and economic viability of briquettes, lignocellulosic residues constituted of wood sawdust and peel of cotton seed, used in an industry of ceramic blocks that supplies *Brasília* industry, using as comparative referential the eucalyptus firewood. The methodology used is, once selected the briquette and its characterization, the analysis of its application using the ceramic blocks burning stage and the efficiency evaluation of the blocks burned in this fuel. The results indicates that the consumption in the burning with briquettes was lower than using eucalyptus firewood; however, the second one was more viable economically.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2 – OBJETIVOS DO TRABALHO	4
1.3 – ESTRUTURA DA TESE	4
2 – ENERGIA, BIOMASSA E BRIQUETES LIGNO-CELULÓSICOS COMO FONTE DE ENERGIA	6
2.1 – PRINCIPAIS FONTES DE ENERGIA USADAS NO MUNDO: GENERALIDADES, CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO	6
2.1.1 – Aspectos gerais pertinentes ao tema	6
2.1.2 – Fontes de energia: classificação	8
2.1.2.1 – Fontes de energia primárias	9
2.1.2.2 – Fontes de energia secundárias	11
2.1.3 – Seleção das fontes de energia	12
2.2 – BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA PARA A INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA	14
2.2.1 – Generalidades	14
2.2.2 – Potencial de biomassa como fonte de energia no Brasil	17
2.2.3 – Conversões da biomassa em energia: combustão (ou queima)	18
2.2.4 – Emissões de poluição durante a combustão	21
2.2.5 – Vantagens e desvantagens da biomassa como fonte de energia	23
2.3 – BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNO-CELULÓSICOS	24
2.3.1 – Generalidades	24
2.3.2 – Matérias-primas dos briquetes ligno-celulósicos	25
2.3.2.1 – Resíduos ligno-celulósicos	25
2.3.2.2 – Principais propriedades dos resíduos ligno-celulósicos como fonte de energia	26
2.3.3 – Técnicas de briquetagem de resíduos ligno-celulósico	29
2.3.4 – Principais propriedades dos briquetes de resíduos ligno-celulósicos	31
2.3.4.1 – Análise imediata	32
2.3.4.2 – Massa específica	36
2.3.4.3 – Expansão longitudinal (ou deformação longitudinal)	37

2.3.4.4 – Poder calorífico	38
2.3.4.5 – Análise química elementar	41
2.3.4.6 – Índice de combustão	41
2.3.4.7 – Pressão de densificação	41
2.3.4.8 – Geometria (forma e diâmetro)	42
2.3.4.9 – Resistência à água	43
2.3.4.10 – Índice de quebra (ou friabilidade)	43
2.3.5 – Aspectos econômicos	44
2.3.6 – Normas referentes a briquetes de resíduos ligno-celulósicos	44
2.3.7 – Aplicações dos briquetes de resíduos ligno-celulósicos	45
2.3.8 – Vantagens e desvantagens dos briquetes de resíduos ligno-celulósicos como fonte de energia	46
3 – INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA	49
3.1 – INDÚSTRIA CERÂMICA	49
3.1.1. Histórico	49
3.1.2 – A indústria de cerâmica vermelha no Brasil e principais aspectos na produção de blocos	51
3.2 – ARGILAS PARA BLOCOS CERÂMICOS	53
3.2.1 – Constituição das argilas	53
3.2.2 – Classificação das argilas	54
3.2.3 – Propriedades das argilas	55
3.2.3.1 – Granulometria	56
3.2.3.2 – Plasticidade	56
3.2.3.3 – Retração linear de secagem e de queima	58
3.2.3.4 – Porosidade	59
3.3 – FABRICAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS	60
3.3.1 – Extração de argilas	61
3.3.2 – Tratamento das argilas	62
3.3.3 – Conformação e corte do bloco	63
3.3.4 – Processamento térmico do bloco	64
3.3.4.1 –	Secagem
64	
3.3.4.2 – Queima (ou cozimento) de blocos cerâmicos	66

3.3.5 – Resfriamento dos blocos cerâmicos	73
3.4 – REQUISITOS E DESEMPENHO DE BLOCOS CERÂMICOS	73
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	75
4.1 – ESTUDO-PILOTO: ESTIMATIVA DO CONSUMO DE BRIQUETE E DE LENHA DE EUCALIPTO PARA QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS	79
4.1.1 – Consumo de briquete para a queima dos blocos cerâmicos	79
4.2 – DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO ESTUDO	79
4.2.1 – Variáveis independentes	79
4.2.2 – Variáveis dependentes	80
4.3 – FASE 1: LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO BRIQUETE LIGNO-CELULÓSICO COMERCIAL, DE SUAS MATÉRIAS-PRIMAS E DA LENHA DE EUCALIPTO NO DF E GO	81
4.3.1 – Caracterização dos resíduos (matérias-primas) dos briquetes	82
4.3.1.1 – Geometria dos resíduos (dimensões)	82
4.3.1.2 – Análise imediata dos resíduos ligno-celulósicos	82
4.3.1.3 – Massa específica a granel	86
4.3.1.4 – Poder calorífico superior	86
4.3.1.5 – Poder calorífico inferior	88
4.3.1.6 – Poder calorífico líquido	88
4.3.2 – Caracterização do briquete empregado na queima dos blocos cerâmicos	88
4.3.2.1 – Massa específica aparente	89
4.3.2.2 – Expansão longitudinal (ou deformação específica)	90
4.3.3 – Caracterização da lenha de eucalipto (grupo de controle)	91
4.4 – FASE 2: ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO BRIQUETE LIGNO-CELULÓSICO NA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGILAS E DOS BLOCOS	92
4.4.1 – Utilização de briquetes na fase de queima dos blocos cerâmicos	92
4.4.2 – Caracterização da argila aplicada nos blocos cerâmicos	93
4.4.3 – Avaliação do desempenho dos blocos cerâmicos	94
4.4.3.1 – Inspeção geral	94
4.4.3.2 – Inspeção por ensaios: características geométricas, físicas e mecânica	94
4.5 – FASE 3: ANÁLISE ENERGÉTICO-ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DO BRIQUETE NA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS	100

4.5.1 – Análise energética: consumo de energia na fase de queima dos blocos cerâmicos	100
4.5.1.1 – Consumo da energia térmica	102
4.5.1.2 – Consumo total da energia elétrica	104
4.5.1.3 – Consumo total da mão-de-obra	104
4.5.2 – Análise econômica: custo total do consumo energético na fase de queima dos blocos cerâmicos	105
4.5.2.1 – Custo da energia térmica	106
4.5.2.2 – Custo da energia elétrica	106
4.5.2.3 – Custo da mão-de-obra	106
5 – APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	108
5.1 – POTENCIAL E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS LIGNO-CELULÓSICOS UTILIZADOS NOS BRIQUETES EM ESTUDO	108
5.1.1 – Potencial dos resíduos utilizados em briquetes no DF e GO	108
5.1.2 - Caracterização das matérias-primas do briquete ligno-celulósico	109
5.2 DESCRIÇÃO DA INDÚSTRIA DE BRIQUETES E CARACTERIZAÇÃO DO BRIQUETE EM ESTUDO	112
5.2.1 – Descrição da indústria de briquetes	112
5.2.2 – Caracterização dos briquetes comerciais e da lenha de eucalipto	112
5.2.2.1 – Análise Imediata	113
5.2.2.2 – Massa específica	118
5.2.2.3 – Poder Calorífico	119
5.2.2.4 – Expansão longitudinal (ou deformação específica)	122
5.3 – COMPORTAMENTO DA COMBUSTÃO DOS BRIQUETES NA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS	124
5.3.1 – Consumo de energia	125
5.3.1.1 – Descrição do forno contínuo utilizado	125
5.3.1.2 – Consumo de energia térmica	126
5.3.1.3 – Temperaturas na câmara de queima dos blocos	128
5.3.1.4 – Consumo da energia elétrica	131
5.3.1.5 – Consumo de mão-de-obra	134

5.4 – ANÁLISE ENERGÉTICO-ECONÔMICA DA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS	136
5.4.1 – Análise energética	136
5.4.1.1 – Participação da energia térmica	136
5.4.1.2 – Participação da energia elétrica	137
5.4.1.3 – Participação da mão-de-obra	138
5.4.2 – Análise econômica	139
5.4.2.1 – Participação da energia térmica	139
5.4.2.2 – Participação da energia elétrica	140
5.4.2.3 – Participação da mão-de-obra	140
5.5 – DESEMPENHO DOS BLOCOS QUEIMADOS COM BRIQUETE E LENHA DE EUCALIPTO	142
5.5.1 – Caracterização da argila	142
5.5.1.1 – Análise Granulométrica	142
5.5.1.2 – Índices de consistência (ou Limites de Atterberg)	143
5.5.1.3 – Composição mineralógica	144
5.5.2 – Desempenho dos blocos queimados a partir de briquetes e lenha de eucalipto: inspeção geral e por ensaios	145
5.5.2.1 – Inspeção geral: caracterização visual dos blocos	145
5.5.2.2 – Inspeção por ensaios: características geométricas, físicas e mecânicas	146
6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	151
6.1 – CONCLUSÕES	151
6.1.1 - Fase 1: caracterização dos resíduos, dos briquetes ligno-celulósicos e da lenha de eucalipto	151
6.1.1.1 – Resíduos (matérias-primas dos briquetes)	151
6.1.1.2 – Briquetes ligno-celulósicos (B9,5 e B8,5) e lenha eucalipto (LE)	152
6.1.2 - Fase 2: Análise da utilização do briquete na fase de queima dos blocos cerâmicos, caracterização da argila e dos blocos	153
6.1.2.1 – Consumo de combustíveis e temperaturas de queima dos blocos	153
6.1.2.2 – Avaliação dos blocos cerâmicos	154
6.1.3 - Fase 3: análise energético-econômica da utilização dos briquetes na queima dos blocos cerâmicos	156
6.1.3.1 - Análise energética	156

6.1.3.2 - Análise econômica	156
6.2 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	156

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158
-----------------------------------	------------

APÊNDICES

A – Resultados das análises granulométricas dos resíduos (matérias-primas) dos briquetes	167
B – Resultados da Caracterização dos resíduos (matérias-primas) dos briquetes	168
C – Resultados da análise imediata dos briquetes e da lenha de eucalipto	169
D – Medidas dos comprimentos longitudinais dos briquetes ao longo do ensaio de expansão	171
E – Valores da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar em Brasília, no período do ensaio de expansão longitudinal dos briquetes	172
F – Rastreamento das vagonetas ao longo das zonas de preaquecimento e de queima do forno, na queima dos blocos cerâmicos a partir de briquetes	173
G – Temperaturas máximas e mínimas na câmara de queima dos blocos a partir do B9,5; B8,5 e LE, após cada carga desses combustíveis	196
H – Tempo de funcionamento das ventoinhas	205
I – Registros dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir de B9,5; B8,5 e LE	209
J – Distribuição granulométrica das argilas dos blocos queimados a partir de briquetes e lenha de eucalipto	217
K – Difração de raio-x das argilas dos blocos queimados a partir de briquetes e lenha de eucalipto	218
L – Resultado da caracterização dos blocos cerâmicos queimados a partir dos briquetes e da lenha de eucalipto	220

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Oferta interna de energia no Brasil, entre 1950 e 2000	10
Tabela 2.2 – Consumo mundial de energia renovável em 1980 e 2000 e seu potencial para longo prazo	11
Tabela 2.3 – Comparações entre prensa de parafuso sem fim e extrusora de pistão	30
Tabela 2.4 – Propriedades dos briquetes e peletes e suas normas correspondentes (modificado – Obernberger e Thek, 2004)	46
Tabela 5.1 – Produção agrícola, florestal e geração de resíduos ligno-celulósicos no Brasil, DF e GO para 2003	108
Tabela 5.2 – Caracterização das serragens de madeira e da casca de semente de algodão utilizadas na fabricação dos briquetes analisados	110
Tabela 5.3 – Características do forno utilizado para queima dos blocos	126
Tabela 5.4 – Consumo de briquetes e de lenha de eucalipto na fase de queima dos blocos	128
Tabela 5.5 – Dados das vagonetas usadas na queima dos blocos	128
Tabela 5.6 – Tempo de funcionamento dos equipamentos auxiliares empregados na fase de queima dos blocos	133
Tabela 5.7– Consumo de mão-de-obra empregada na queima dos blocos a partir da LE 135	135
Tabela 5.8 – Consumo de energia térmica para queima de mil blocos	137
Tabela 5.9 – Consumo de energia elétrica por equipamentos na fase de queima dos blocos	138
Tabela 5.10 – Consumo de mão-de-obra para a queima de 1000 blocos	139
Tabela 5.11 – Custos da energia térmica na fase de queima, para 1000 blocos	139
Tabela 5.12 – Custo da energia elétrica dos equipamentos utilizados na queima dos blocos	140
Tabela 5.13 – Preço da mão-de-obra empregada na fase de queima dos blocos	141
Tabela 5.14 – Custo da mão-de-obra na fase de queima dos blocos	141

Tabela 5.15 – Custos totais da energia consumida na fase de queima dos blocos	142
Tabela 5.16 – Limites de liquidez (LL), de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP), das argilas analisadas	143
Tabela 5.17 – Dados da análise mineralógica das argilas dos blocos examinados	144
Tabela 5.18 – Retração linear da secagem natural e artificial dos blocos	148
Tabela 5.19 – Retração linear da queima dos blocos	148
Tabela 5.20 – Retração linear total na fabricação dos blocos examinados	149
Tabela A.1 – Resultado da análise granulométrica da serragem da indústria de briquete	167
Tabela A.2 – Resultado da análise granulométrica da serragem das serrarias	167
Tabela A.3 – Resultado da análise granulométrica da serragem de pinus das indústrias de móveis	167
Tabela A.4 – Resultado da análise granulométrica do resíduo da casca de semente de algodão	167
Tabela B.1 – Resultado do ensaio de teor de umidade dos resíduos (matérias-primas) dos briquetes	168
Tabela B.2 – Resultado do ensaio de massa específica a granel dos resíduos (matérias-primas) dos briquetes	168
Tabela C.1 – Resultado do ensaio de teor de umidade do B9,5	169
Tabela C.2 – Resultado do ensaio de teor de umidade do B8,5	169
Tabela C.3 – Resultado do ensaio de teor da lenha de eucalipto	169
Tabela C.4 – Resultado do ensaio de teor de cinza B9,5	169
Tabela C.5 – Resultado do ensaio de teor de cinza B8,5	169
Tabela C.6 – Resultado do ensaio de teor da lenha de eucalipto	169
Tabela C.7 – Resultado do ensaio de teor de matérias voláteis do B9,5	170
Tabela C.8 – Resultado do ensaio de teor de matérias voláteis do B8,5	170
Tabela C.9 – Resultado do ensaio de teor de matérias voláteis da lenha de eucalipto	170
Tabela D.1 – Medidas dos comprimentos longitudinais dos B9,5 ao longo do ensaio de expansão	171

Tabela D.2 – Medidas dos comprimentos longitudinais dos B8,5 ao longo do ensaio de expansão	171
Tabela E.1 – Temperaturas ambiente em Brasília no período do ensaio de expansão longitudinal	172
Tabela E.2 – Umidade Relativa do ar em Brasília no período do ensaio de expansão longitudinal	172
Tabela G.1 – Temperaturas máximas e mínimas no primeiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B9,5	196
Tabela G.2 – Temperaturas máximas e mínimas no segundo processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B9,5	197
Tabela G.3 – Temperaturas máximas e mínimas no terceiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B9,5	198
Tabela G.4 – Temperaturas máximas e mínimas no primeiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B8,5	199
Tabela G.5 – Temperaturas máximas e mínimas no segundo processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B8,5	200
Tabela G.6 – Temperaturas máximas e mínimas no terceiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B8,5	201
Tabela G.7 – Temperaturas máximas e mínimas no primeiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir da lenha de eucalipto	202
Tabela G.8 – Temperaturas máximas e mínimas no segundo processo de queima dos blocos cerâmicos a partir da lenha de eucalipto	203
Tabela G.9 – Temperaturas máximas e mínimas no terceiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir da lenha de eucalipto	204
Tabela H.1 – Tempo de funcionamento das ventoinhas no primeiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B9,5	205
Tabela H.2 – Tempo de funcionamento das ventoinhas no segundo processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B9,5	205
Tabela H.3 – Tempo de funcionamento das ventoinhas no terceiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B9,5	205
Tabela H.4 – Tempo de funcionamento das ventoinhas no primeiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B8,5	206
Tabela H.5 – Tempo de funcionamento das ventoinhas no segundo processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B8,5	206

Tabela H.6 – Tempo de funcionamento das ventoinhas no terceiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir do B8,5	206
Tabela H.7 – Tempo de funcionamento das ventoinhas no primeiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir da lenha de eucalipto	207
Tabela H.8 – Tempo de funcionamento das ventoinhas no segundo processo de queima dos blocos cerâmicos a partir da lenha de eucalipto	207
Tabela H.9 – Tempo de funcionamento das ventoinhas no terceiro processo de queima dos blocos cerâmicos a partir da lenha de eucalipto	208
Tabela I.1 – Registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir dos briquetes	209
Tabela I.2 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir dos briquetes	210
Tabela I.3 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir dos briquetes	211
Tabela I.4 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir dos briquetes	212
Tabela I.5 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir dos briquetes	213
Tabela I.6 – Registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir da lenha de eucalipto	214
Tabela I.7 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir da lenha de eucalipto	215
Tabela I.8 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos cerâmicos a partir da lenha de eucalipto	216
Tabela J.1 – Distribuição granulométrica das argilas dos blocos queimados a partir de briquetes e da lenha de eucalipto	217
Tabela L.1 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir de briquetes – Amostra I	220
Tabela L.2 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir de briquetes – Amostra II	221
Tabela L.3 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir dos briquetes – Amostra III	222
Tabela L.4 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto – Amostra I	223

Tabela L.5 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto – Amostra II	224
Tabela L.6 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto – Amostra III	225
Tabela L.7 – Resultados do ensaio de índice de absorção de água dos blocos queimados a partir de briquetes	226
Tabela L.8 – Resultados do ensaio de índice de absorção de água dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto	226
Tabela L.9 – Resultados do ensaio de índice de absorção inicial dos blocos queimados a partir de briquete	227
Tabela L.10 – Resultados do ensaio de índice de absorção inicial dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto	227
Tabela L.11 – Resultados do ensaio de porosidade aparente dos blocos queimados a partir dos briquetes	228
Tabela L.12 – Resultados do ensaio de porosidade aparente dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto	228
Tabela L.13 – Resultados do ensaio de retração linear de secagem e de queima dos blocos queimados a partir de briquete	229
Tabela L.14 – Resultados do ensaio de retração linear de secagem e de queima dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto	229

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estágio de desenvolvimento humano e consumo de energia	6
Figura 2.2 – Oferta de energia no Brasil entre 1940 e 2003	8
Figura 2.3 – Evolução do PCI da madeira em função de seu teor de umidade	13
Figura 2.4 – Principais processos de conversões de biomassa em energia	18
Figura 2.5 – Fluxograma do mecanismo da combustão a partir da biomassa	20
Figura 2.6 – Amostras de combustíveis densificados. a) várias amostras de briquetes lignocelulósicos, de carvão e de peletes; b) briquetes de carvão vegetal; e c) briquetes de serragem de madeira e resíduo de semente de algodão	31
Figura 3.1 – Fluxograma do processo típico de produção de blocos cerâmicos, com foco na energia consumida na fase de queima	61
Figura 3.2 – Extração de argila para produção de blocos cerâmicos em uma jazida no município de Rio Verde/GO	62
Figura 3.3 – Sazonamento de argila para a produção de blocos em uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO	63
Figura 3.4 – Preparo da argila para fabricação de blocos cerâmicos em uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO. a) homogeneização; b) laminação	63
Figura 3.5 – Produção de blocos cerâmicos em uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO. a) boquilha de moldagem; b) mesa de corte	64
Figura 3.6 – Métodos de secagem de blocos cerâmicos em uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO. a) secagem natural e b) secagem artificial	65
Figura 3.7 – Forno periódico de chama invertida de uma indústria cerâmica de Novo Gama/GO. a) detalhe da abóbada; b) detalhe da porta; c) detalhe da fornalha; d) vista interna e e) detalhe do piso	69
Figura 3.8 – Forno hoffman de galeria longitudinal de uma indústria de cerâmica vermelha do DF. a) vista externa frontal; b) vista externa lateral; c) vista externa superior; d) vista interna: galeria; e) vista interna: cela de queima e f) vista interna: câmara de combustão	70
Figura 3.9 – Forno contínuo tipo túnel de uma cerâmica de Campo Limpo/GO. a) entrada da zona de preaquecimento; b) vista externa da zona de queima; e c) saída da zona de resfriamento	72
Figura 4.1: Fase 1 do Programa Experimental – Levantamento e caracterização dos briquetes e de suas matérias-primas no DF e GO	76

Figura 4.2: Fase 2 do Programa Experimental – Análise da aplicação do briquete na queima dos blocos cerâmicos	77
Figura 4.3: Fase 3 do Programa Experimental – Análise energético-econômica da queima dos blocos cerâmicos a partir do briquete	78
Figura 4.4 – Equipamentos empregados nos ensaios da análise imediata. a) triturador de amostras; b) balança analítica; c) forno mufla: vista externa; d) forno mufla com cadinhos	83
Figura 4.5 – Ensaio do PCS de uma amostra de madeira realizado no LPF-IBAMA/DF. a) suporte, cadinho e garrafa; e) balde e acessório de água; f) bomba de oxigênio e g) calorímetro	87
Figura 4.6 – Equipamentos utilizados no ensaio de massa específica aparente dos combustíveis analisados. a) determinação da massa antes do briquete ser parafinado; b) determinação da massa do briquete parafinado, imerso em água	89
Figura 4.7 – Ensaio de expansão longitudinal dos briquetes. a) extrusão dos briquetes; b) corpos-de-prova em análise na primeira hora após a sua extrusão; c) medida da expansão ao longo de trinta dias após a fabricação	91
Figura 4.8 – Instrumentos de medir temperaturas do forno de uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO. a) termopares tipo K; b) instalação do termopar; c) indicador digital de temperatura	92
Figura 4.9 – Inspeção por ensaios dos blocos ensaiados. a) determinação da largura de uma das faces; b) medida da espessura na parede externa; c) medida da espessura do septo; d) determinação do desvio em relação ao esquadro; e) determinação da planeza da face	95
Figura 4.10 – Ensaio do índice de absorção d’água dos blocos ensaiados. a) determinação da massa inicial do corpo-de-prova; b) corpos-de-prova imersos ao longo do ensaio para determinação da massa úmida	97
Figura 4.11 – Ensaio do índice de absorção inicial dos blocos realizado. a) face do corpo-de-prova imerso em lâmina d’água; b) determinação da massa final do corpo-de-prova	97
Figura 4.12 – Ensaio de resistência à compressão e vista do momento de ruptura de blocos	100
Figura 4.13 – Vista das três zonas do forno em estudo, com os seus respectivos comprimentos e a reprodução das vagonetas com blocos	102
Figura 4.14 – Detalhe das zonas do forno e da carga completa de bloco da zona de queima	103
Figura 5.1 – Resíduos utilizados na fabricação dos briquetes analisados. a) serragem de madeira produzida na indústria de briquetes; b) serragem de madeira das serrarias e indústrias de móveis; c) serragem de <i>pinus</i> ; e d) resíduo de semente de algodão	109

Figura 5.2 – Curvas granulométricas dos resíduos SM1, SM2, SM3 e RA, matérias-primas dos briquetes analisados	111
Figura 5.3 – Vista dos briquetes comerciais em estudo. a) seção transversal dos B9,5 e B8,5; b) briquetes de comprimentos entre 34,3 e 39,5 cm; e c) vista dos briquetes	113
Figura 5.4 – Valores de TU dos combustíveis analisados	114
Figura 5.5 – Valores de MV dos combustíveis analisados	115
Figura 5.6 – Valores de CZ dos combustíveis analisados	116
Figura 5.7 – Valores de CF dos combustíveis analisados	117
Figura 5.8 – Valores de γ_g dos combustíveis analisados	118
Figura 5.9 – Valores de γ_A dos combustíveis analisados	119
Figura 5.10 – Valores de PCS dos combustíveis analisados	120
Figura 5.11 – Valores de PCI dos combustíveis analisados	121
Figura 5.12 – Valores de PCL dos combustíveis analisados	122
Figura 5.13 – Deformações longitudinais do B9,5	123
Figura 5.14 – Deformações longitudinais do B8,5	123
Figura 5.15 – Forno contínuo tipo túnel da indústria cerâmica estudo-de-caso. a) entrada da zona de preaquecimento; b) vista externa da zona de queima (queimadores) e c) saída da zona de resfriamento	125
Figura 5.16 – Valores dos consumos médios dos combustíveis para queima de uma carga completa de blocos na zona de queima do forno	126
Figura 5.17 – Combustão do briquete e da lenha de eucalipto na queima dos blocos na indústria cerâmica estudo-de-caso. a) combustão do B9,5; b) combustão da lenha de eucalipto	127
Figura 5.18 – Valores de temperaturas médias máximas e mínimas por combustível	129
Figura 5.19 – Evolução da temperatura de queima (máxima e mínima) a partir da combustão do B8,5 e LE	130
Figura 5.20 – Diferenças entre as temperaturas máximas da fase de queima dos blocos queimados a partir do B8,5 e LE	130
Figura 5.21 – Tipos de rachadores de lenha utilizados nas indústrias de cerâmica vermelha. a) rachador de eixo vertical; a) rachador de eixo horizontal	132

Figura 5.22 – Empurrador de vagonetas da indústria cerâmica estudo-de-caso. a) vista lateral; b) e c) pistão hidráulico; d) dispositivo empurrador	132
Figura 5.23 – Sistema de alimentação de oxigênio nos queimadores. a) ventoinha com ramal de alimentação do oxigênio; b) conjunto de queimadores e ventoinha	133
Figura 5.24 – Mão-de-obra empregada na queima dos blocos cerâmicos a partir de lenha. a) rachador de lenha; b) carregador de lenha; e d) operador do forno	135
Figura 5.25 – Mão-de-obra (operador do forno) empregada na queima dos blocos a partir de briquetes	136
Figura 5.26 – Curvas granulométricas das argilas dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto	143
Figura 5.27 – Blocos cerâmicos requeimados na fase de queima a partir da lenha de eucalipto	146
Figura F.1 – Rastreamento das vagonetas na zona de preaquecimento do forno, na queima dos blocos a partir dos briquetes	173
Figura F.2 – Continuação do rastreamento das vagonetas na zona de preaquecimento do forno, na queima dos blocos a partir dos briquetes	174
Figura F.3 – Rastreamento das vagonetas da primeira queima dos blocos, a partir do B9,5	175
Figura F.4 – Rastreamento das vagonetas na segunda parte da primeira queima dos blocos, a partir do B9,5	176
Figura F.5 – Rastreamento das vagonetas da segunda queima dos blocos, a partir do B9,5	177
Figura F.6 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da segunda queima dos blocos, a partir do B9,5	178
Figura F.7 – Rastreamento das vagonetas da terceira queima dos blocos, a partir do B9,5	179
Figura F.8 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte do terceiro processo de queima dos blocos, a partir do B9,5	180
Figura F.9 – Rastreamento das vagonetas do primeiro processo de queima dos blocos, a partir do B8,5	181
Figura F.10 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da primeira queima dos blocos, a partir do B8,5	182

Figura F.11 – Rastreamento das vagonetas da segunda queima dos blocos, a partir do B8,5	183
Figura F.12 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da segunda queima dos blocos, a partir do B8,5	184
Figura F.13 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da segunda queima dos blocos, a partir do B8,5	185
Figura F.14 – Rastreamento das vagonetas da terceira queima dos blocos, a partir do B8,5	186
Figura F.15 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da terceira queima dos blocos, a partir do B8,5	187
Figura F.16 – Rastreamento das vagonetas na zona de preaquecimento da queima dos blocos a partir da LE	188
Figura F.17 – Continuação dos rastreamento das vagonetas na zona de preaquecimento da queima dos blocos a partir da LE	189
Figura F.18 – Rastreamento das vagonetas da primeira queima dos blocos, a partir da LE	190
Figura F.19 – Rastreamento das vagonetas na segunda parte da primeira queima dos blocos, a partir da LE	191
Figura F.20 – Rastreamento das vagonetas da segunda queima dos blocos, a partir da LE	192
Figura F.21 – Rastreamento das vagonetas na segunda parte da segunda queima dos blocos, a partir da LE	193
Figura F.22 – Rastreamento das vagonetas da terceira queima dos blocos, a partir da LE	194
Figura F.23 – Rastreamento das vagonetas na segunda parte da terceira queima dos blocos, a partir da LE	195
Figura K.1 – Difração de raio-X da argila dos blocos queimados a partir de B9,5 e B8,5	218
Figura K.2 – Difração de raio-X da argila dos blocos queimados a partir da LE	219

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AA	Índice de absorção
AAI	Índice de absorção inicial
ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Água de moldagem
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEN	Balanço Energético Nacional
BPF	Óleo combustível de baixo ponto de fulidez
B8,5	Briquete de 8,5 cm de diâmetro
B9,5	Briquete de 9,5 cm de diâmetro
C	Carbono
cal	Caloria
CENIBRA	Celulose Nipo-Brasileira S.A
CF	Carbono fixo
CFC	Clorofluorcarbono
CH ₄	Metano
C ₂ H ₅ OH	Etano
CIB	Conselho de Informação sobre Biotecnologia
cm ³	Centímetro cúbico
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CTE ₁	Consumo energético total parte 1
CTE _B	Consumo total de energia térmica
CTE _{EQ}	Consumo total de energia elétrica
CTE ₂	Consumo energético total parte 2
CT _{MO}	Consumo total de mão-de-obra empregada na queima dos blocos
CTE _T	Consumo total da energia térmica
CZ	Teor de cinza
D	Desvio em relação ao esquadro
DF	Distrito Federal

DIN	Deutsches Institut fur Normung
EUA	Estados Unidos da América
F	Planeza das faces
FAO	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação
g	grama
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GO	Goiás
H	Hidrogênio
HABITARE	Programa de Tecnologia da Habitação
HCFC	Hidroclorofluorcarbono
H ₂ O	Água
H _{TOP1}	Horas de trabalho dos operários 1
H _{TOP2}	Horas de trabalho dos operários 2
H _{TOPn}	Horas de trabalho dos operários n
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IP	Índice de Plasticidade
J	Joule
Kcal	Kilo caloria
Kg	Kilo grama
Kv	Kilo volt
KWh	Kilo watt hora
LE	Lenha de eucalipto
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LPF	Laboratório de Produtos Florestais
LEM	Laboratório de Ensaios de Materiais
L ₀	Comprimento da face do corpo-de-prova úmido
L ₁	Comprimento da face do corpo-de-prova seco,

L_i	Comprimentos do corpo-de-prova antes do processo de queima
L_2	Comprimentos do corpo-de-prova depois do processo de queima
MCT/FINEP/FVA	Ministério de Ciência e Tecnologia/Financiadora de Estudos e Projetos/Fundo Verde Amarelo
Mcal	Mega caloria
M	Massa inicial da amostra úmida
M_A	Massa do corpo-de-prova imerso em água
M_c	Massa do corpo-de-prova
M_i	Massa do corpo-de-prova imerso em água
MJ	Mega Joule
MPa	Mega Pascal
M_p	Massa do corpo-de-prova parafinado
M_U	Massa do corpo-de-prova úmido,
M_s	Massa do corpo-de-prova seco
Mtep	Mega tonelada equivalente de petróleo
MV	Matérias voláteis
MW	Mega Watt
M_1	Massa seca em estufa
m	Massa da amostra seca a 0% de umidade.
m^3	Metro cúbico
m_B	Massa total do briquete utilizado na queima dos blocos
m_0	Massa do cadinho
m_1	Massa do cadinho mais o resíduo
m_2	Massa inicial do cadinho mais a amostra
m_3	Massa final do cadinho mais a amostra.
m_a	Massa da amostra no estado natural
min	minuto
m_s	Massa seca
ml	Mililitro
N	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira

NO _x	Óxidos de nitrogênio
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
O	Oxigênio
O ₃	Ozônio
ONORM	Österreichisches Normungsinstitut
PA	Porosidade aparente
PC	Poder calorífico
PCI	Poder calorífico inferior
PCL	Poder calorífico líquido
PCL _B	Poder calorífico líquido do briquete
PCS	Poder calorífico superior
Pb	Chumbo
PAH	Hidrocarbonetos poliaromáticos
Q _f	Quantidade de calor da combustão do fio de ignição
Q _a	Quantidade de calor da formação do ácido nítrico
RS	Retração linear de secagem
R\$ _{FQB}	Custo energético total da queima dos blocos
R\$ _{CTE_T}	Custo total da energia térmica da queima dos blocos
R\$ _{CTE_{EQ}}	Custo total da energia elétrica usada na queima dos blocos
R\$ _{CT_{MO}}	Custo total da mão-de-obra empregada na queima dos blocos, em reais.
R\$ _{CE_T}	Custo da energia térmica
R\$ _B	Valor do quilo do briquete no universo de estudo
R\$ _{energia}	Tarifa de energia elétrica cobrada pela concessionária de energia elétrica da região em estudo
R\$ _{OP1}	Valores da hora de trabalho do operário 1,
R\$ _{OP2}	Valores da hora de trabalho do operário 2,
R\$ _{OPn}	Valores da hora de trabalho do operário n,
S	Enxôfre
SS	Swedish Standards Institution
SM1	Serragem de madeira produzida na indústria de briquete

SM2	Serragem de madeira das serrarias e indústrias de móveis
SM3	Serragem de <i>pinus</i> gerada nas indústrias de móveis
SO _x	Enxofre
SO ₂	Dióxido de enxofre
Tep	Tonelada equivalente de petróleo
TU	Teor de umidade
T _{EQ1}	Tempos de funcionamento do equipamento 1
T _{EQ2}	Tempos de funcionamento do equipamento 2
T _{EQn}	Tempos de funcionamento do equipamento n
T1	Tempo de entrada na zona de preaquecimento
T2	Tempo de saída da zona de preaquecimento e entrada na zona de queima
T3	Tempo do início de saída de uma carga completa de bloco cerâmico da zona de queima
T4	Tempo do término de saída de uma carga completa de bloco cerâmico da zona de queima
t	Tonelada
UnB	Universidade de Brasília
UR	Umidade relativa do ar
V _c	Volume do corpo-de-prova,
V _r	Volume do recipiente
γ	Massa específica
γ _A	Massa específica aparente
γ _g	Massa específica a granel
γ _{água}	Massa específica da água
γ _{parafina}	Massa específica da parafina
W	Equivalente de água
ΔT	Variação de temperatura
°C	Grau centígrado

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – IMPORTÂNCIA DO TEMA

Atualmente, a busca da sustentabilidade¹ passa a ser obrigatória principalmente em virtude do esgotamento das matérias-primas primárias e da poluição causada pelos processos industriais. São de fundamental importância os estudos sobre fontes alternativas de energia, já que os combustíveis fósseis produzem expressivo desequilíbrio ao meio ambiente, além do que um dia se esgotarão devido a sua exploração excessiva.

Segundo Guandalini; Silva (2006), a era do petróleo fácil está acabando, pois a sua exploração está próxima de atingir o seu auge e as reservas mundiais são finitas. Se o seu consumo continuar elevado, como nos níveis atuais, as reservas existentes terão duração estimada de, no máximo, oitenta anos.

Qualquer processo de transformação industrial consome energia e a indústria da construção civil, principalmente na fase de fabricação de materiais e componentes, contribui significativamente com este fenômeno. Mesmo assim, são poucas as pesquisas que tratam deste tema no Brasil, podendo-se citar o trabalho sobre análise energética da indústria da construção realizado por Guimarães (1985), e mais recentemente, alguns trabalhos sobre análise de ciclo de vida e consumo de energia em indústrias cerâmicas, entre eles Soares (2002), Manfredini; Sattler (2004) e Sposto et al. (2006).

Duailibi Filho; Carvalho (2002) reconhecem que, das várias indústrias que compõem a cadeia produtiva da construção civil, a indústria de cerâmica vermelha é uma das que mais consomem energia e que emitem mais poluição atmosférica. Em alguns casos isso incide em virtude do reduzido grau tecnológico e uso descontrolado da madeira como combustível.

Segundo Mattos (1988) e Alexandre et al. (2001), a queima do bloco cerâmico é a etapa mais importante de seu processo de produção. Nesta fase o consumo de energia é intenso,

¹ Sustentabilidade = qualidade sustentável (capaz de se manter mais ou menos constante por longo período). Uso equilibrado das matérias-primas naturais, permitindo manter o estoque.

principalmente quando se utiliza lenha² nativa, muitas vezes sem controle dos órgãos fiscalizadores, causando danos irreparáveis ao meio ambiente.

Conforme o Balanço Energético Nacional – BEN (2006), no início da década de setenta a lenha, que até então era o principal combustível utilizado no Brasil, foi substituída pelos combustíveis fósseis. No entanto, observa-se que nos dias atuais em razão das cotações internacionais do petróleo estarem em patamares elevados, algumas indústrias estão utilizando outros tipos de biomassa, tais como serragem de madeira, casca de arroz e bagaço da cana-de-açúcar.

A indústria de cerâmica vermelha, por sua vez, também sofreu algumas mudanças quando o antigo óleo combustível (BPF) foi substituído. Algumas empresas optaram por usar gás natural e outras, de menor porte e em regiões onde não há este recurso energético, como é o caso do Distrito Federal (DF) e do Estado de Goiás (GO), por retornar ao uso da lenha.

Atualmente, o combustível usado na queima dos produtos cerâmicos é um fator que preocupa as indústrias deste setor na região em estudo. Do ponto de vista econômico, a lenha nativa utilizada no momento está cada vez mais escassa e as reservas de lenha de reflorestamento nem sempre estão próximas aos principais centros de consumo.

Ainda no caso do uso da lenha, por não ser usual a prática do reflorestamento pelos empresários brasileiros da indústria de cerâmica vermelha, este setor é apontado como contribuinte na destruição de parte das florestas naturais do País. Buscar fontes de energia renováveis para este segmento industrial é desafio para os dias atuais.

Por outro lado, em diversas regiões do Brasil há quantidade significativa de resíduos lignocelulósicos passíveis de serem aproveitados, tais como rejeitos florestais e de colheitas agrícolas (por exemplo, serragem de madeira, bagaço de cana, casca de arroz, palha e sabugo de milho, casca de semente de algodão, entre outros), pois comumente são de baixo custo e não contribuem para aumentar a poluição ambiental.

² Lenha = denominação dada à madeira quando destinada como combustível, seja na forma de troncos, toras ou achas de árvores (Russomano, 1987).

Os principais cereais produzidos na região em estudo são: bagaço de cana, milho, algodão e arroz. Os resíduos derivados destas culturas agrícolas podem ser fonte de matérias-primas de combustíveis sólidos de biomassa.

Varela et al. (1999) apresentam algumas vantagens no aumento da utilização de recursos naturais nacionais, tais como fontes de energia renováveis a partir da biomassa, comentando que o seu uso gera melhor posição no mercado de energia e contribui na redução dos impactos ambientais procedentes da disposição inadequada dos resíduos ligno-celulósicos.

Conforme o mesmo autor, embora a combustão dos recursos energéticos oriundos da biomassa esteja extensivamente estudada, a produção de briquete³ e a sua combustão são relativamente novos, pois a sua caracterização como fonte de energia ainda não está completamente desenvolvida.

Segundo Quirino; Brito (1991), o interesse pela aplicação de briquete no Brasil sempre esteve voltado para o aproveitamento das partículas finas de carvão da indústria siderúrgica, levando a maioria das pesquisas para o desenvolvimento de briquetes para uso neste setor industrial. No entanto, com o aumento do preço do petróleo e a escassez de lenha nativa em algumas regiões do País, as indústrias de cerâmica vermelha são forçadas a buscarem fontes de energia alternativas, podendo o briquete ligno-celulósico ser uma opção viável.

Neste sentido, existem perspectivas para aplicação do briquete ligno-celulósico na fase de queima do bloco cerâmico. Com isto, pretende-se analisar se há redução no consumo de energia e conseqüentemente, no custo deste produto.

Este trabalho é inédito na indústria de blocos cerâmicos e está inserido em um projeto institucional desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, dentro da linha de pesquisa de Sistemas Construtivos e Desempenho de Materiais e Componentes, cujo título é: Gestão e tecnologia para a

³ Briquete = Combustível sólido de biomassa, constituído de corpos densos de forma retangular ou cilíndrica, com utilização ou não de aglomerante e tratamento térmico (Oberberger; Thek, 2004).

sustentabilidade e qualidade de componentes e alvenaria cerâmica, e tem o apoio financeiro do MCT/FINEP/FVA, no âmbito do Programa HABITARE 2004.

1.2 – OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir para a melhoria da sustentabilidade das indústrias cerâmicas do DF e GO, onde pretende-se avaliar a viabilidade técnica, energética e econômica do briquete produzido a partir de serragem de madeira e casca de semente de algodão para a queima de blocos cerâmicos.

Como objetivos específicos podem ser listados:

- 1.2.1 identificar e caracterizar os briquetes ligno-celulósicos da região em estudo, que podem servir como combustível para a queima de blocos cerâmicos;
- 1.2.2 avaliar a temperatura e o tempo de queima, bem como o consumo de combustível da fase de queima de blocos cerâmicos, quando na aplicação do briquete ligno-celulósico como combustível em um forno contínuo tipo túnel, comparativamente à lenha de eucalipto;
- 1.2.3 comparar o consumo energético-econômico durante a fase de queima dos blocos cerâmicos, utilizando-se como combustíveis o briquete ligno-celulósico e a lenha de eucalipto;
- 1.2.4 comparar as características e propriedades técnicas dos blocos cerâmicos queimados com briquete ligno-celulósico e com lenha de eucalipto.

1.3 – ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho encontra-se estruturado em seis Seções, sendo que a primeira é referente à introdução, a qual tem um caráter geral de apresentação do trabalho, seguido da sua importância e dos seus objetivos.

A Seção 2 versa sobre os principais assuntos pertinentes à energia, biomassa e briquetes ligno-celulósicos como fonte de energia. Dentre outros, apresenta uma discussão das principais propriedades dos briquetes ligno-celulósicos e das tecnologias de densificação de resíduos vegetais.

A Seção 3 é referente à indústria de cerâmica vermelha, onde primeiramente é apresentada uma introdução sobre a matéria-prima básica da indústria cerâmica, a argila, bem como as suas principais propriedades. A seguir, têm-se as fases do processo de fabricação de blocos cerâmicos, com ênfase na fase de queima e nos equipamentos térmicos utilizados. Por fim, um breve resumo do desempenho e das principais propriedades do bloco cerâmico.

A Seção 4 apresenta os materiais e métodos utilizados neste trabalho.

A Seção 5 contém os resultados obtidos no programa experimental e as discussões destes resultados. Inicialmente, são apresentadas as caracterizações das matérias-primas (serragens de madeira e casca de semente de algodão), utilizadas nos briquetes ligno-celulósicos e dos próprios briquetes em estudo. Posteriormente, apresenta-se uma análise da aplicação dos briquetes na fase de queima dos blocos cerâmicos, onde se efetua também uma análise energético-econômica da fase de queima, a partir do briquete. E finalmente, uma avaliação dos blocos queimados com briquetes, tendo como parâmetro de comparação blocos queimados a partir da lenha de eucalipto.

As conclusões acerca dos resultados alcançados são apresentadas na Seção 6, bem como são apontadas sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos similares ao conteúdo desta tese.

E por fim, são apresentadas sequencialmente, as referências bibliográficas e os apêndices.

2 – ENERGIA, BIOMASSA E BRIQUETES LIGNO-CELULÓSICOS COMO FONTE DE ENERGIA

2.1 – PRINCIPAIS FONTES DE ENERGIA USADAS NO MUNDO: GENERALIDADES, CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO

2.1.1 – Aspectos gerais pertinentes ao tema

Segundo Goldemberg (2003), o consumo mundial de energia cresceu lentamente ao longo dos anos até o século XIX. Sem o uso do fogo e consumindo apenas alimentos naturais, o homem primitivo realizava poucas atividades físicas e não usufruía do mínimo conforto do mundo moderno. Naquela época, estima-se que o consumo diário de energia era de 2.000 calorias. Nos dias atuais, porém, o homem tecnológico consome energia de forma intensa, aproximadamente 230.000 calorias por dia.

A Figura 2.1 apresenta os estágios de desenvolvimento humano, desde o homem primitivo até o homem tecnológico de hoje, correlacionados com o consumo diário per capita de energia.

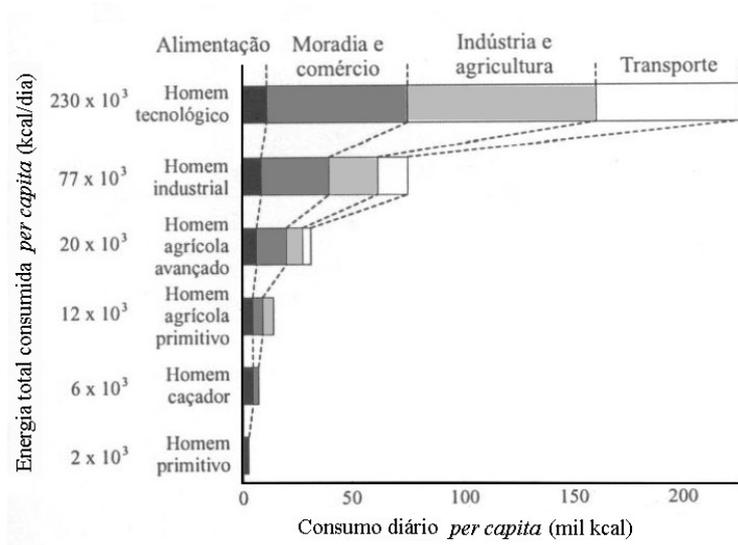


Figura 2.1 – Estágio de desenvolvimento humano e consumo de energia (Goldemberg, 2003).

Conforme Russomano (1987), o consumo de energia pelos homens sempre esteve associado ao aumento da força produtiva e vários fatores contribuíram para o seu crescimento durante as civilizações. Entre os mais determinantes, destacam-se: a escassez de alimentos, a busca de novos abrigos de proteção, as grandes descobertas, a rivalidade entre os seres vivos e a necessidade humana de alcançar grandes distâncias.

De acordo com Nelva (1987), durante séculos o homem atendeu suas necessidades energéticas através do uso do fogo, da tração animal, do moinho de vento e da ação da gravidade da água. Esta situação permaneceu praticamente inalterada até por volta dos séculos XVII e XVIII, quando as primeiras máquinas exigiram formas de energia mais eficientes.

Os marcos evolutivos referentes ao uso da energia foram: a utilização do fogo para cocção, calor e agricultura; o emprego da água para energia hidráulica e transporte; a criação do motor a vapor, que fez surgir a era industrial; a criação da eletricidade, que deu origem às primeiras centrais termoeletricas e a criação do motor a explosão, que proporcionou a criação do automóvel e do avião.

Segundo Goldemberg (2003), até a metade do século XX a madeira foi a principal fonte de energia utilizada pelo homem. Paulatinamente, o carvão mineral a substituiu, persistindo até 1961, quando foi suplantado pelo petróleo, que detém o domínio até os dias atuais.

De acordo com Kersten et al. (1998), a partir da década de quarenta, período da Segunda Guerra Mundial, houve um aumento considerável na quantidade de energia consumida. Com isto, surgiu uma disputa entre as nações industrializadas com intuito de descobrir novos processos de geração de energia. Consequentemente, seu consumo passou a ser cada vez maior. Outros dois fatores responsáveis pelo aumento progressivo do consumo energético mundial foram: o crescimento populacional e econômico.

Conforme Goldemberg (2003), no fim da década de noventa o consumo diário médio de energia per capita mundial foi de aproximadamente 18 mil kcal. Há, contudo, uma enorme diferença deste consumo dos países ricos, onde vivem 25% da população mundial, e o consumo dos países pobres, onde vivem os 75% restantes. Apenas 30% de toda energia

comercial consumida no mundo foi utilizada nos países pobres e os outros 70% nos países ricos.

Para Goldenberg (2003); Acioli (1994) e Russomano (1987), a contradição apresentada anteriormente não é apenas em relação ao consumo energético, mas também, na diversidade da utilização: geralmente nos países ricos a energia está presente em vários setores da economia, como transporte, indústria e serviços, enquanto nos países pobres, ocorre com menor intensidade.

O BEN (2006) mostra a redução do uso da biomassa e o aumento dos combustíveis fósseis no Brasil. A Figura 2.2 apresenta a oferta de energia no Brasil entre 1940 e 2005.

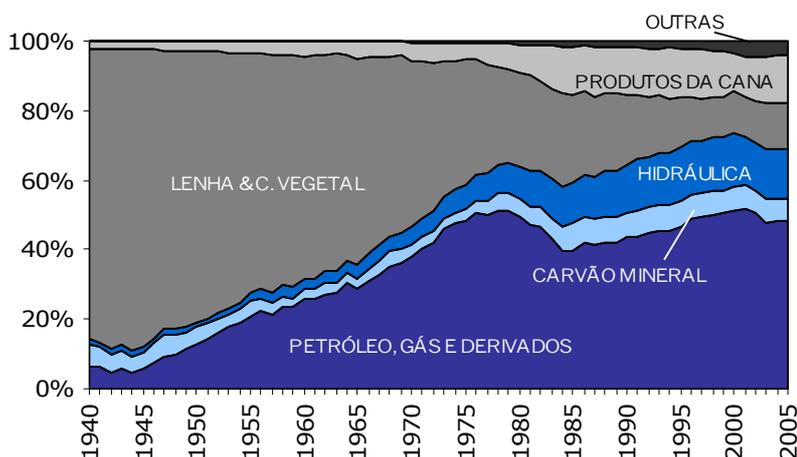


Figura 2.2 – Oferta de energia no Brasil entre 1940 e 2005 (BEN, 2006).

2.1.2 – Fontes de energia: classificação

Existem várias maneiras de se classificar as fontes de energia. Segundo o BEN (2006), podem ser classificadas em primárias e secundárias. As primeiras englobam os energéticos fornecidos pela natureza na sua forma direta, tais como: petróleo, gás natural, lenha, carvão metalúrgico, urânio, energia hidráulica, entre outras. Estes recursos podem ser consumidos diretamente ou utilizados como matéria-prima para obtenção de energia secundária, resultante dos diferentes centros de transformações. Como exemplos de energia secundária têm-se: derivados de petróleo e de gás natural, carvão vegetal e eletricidade.

2.1.2.1 – Fontes de energia primárias

Ainda conforme o BEN (2006), a energia primária se subdivide em renovável e não-renovável. O segmento que reúne os recursos energéticos renováveis e podem ser utilizados, permanentemente, sem agredir o meio ambiente são: radiação solar, a ação da gravidade da água, a força do vento, a ação das marés e a biomassa.

Com relação à energia renovável proveniente de biomassa, segundo Heller et al. (2004); Varela et al. (1999); Leite (1997) e Acioli (1994), tem-se que ela, quando queimada, lança dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, ao mesmo tempo em que consome oxigênio. No entanto, a quantidade de CO_2 lançada na atmosfera durante a sua combustão é considerada a mesma absorvida durante o ciclo de crescimento na implantação de novas florestas para realizar a fotossíntese. O que se consome na queima de biomassa é a energia do fóton⁴ emitida pelo sol. Assim, enquanto existir CO_2 , água e luz solar, pode-se obter energia de biomassa sem receio de modificação ambiental significativa, pois a biomassa, no estado natural, não contribui com o aumento da poluição da atmosfera.

Por outro lado, quando se queima combustível fóssil, tais como petróleo, carvão mineral e gás natural, a emissão de poluentes tem caráter irreversível. Além de consumir oxigênio da atmosfera, a sua queima gera um aumento da quantidade de CO_2 no meio ambiente, contribuindo de modo direto com os fenômenos de aumento do estoque de gás carbônico e do efeito estufa⁵.

A parte restante, constituída pelas demais fontes de energias, que não se reconstituem em tempo reduzido, denomina-se por energia não-renovável.

A Tabela 2.1 apresenta a oferta interna brasileira de energia renovável e não-renovável entre 1940 e 2000.

⁴ Fóton = partícula elementar associada ao campo eletromagnético, com massa e carga elétrica nula e cuja energia é igual ao produto da constante de Planck pela frequência do campo; quantum de luz.

⁵ Efeito estufa = ação que alguns gases presentes na atmosfera exercem, impedindo a dispersão do calor originado pela irradiação solar e refletido pela superfície terrestre (Bermann, 2001).

Tabela 2.1 – Oferta interna de energia no Brasil, entre 1940 e 2000 (BEN, 2006)

TIPOS DE FONTES DE ENERGIA	SÉRIE HISTÓRICA						
	1940	1950	1960	1970	1980	1900	2000
NÃO-RENOVÁVEIS							
Petróleo, gás natural e derivados (%)	6,4	12,9	25,7	38,0	49,2	43,7	50,9
Carvão mineral e derivados (%)	6,4	4,8	2,9	3,6	5,1	6,8	7,1
RENOVÁVEIS							
Hidráulica e eletricidade (%)	1,5	1,6	3,2	5,1	9,6	14,1	15,7
Lenha e carvão vegetal (%)	83,3	78,1	63,9	47,6	27,1	20,1	12,1
Produtos da cana-de-açúcar (%)	2,4	2,7	4,3	5,4	8,0	13,4	10,9
Outras fontes (%)	0,0	0,0	0,0	0,3	0,9	1,9	3,3

Observa-se, na Tabela 2.1, que na oferta energética brasileira a parcela referente às fontes renováveis representa uma importância significativa. Entretanto, percebe-se uma redução do consumo de lenha e carvão vegetal ao longo dos anos. O que ocorreu, nas últimas décadas, foi uma redução da participação destes últimos na matriz energética, ao contrário do crescimento dos derivados do petróleo e da energia de hidroelétrica. Isso pode ser explicado pela menor utilização da lenha, devido a sua escassez em algumas regiões do País e pela transferência de atividades da agropecuária para a indústria.

Ainda com relação ao consumo de energia renovável, a Tabela 2.2 apresenta o consumo mundial em 1980 e 2000 e o potencial para longo prazo.

Tabela 2.2 – Consumo mundial de energia renovável em 1980 e 2000 e seu potencial para longo prazo (Varela et al., 1999)

FONTE DE ENERGIA	1980	2000	Expansão futura prevista
	(Mtep)		
SOLAR	9,6	242-374	1080-3192
Direta	2,4	84-168	480-720
Coletores residenciais	2,4	40,8	120-192
Coletores industriais	2,4	69,6	240-480
Outros	2,4	48-96	240-720
BIOMASSA	1060	1514-1574	3835-4195
Madeira	840	1152	2400
Resíduo	156	168	–
Adubo	48	48	–
Biogás (pequenos digestores)	2,4	55,2	115,2
Biogás (grandes digestores)	2,4	4,8	120
Metano (madeira)	2,4	36-73,68	480-720
Florestas energéticas	2,4	14,4-36	360-480
HIDROELÉTRICA	460,8	912-1152	2160
EÓLICA	2,4	24-48	240
FOTOVOLTAICA	2,4	2,4-9,6	480
GEOTERMICA	7,2	24-72	240-480
TOTAL	1543	2718-3230	8035-10747 ^a

tep = tonelada equivalente de petróleo⁶

2.1.2.2 – Fontes de energia secundárias

Conforme Russomano, (1987), a energia secundária pode ser classificada em duas subdivisões. A parcela que vai de modo direto para o consumo e a outra parte que é destinada para os grandes centros de transformação, onde é convertida em fontes de energia. Como exemplo, tem-se os óleos combustíveis, que podem ser convertidos em eletricidade.

Nos últimos anos, em função das exigências sociais e governamentais, a preocupação com aspectos ecológicos no setor industrial é cada vez maior. Mello (2001) afirmou que a partir de 2001 o poder mundial passou a ser fundamentado na energia de biomassa. Quanto a outras formas de energia, observa-se por exemplo, a energia nuclear, que é hoje cercada de polêmica quanto ao seu uso; a energia hidroelétrica, que em termos mundiais, tem esgotada

⁶ tep (tonelada equivalente de petróleo) = energia liberada na combustão de uma tonelada de petróleo, que convencionalmente é igual a 10.000 Mcal (Guimarães, 1985). Segundo BEN (2006), quando se almeja o consumo de energia em tep, calcula-se o fator de conversão pela relação entre o poder calorífico superior de cada fonte pelo poder calorífico superior da fonte adotada como referência – o petróleo.

a possibilidade de sua ampliação e a energia solar, que apesar de possuir um aproveitamento inesgotável, ainda não alcançou os rendimentos equiparáveis às outras fontes.

2.1.3 – Seleção das fontes de energia

De acordo com Russomano (1987), os principais parâmetros a serem considerados na seleção das fontes de energia são os técnicos e os econômicos. A propriedade técnica mais marcante é o poder calorífico (PC), que é a quantidade de calor obtido na combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de uma substância, incluindo o calor consumido na vaporização da água e aquele existente na substância semelhante àquela formada durante a combustão, chamado também de poder calorífico

Existem, portanto, dois tipos de PC: o poder calorífico superior (PCS) - conforme definido anteriormente - e o poder calorífico inferior (PCI), o qual o autor mencionado antes afirma que o segundo pode ser determinado obtendo-se o PCS e subtraindo-se o calor de vaporização da água formada durante a combustão.

Há várias unidades de medida de energia. Embora o Sistema Internacional de Unidades estabeleça como padrão o Joule (J), no Brasil por ser de uso corrente utiliza-se também, para combustíveis sólidos, o Kcal/kg ou cal/g e para combustíveis gasosos, o Kcal/m³, onde uma caloria (cal) é a energia necessária para elevar de 1°C a temperatura de 1 grama de água a 15°C que é equivalente a 4,184 J.

Russomano (1987) a partir da análise do PCS classificou alguns combustíveis em alto, médio e baixo, a saber: maior que 8000 kcal/kg (gás natural, GLP, gasolina, querosene, óleo diesel); entre 8000 e 4000 kcal/kg (biogás, álcool, carvão mineral e vegetal) e menor que 4000 kcal/kg (xisto), respectivamente.

Conforme o mesmo autor, ao se comparar combustíveis, também é necessário considerar as suas características econômicas, por exemplo: disponibilidade no local de consumo, investimentos especiais, custos operacionais decorrentes de sua aquisição e produção e custos de manuseio e estocagem. Esse autor ainda afirma que a falta do combustível no

local do consumo acarreta despesas, por isso, qualquer estudo econômico deve tomar por base o seu custo de transporte do local de origem até onde ele será aplicado.

Quanto a alguns fatores que influenciam no poder calorífico, um dos mais importantes é o teor de umidade. Comparativamente, observa-se que a madeira com cerca de 40% de teor de umidade gera apenas a metade da energia produzida do que quando seca (Vale, 2000).

A Figura 2.3 apresenta a relação entre o poder calorífico inferior da madeira e o seu teor de umidade.

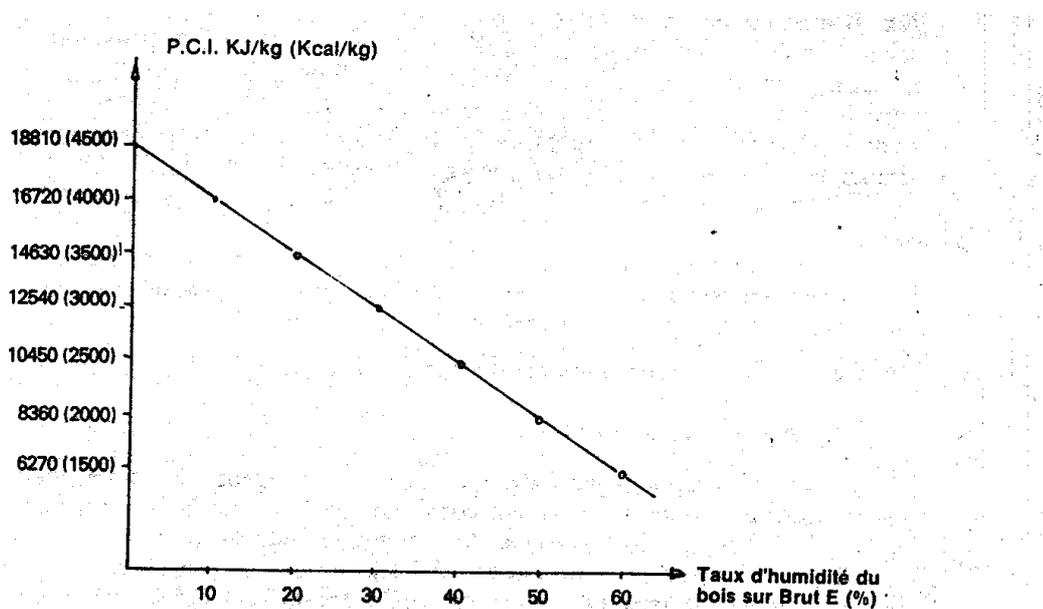


Figura 2.3 – Evolução do PCI da madeira em função de seu teor de umidade (Briane; Doat, 1985)

A crise energética mundial ocorrida na década de 70 suscitou a busca de novas fontes de energia, quando se registraram duas tendências aparentemente opostas: o processo de geração de energia nuclear e os sistemas de aproveitamento de recursos naturais não-poluentes, tais como: energia hidráulica, energia solar, energia eólica e energia de biomassa.

A busca da sustentabilidade e a redução do consumo de energia passaram a ser obrigatórios atualmente, em razão do esgotamento das matérias-primas e da crise de energia. Estudos de aproveitamento das mais diversas fontes de energia são realizados mundialmente, sendo que se espera que estes esforços sejam coroados com êxito, antes que a escassez dos combustíveis fósseis leve a atual civilização a uma situação de colapso econômico.

2.2 – BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA PARA A INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA

2.2.1 – Generalidades

Atualmente o mundo passa por um cenário em que vários processos tecnológicos de geração de energia são investigados, buscando atender à crescente demanda. Neste contexto, um importante papel é atribuído às fontes de energia renováveis, entre elas a energia de biomassa.

Conforme Ferreira (2001), biomassa é toda a matéria obtida direta ou indiretamente dos vegetais e que pode ser usada como fonte de energia; trata-se de todo recurso proveniente de um ecossistema, que se transforma em combustível de forma competitiva e adequada à preservação da natureza.

De acordo com Acioli (1994), as plantas comportam-se como verdadeiras usinas, transformando a energia luminosa do sol em energia química. Do ponto de vista energético – conforme a predominância do produto químico acumulado – têm-se quatro tipos de biomassas vegetais, a saber: sacarídeos, amiláceos, triglicéridos e ligno-celulósicos. Quanto aos ligno-celulósicos, que interessam para este trabalho, estes são constituídos por troncos e galhos de árvores, gramíneas, rejeitos florestais, casca de semente de algodão, bagaço de cana-de-açúcar, casca de coco, palha e casca de arroz, palha e sabugo de milho, casca de café e resíduos agroindustriais em geral.

Segundo Russomano (1987), existem dois enfoques básicos quanto à utilização da biomassa para fins energéticos, cada um com aspectos econômicos e técnicos peculiares. O primeiro considera o uso da biomassa como ela se encontra na natureza, quer extraída de modo direto para o uso, quer aproveitando seus rejeitos. O segundo considera a biomassa proveniente das florestas plantadas, as quais podem incluir as florestas energéticas, por exemplo, a cana-de-açúcar para a produção de álcool e qualquer outra cultura vegetal com objetivo de produzir energia.

Segundo Heller et al. (2004), a energia de biomassa comparada aos combustíveis fósseis tem a vantagem de ser uma fonte de energia renovável. Também permite a redução do uso

de derivados de petróleo e das emissões poluentes, agrega valor à produção agrícola com a venda de resíduos, além de gerar empregos principalmente na zona rural. Sua aplicação ainda possibilita o uso de tecnologias simples.

Mesmo com as vantagens apresentadas anteriormente, Russomano (1997) adverte que é preciso cuidados, na aplicação de biomassa para soluções energéticas. Existem problemas a considerar, tais como extração da lenha de florestas nativas pelo corte de árvores não-planejado ou incontrolado, com o perigo do desmatamento desenfreado, destruição do solo pela erosão, extinção de espécies, etc. No caso das florestas plantadas, ocorre a disputa dos escassos recursos entre a produção energética e a de alimentos, como: ocupação da terra, disponibilidade de equipamentos e de créditos de financiamento.

Segundo Goldemberg (2003), a queima da lenha, do bagaço da cana e outros resíduos da biomassa é utilizada em muitos países, mais particularmente nos Estados Unidos, gerando mais de 8.000 MW de eletricidade anualmente. No entanto, Mello (2001) afirma que o emprego de biomassa para geração de energia tem ocorrido apenas em locais onde existem restrições do fornecimento convencional de energia elétrica e onde há abundância de matérias-primas. Este autor admitiu que nas últimas décadas, para gerar energia em sistemas de maior potencial, a biomassa teve seu uso limitado à utilização da lenha, carvão vegetal e bagaço da cana, não existindo solução dominante para geração de eletricidade a partir da biomassa.

Para Leite (1997), o Brasil é um dos países que mais utiliza biomassa como fonte de energia. Isto não ocorre somente em virtude do Proálcool, mas também do aproveitamento do bagaço da cana e das indústrias de aglomerado e celulose, que utilizam a madeira como matéria-prima. Aproveita-se ainda, a tradicional lenha de florestas naturais para usos domésticos, para combustíveis industriais e para carvão vegetal. Entre as principais características que distinguem o Brasil na produção de energia de biomassa, têm-se o grande espaço geográfico disponível e a sua diversidade de vegetação.

Existem no Brasil algumas unidades de geração de energia que utilizam resíduos de biomassa e diversas outras usinas que possuem unidades em implantação. Entre as unidades em operação destacam-se a da CENIBRA, de 100 MW, em Minas Gerais, a da Aracruz Celulose, de 140 MW, no Espírito Santo e o Programa de Termelétricas de resíduos de madeira no Rio Grande do Sul (Mello 2001).

A queima de madeira, carvão e esterco animal são práticas diárias para geração de energia, utilizadas por aproximadamente metade da população mundial, e ocorrem principalmente nos países em desenvolvimento, por razões econômicas, sendo utilizadas para cocção de alimentos, aquecimento e iluminação das edificações. Em muitas regiões rurais do continente africano mais de 90% da população usa biomassa como fonte de energia (Ludwig et al., 2003).

Segundo Li; Liu (2000), a biomassa é um importante recurso energético renovável para geração de energia elétrica e outras formas de uso, com baixa emissão de poluentes.

E por fim, conforme Varela et al. (1999), entre os vários recursos energéticos renováveis, a biomassa é vista com grande zelo porque é formada principalmente por carbono, e então pode ser utilizada de modo direto como combustível a fim de produzir energia na forma de calor e eletricidade, transformada em combustíveis gasosos ou fluidos depois de tratamentos apropriados.

Ninguém contesta que as preocupações com os aspectos ecológicos têm-se mostrado constantes no panorama mundial, em função das exigências sociais e governamentais. No início, a preocupação com a natureza significava reagir contra catástrofes evidentes, porém, gradualmente a sociedade incorporou a idéia de que qualquer consumo excessivo ou uso ineficiente de recursos naturais constitui abuso para o meio ambiente.

A biomassa como fonte de energia é oportuna, porém, deve-se ficar atento para o cuidado de seu uso sustentável, abolindo a prática de cortes de florestas nativas e dando preferência ao uso de resíduos ligno-celulósicos.

2.2.2 – Potencial de biomassa como fonte de energia no Brasil

Segundo John; Ângelo (2003), a estimativa da quantidade de resíduos em um determinado tempo e sazonalidade é importante para determinar a estrutura necessária para realizar a reciclagem, para indicar a escala de produção necessária e para nortear as tendências futuras quanto ao beneficiamento de resíduos. Entretanto, conforme Belle et al. (2003), o fornecimento desta matéria-prima não é constante, pois depende da extensão da colheita e para a estimativa do seu potencial deve-se considerar o tipo de floresta, o método de coletar e o processo de beneficiamento. Isso permite determinar a quantidade de resíduos, bem como a porcentagem da matéria-prima comercialmente colhida.

Atualmente, apesar dos esforços contínuos dos órgãos brasileiros de fiscalização ambiental, não há dados sistematizados do volume de resíduos produzidos no País, nem de sua destinação. Conforme Kazmierczak et al., (2003), um fator colaborador para a inexistência dessas informações é a grande quantidade de empresas de pequeno e médio porte geradoras de resíduos.

Para Quirino (2003), os principais fatores que contribuem para que o potencial de resíduos ligno-celulósicos não seja conhecido no Brasil, são a sazonalidade da oferta e a produção em pequena escala, na maioria das regiões do País. Entretanto, um dos registros que se tem é a estimativa da produção anual das culturas agrícolas, em que se pode prever por meio destes valores, o volume de resíduos produzidos.

Conforme Wamukonya; Jenkins (1995), dependendo da demanda local os resíduos de madeira podem ser utilizados para várias finalidades. Um exemplo é a sua utilização para gerar vapor em caldeiras, nas serrarias. Entretanto, grande quantidade destes resíduos não é reaproveitada, sendo frequentemente queimada ao ar livre.

De acordo com o autor referido anteriormente, a maioria das indústrias beneficiadoras de madeira opera com um grau de aproveitamento muito baixo, sendo que apenas 50% da madeira que chega à serraria são convertidas em madeira beneficiada. Estudo desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação - FAO, conclui que nos países menos industrializados, este índice é de 65%. A indústria de celulose é uma das

indústrias que gera expressiva quantidade de resíduos de madeira, principalmente casca e ponteiros, que servem para gerar eletricidade.

Conforme John; Ângelo (2003), resíduos gerados em baixa quantidade limitam opções comerciais de reciclagem. Para a fabricação de produtos com participação de resíduo na composição final, tem-se como exemplos de estratégias, desde a mistura de resíduos de diferentes grupos, em conjunto com a matéria-prima primária, até a criação de pólos de reciclagem que articulem várias unidades geradoras de resíduos. A sazonalidade na produção, típica da agroindústria, pode exigir a formação de estoques que permitam às unidades de reciclagem operar de maneira contínua.

2.2.3 – Conversões da biomassa em energia: combustão (ou queima)

A conversão de resíduos ligno-celulósicos em energia é importante para proteger o meio ambiente, já que reduz a dependência pela lenha nativa, escassa em algumas regiões do planeta.

Segundo Rousset (2004), existem dois tipos de mecanismos de conversões da biomassa vegetal em fonte de energia: o mecanismo bioquímico e o mecanismo termoquímico.

A Figura 2.4 apresenta os mecanismos de conversões da biomassa em energia.

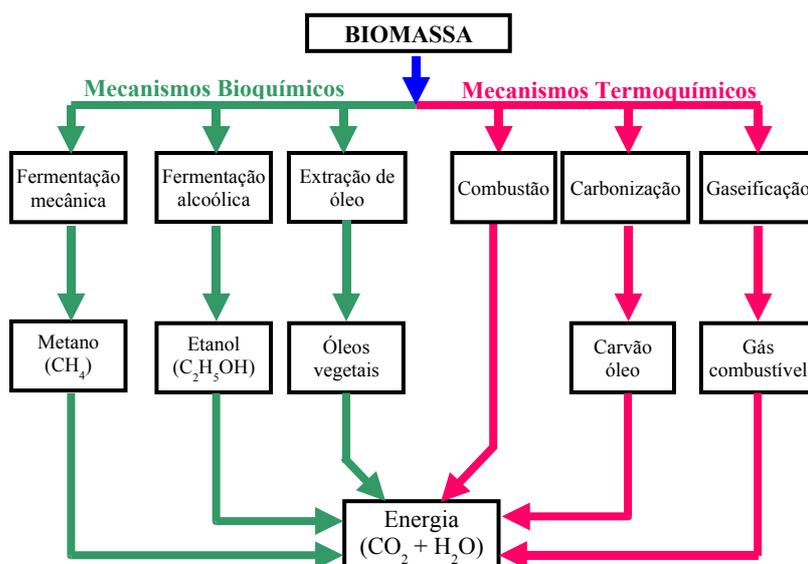


Figura 2.4 – Principais processos de conversões de biomassa em energia (modificado – Girard et al. 1997)

Os processos de conversão de biomassa em energia são: a) combustão; b) carbonização e c) gaseificação. O processo que interessa para o desenvolvimento deste trabalho é a combustão, o qual será descrito a seguir.

Segundo Goldemberg (2003), a combustão (ou oxidação) é uma reação química na qual os combustíveis reagem com o oxigênio, formando outros materiais e liberando energia.

Conforme Nagel (2000), combustão é a denominação dada a um fenômeno químico exotérmico⁷, caracterizado por uma reação de oxidação, onde para que ele ocorra, é necessário um combustível, o material a ser queimado, um comburente (geralmente o oxigênio contido no ar atmosférico) e certa quantidade de energia (por exemplo, faísca de fogo) para que as reações iniciem. Entretanto, se o combustível em contato com oxigênio for aquecido até atingir a temperatura necessária para ocorrer a combustão, ocorrerá este processo sem precisar da existência de uma faísca de fogo.

A combustão ocorre na superfície do material, por meio de reação química, onde o oxigênio do ar se une às moléculas do combustível. É uma reação em cadeia e relativamente lenta, entretanto pode ser acelerada, por exemplo, se o combustível for pulverizado (Acioli, 1994).

Considerando-se a combustão direta da madeira na forma de toras, achas⁸, cavacos, serragem ou briquetes, tem-se que a mesma consiste em obter energia por meio de sua queima em equipamentos térmicos. O calor gerado pode ser empregado para atividades domésticas ou industriais, tais como: cocção de alimentos, aquecimento e iluminação de edificações, secagem de produtos, geração de vapor para funcionamento de caldeiras, etc.

Observa-se que a combustão ou a queima de toras de madeira é um método de baixa eficiência térmica, devido a sua pequena superfície de contato com o oxigênio. A queima do briquete assemelha-se à da tora de madeira, no entanto, a menor seção da matéria-prima do primeiro aumenta a sua eficiência energética (Russomano, 1987).

⁷ Exotérmico = fenômeno químico com liberação de calor.

⁸ Achas de madeira = fragmento de madeira tosca, para produzir fogo.

durante as últimas três décadas. Significativos estudos foram realizados para aumentar a eficiência deste processo industrial, porém, dois problemas importantes permanecem sem solução, a saber: a necessidade do uso de equipamento específico em função do tamanho das partículas e a dificuldade de armazenamento da serragem.

2.2.4 – Emissões de poluição durante a combustão

Conforme já mencionado no subitem 2.2.3, a utilização da energia contida nos combustíveis ocorre mediante sua combustão, que tem como consequência inevitável a emissão de CO₂ ao mesmo tempo que consome oxigênio. Os processos de combustão, tanto dos combustíveis fósseis como de biomassa, nunca são completos e inevitavelmente lançam para a atmosfera monóxido de carbono e hidrocarbonetos.

Conforme Nagel (2000) e Leite (1997), as emissões nocivas inerentes ao processo de combustão são presentes em proporções variáveis, de acordo com a qualidade do combustível, e compreendem duas categorias. A primeira, que corresponde ao dióxido de carbono, que só pode ser contido com a limitação da queima de combustíveis. E a segunda, que corresponde aos óxidos de enxofre e nitrogênio, principais responsáveis pelo fenômeno da chuva ácida⁹. Da combustão ainda resultam as emissões de pequenas partículas que são relacionadas, de modo direto, com a qualidade do ar atmosférico aspirado pela população afetada.

Goldemberg (2003) considera como principais poluentes do ar urbano: a) óxidos de enxofre (SO_x), principalmente dióxido de enxofre (SO₂); b) óxidos de nitrogênio (NO_x), especialmente óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂); c) monóxido de carbono (CO); d) partículas em suspensão, incluindo chumbo (Pb) e ozônio (O₃) e e) hidrocarbonetos (CH, CH₂).

De acordo com o autor referido anteriormente, a poluição do ar e a chuva ácida ocorrem, sobretudo, em virtude da queima dos combustíveis fósseis e dos transportes urbanos. Além disto, o aquecimento atmosférico provocado pelo efeito estufa e as conseqüentes mudanças climáticas também ocorrem em razão da queima dos combustíveis fósseis. Tanto o NO_x como o CO₂ contribuem para o aquecimento por efeito estufa, sendo este último o principal

⁹ Chuva ácida = vapor associado com moléculas ácidas, tais como ácido sulfúrico ou ácido nítrico.

contribuinte. O desmatamento e a degradação do solo ocorrem, em parte, devido ao uso de lenha. Para o CIB (2000), emissões de CFC, HCFC e halogênicos causam destruição na camada de ozônio.

Para Goldemberg (2003), os principais emissores de CO₂ são os países industrializados, entre eles Estados Unidos, China, Alemanha e os países integrantes da ex-União Soviética, sendo que os setores mais responsáveis são o setor industrial e os meios de transportes. A queima dos combustíveis fósseis e da biomassa contribui com, aproximadamente, um terço das emissões totais do mundo. A combustão ineficiente de biomassa é a principal fonte de emissão de CO₂ nos países em desenvolvimento, podendo-se citar, dentre elas, a cocção de alimentos.

O desmatamento da Amazônia corresponde em mais que o dobro das emissões resultantes do uso de combustíveis fósseis. O Brasil é o 17º emissor de CO₂ do Planeta, considerando-se a queima de combustíveis fósseis. Quando são adicionadas as emissões de CO₂ resultantes da queima da variação da cobertura florestal, este índice passa para o 7º na classificação (Goldemberg, 2003).

Ainda conforme este autor, todos os tipos de emissões, exceto CO e NO_x são menores quando se consome gás natural. O petróleo é menos poluente do que o carvão mineral, exceto com relação às emissões de CO e impurezas associadas ao carvão. A madeira emite pouco Enxofre (S) e Nitrogênio (N), mas muito CO, gás metano (CH₄) e compostos orgânicos voláteis; no entanto, se a madeira for proveniente de reflorestamento, estas emissões passam a ser mínimas devido o seqüestro de carbono. A energia nuclear é o menor emissor dos poluentes listados anteriormente.

Segundo Schuurmans-Stehmann (1994), os impactos ambientais associados à geração e ao consumo de energia dependem, fundamentalmente, do seu processo de geração. Por exemplo, o uso da energia solar e da hidroelétrica representa impacto inferior no efeito estufa aos ocasionados pela queima de combustíveis fósseis. As usinas hidroelétricas não produzem quaisquer poluentes associados com os combustíveis fósseis, exceto gás metano, porém, interferem no meio ambiente pela construção de grandes represas, formação de lagos e interferência geral sobre os fluxos dos rios. A realocação das populações é um problema social de grandes proporções em muitos casos.

2.2.5 – Vantagens e desvantagens da biomassa como fonte de energia

Conforme Varela et al. (1999), a utilização das fontes de energia renováveis tem várias conseqüências positivas, por exemplo: motiva melhor posição no mercado de energia e contribui para reduzir os impactos ambientais relacionados à produção de energia e a disposição de resíduos.

Patil et al. (2002) afirmam como uma das vantagens da reciclagem de biomassa nos países desenvolvidos, a isenção de impostos para os combustíveis de biomassa, diferentemente dos combustíveis fósseis, que são fortemente taxados, uma vez que emitem gases tóxicos. E como desvantagem, a dificuldade de obter resíduos sem contaminantes para a combustão.

Por outro lado, a queima de lenha em queimadores ineficientes emitem CO, CO₂, NO_x, CHs e pequenas partículas. Mundialmente, isto tem influência negativa para o efeito estufa, além de afetar a população com doenças crônicas, tais como doenças respiratórias e cardíacas, com conseqüente aumento da mortalidade infantil (Kersten et al., 1998).

No futuro existirá provavelmente um aumento no preço da madeira, em razão dos custos superiores da sua produção, uma vez que recursos florestais mais inacessíveis terão que ser utilizados. No entanto, Varela et al. (1999) acreditam haver vantagens competitivas quando se utilizam combustíveis de biomassa, tais como: desenvolvimento regional, empregos rurais, segurança no abastecimento de energia e uso de resíduos florestais.

De acordo com Omer (2005), a vantagem dos combustíveis densificados, quando comparados com a lenha são: menor volume, teor de umidade mais constante e alto poder calorífico líquido.

2.3 – BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNO-CELULÓSICOS

2.3.1 – Generalidades

Segundo Varela et al. (1999), quando se analisa produtos de biomassa para produzir energia, é necessário escolher o mecanismo de conversão mais viável, conforme o recurso energético disponível, ou ajustar a biomassa potencial à técnica apropriada. Ainda, como o desempenho de qualquer mecanismo termoquímico depende, de modo direto, da homogeneidade da matéria-prima, deve-se também recorrer ao pré-tratamento, visando o aumento da sua eficiência energética e a minimização dos problemas ambientais.

Uma das técnicas empregadas para o aproveitamento dos resíduos ligno-celulósicos como combustível é a sua densificação, denominada briquetagem. Esta técnica consiste na compactação das partículas soltas, em que se utilizam pressões para transformar substratos vegetais, previamente moídos e secos, em corpos densos, com dimensões e formas predefinidas. Podem-se utilizar, ou não, aglomerantes (amido de milho) e tratamento térmico.

De acordo com Cuchet et al. (2004), a briquetagem vem sendo explorada há algum tempo. No passado, era realizada com métodos manuais, porém, atualmente, evoluiu para métodos mecanizados em escala industrial. Recentemente, vários fabricantes de máquina desenvolveram equipamentos de briquetagem (extrusoras) em escala comercial e se espalharam rapidamente no Norte da Europa.

O produto final da briquetagem, o briquete, apresenta constituição homogênea e massa específica elevada. É equivalente à lenha, mas com forma e umidade homogêneas (Quirino, 2002).

Conforme Wamukonya e Jenkins (1995), a densificação da biomassa melhora, de forma significativa, a qualidade energética da matéria-prima. Ela é usada, extensivamente, nos países industrializados, para a produção de peletes¹⁰ e briquetes, onde as matérias-primas se constituem em sobras de madeira. Nos países menos industrializados seu emprego ainda

¹⁰ Peletes = combustíveis sólidos de biomassa, constituídos por pequenos cilindros de 4 a 10 mm de diâmetro e comprimento menor que cinco vezes o diâmetro (ONORM M 7135:2000).

é limitado. Isso se deve ao subdesenvolvimento dessas nações e ao alto investimento necessário para a instalação das unidades industriais de combustíveis de biomassa densificados.

O estudo desenvolvido por Li e Liu (2000) conclui que, além da pressão de compactação, da velocidade de aplicação da carga, da forma e do tamanho do briquete, a matéria-prima também exerce influência significativa na qualidade dos briquetes.

2.3.2 – Matérias-primas dos briquetes ligno-celulósicos

2.3.2.1 – Resíduos ligno-celulósicos

Conforme Grover ; Mishra (1996), existem diversos fatores a serem considerados antes de se qualificar um resíduo para ser usado como matéria-prima de briquete, independentemente de sua disponibilidade em grande quantidade. Entre os fatores mais importantes destacam-se: baixos teores de umidade e de cinza.

Os resíduos ligno-celulósicos podem ser classificados em: subprodutos de processos industriais e subprodutos de culturas agrícolas. Os primeiros provêm de processamentos industriais, tais como bagaço de cana das usinas de açúcar e destilarias de álcool, e serragem de madeira das serrarias e indústrias moveleiras. Já os subprodutos das culturas agrícolas são derivados do manejo florestal e são representados, principalmente, pelos resíduos provenientes dessa atividade.

Na Itália, de acordo com Varela et al. (1999), cerca de 2% da energia nacional é produzida a partir de resíduos da biomassa. No entanto, esta contribuição poderia ser dobrada, utilizando uma abordagem mais racional para a geração de energia e identificando para cada matéria-prima a técnica mais apropriada. Este autor observa que, do ponto de vista econômico e quanto à redução dos impactos ambientais relacionados à produção, transporte e uso dos combustíveis fósseis, é mais vantajosa a utilização de combustíveis de resíduos ligno-celulósicos em forma de briquete.

De acordo com Kazmierczak et al. (2003), a adoção de ações de reutilização ou reciclagem de resíduos tem impactos positivos significativos, sendo os mais evidentes: 1) impacto

econômico – diminuição do custo do produto final, em consequência da redução do consumo de energia na fase de extração das matérias-primas, 2) impacto social – geração de novos empregos nas centrais de triagem e reciclagem de resíduo, 3) impactos ambientais – além de proporcionar destino correto do resíduo, reduz a ação na extração das matérias-primas, incluindo a emissão de poluentes e conservando, ainda, os recursos não-renováveis.

Conforme Brasil (1984), a produção de energia a partir da biomassa apresenta custo significativamente inferior, quando comparada aos combustíveis fósseis. Entretanto, a utilização dos resíduos ligno-celulósicos na forma primária como fonte de energia apresenta inconveniências, tais como: heterogeneidade, baixa massa específica e teor de umidade variável e elevada.

Segundo Li e Liu (2000), a heterogeneidade, característica do resíduo ligno-celulósico, dificulta o seu controle de queima e a sua baixa massa específica aumenta o custo de transporte, dificulta seu armazenamento e a sua utilização. A densificação pode ser a solução para estes problemas.

Alerta-se ainda que os resíduos das indústrias de móveis e de papel, apesar de serem subprodutos de outros processos industriais e de estarem disponíveis para reciclagem, podem possuir substâncias químicas tóxicas incorporadas, que podem ser liberadas na combustão, causando impactos negativos ao meio ambiente.

2.3.2.2 – Principais propriedades dos resíduos ligno-celulósicos como fonte de energia

No que se refere ao aproveitamento dos resíduos, o desconhecimento de suas propriedades e aplicações se constitui em um grave problema de risco para a população e o meio ambiente. Geralmente, as características dos resíduos são similares às da matéria-prima de origem, exceto quando realizado algum tratamento específico, tal como incorporação de substâncias tóxicas na fabricação do produto. Neste caso, pode haver mudanças nas propriedades do subproduto, comparado à matéria-prima original.

Para Grover; Mishra (1996), as principais propriedades dos resíduos ligno-celulósicos relevantes para a briquetagem são: 1) fluidez e coesão – os aglomerantes de biomassa

devem proporcionar estas características para a compactação; 2) tamanho e forma das partículas – partículas de 6 a 8 mm de tamanho proporcionam os melhores resultados, já que partículas menores significam coesão mais alta, causando dificuldade no fluxo; 3) área específica; 4) adesividade; 5) dureza – partículas muito duras causam dificuldade de densificação; 6) distribuição granulométrica – partículas de diferentes tamanhos melhoram o empacotamento; 7) teor de umidade – é importante estabelecer o teor de umidade inicial da matéria-prima do briquete, de forma que os briquetes produzidos tenham um teor de umidade superior à umidade de equilíbrio higroscópico. Caso contrário, os mesmos podem se expandir durante o armazenamento e transporte e se desintegrarem quando expostos à condições atmosféricas úmidas. Em geral, tem sido observado que, quando se tem um teor de umidade da matéria-prima de 8 a 10%, os briquetes apresentam teor de umidade entre 6 a 8 %.

Segundo Neves (2003); Rocha; Cheriaf (2003), na caracterização dos resíduos ligno-celulósicos para a obtenção de energia, consideram-se as propriedades estruturais, físicas e aspectos ambientais, conforme descritos a seguir.

- Propriedades estruturais

As propriedades estruturais dos resíduos ligno-celulósicos, utilizados para obtenção de energia, são: conhecimento da estrutura, do teor e da natureza dos materiais voláteis e da composição química. Essas podem ser determinadas por meio de ensaios, tais como: análise granulométrica, análise da forma das partículas, fluorescência de raios-X e análises térmicas (termogravimetria e análise térmica diferencial).

- Propriedades físicas

As principais propriedades físicas dos resíduos ligno-celulósicos, utilizados para a obtenção de energia, são: morfologia, textura, teor de umidade, superfície específica e massa específica a granel. Essas podem ser determinadas por meio de ensaios, tais como: microscopia eletrônica de varredura, porosimetria por intrusão de mercúrio e análise da superfície específica.

- Aspectos ambientais

É importante diagnosticar nos resíduos o grau de imunidade, no que se refere à presença e possível liberação de substâncias tóxicas, em concentrações que representem risco à saúde humana ou efeitos adversos ao meio ambiente. Isso implica na investigação da presença de impurezas e na quantificação de íons solúveis. É importante analisar, ainda, a presença de substâncias orgânicas complexas, tais como hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH) e dioxinas.

O conhecimento das propriedades das matérias-primas, utilizadas como fonte de energia, requer a identificação dos contaminantes presentes, principalmente, quando há necessidade de beneficiamento, tais como a exposição à elevadas temperaturas de queima, que pode gerar poluição secundária, uma vez que na combustão estas matérias-primas podem liberar poluentes. As principais propriedades dos resíduos energéticos normalizadas no Brasil, importantes para o meio ambiente, são: lixiviação, solubilidade e pH, que podem ser determinadas por análises térmicas e fluorescência de raios-X.

Os resíduos da indústria moveleira, de papel ou outros gerados de processamentos industriais devem ser investigados antes de sua utilização, principalmente quanto às características químicas. Apesar de serem fontes de energia disponíveis, podem possuir substâncias tóxicas incorporadas que podem ser liberadas na sua combustão.

E por fim, conforme Johansson et al. (2003), combustíveis de biomassa densificados constituídos, até certo limite, de partículas não muito pequenas, favorecem o tempo de queima. No entanto, sob condições de combustão incompleta, fazem com que as partículas maiores emitam mais poluição e teores de cinza.

- Outras propriedades

Ainda, outras propriedades relevantes dos resíduos de biomassa, utilizados como fonte de energia, são: poder calorífico (descrito no subitem 2.3.3) e aquelas relacionadas à unidade geradora e formas de beneficiamento, tal como a capacidade de moagem.

2.3.3 – Técnicas de briquetagem de resíduos ligno-celulósico

De acordo com Tabarés et al. (2000), os combustíveis de biomassa densificados podem ser influenciados por vários fatores, tais como: tipo de máquina usada para extrusão, características do mecanismo de densificação, matéria-prima e geometria do produto final.

Conforme os referidos autores, a técnica de briquetagem de resíduos é, principalmente, uma transformação física, que não afeta a composição química da matéria-prima. É uma alternativa viável para melhorar o comportamento energético, pois aumenta a homogeneidade da matéria-prima usada, torna mais fácil seu transporte e armazenamento e também permite o emprego de uma maior diversidade de substratos como fonte de energia.

Segundo Obernberger; Thek (2004), na densificação de biomassa podem-se obter dois produtos finais: o pelete e o briquete. O primeiro, é o resultado do mecanismo denominado peletização, cujo produto final é constituído de pequenos cilindros de 6 a 10 mm de diâmetro, com 30 a 40 mm de comprimento. O segundo, é originado do processo de densificação de biomassa denominado briquetagem, onde o produto final é composto por formas cilíndricas ou outras formas bem maiores que as do pelete, por exemplo, 95 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento.

De acordo com Li; Liu (2000) e Quirino (2002), existem cinco técnicas de densificação da biomassa para produzir combustíveis, a saber: extrusão de pistão mecânico, extrusão de parafuso de rosca sem fim, extrusão de pistão hidráulico, peletização e enfardamento. Para esses autores, o que difere nestas técnicas, é que nos dois primeiros casos emprega-se extrusão com altas pressões de compactação, enquanto nos últimos aplicam-se pressões de compactação média e baixa.

Segundo Grover; Mishra (1996), o consumo de energia na briquetagem com extrusora de pistão é menor que com a extrusora de parafuso sem fim, técnica de briquetagem que surgiu no Japão em 1945. Mas, em termos de desempenho na combustão, o briquete fabricado na extrusora de parafuso sem fim é superior ao da extrusora de pistão. Esses autores ainda afirmam que, a prensa de pistão hidráulico gera produções de briquetes menores, comparada à prensa de pistão mecânico. A Tabela 2.3 apresenta algumas características da extrusora de parafuso sem fim e da extrusora de pistão.

Tabela 2.3 – Comparações entre prensa de parafuso sem fim e extrusora de pistão
(Modificado: Grover; Mishra, 1996)

REQUISITOS	PRENSA	
	Extrusora de parafuso sem fim	Extrusora de pistão
Teor de umidade ideal da matéria-prima	10-15%	8-9%
Produção da máquina	em golpes	contínuos
Consumo de energia	50 kWh/t.	60 kWh/t
Densidade do briquete	1 a 1,2 g/cm ³	1 a 1,4 g/cm ³
Manutenção	alta	baixa
Desempenho na combustão (briquetes)	regular	muito bom
Homogeneidade dos briquetes	não homogêneo	homogêneo

De acordo com os autores mencionados anteriormente, dependendo do tipo de biomassa, três processos operacionais são geralmente exigidos para a técnica da briquetagem: a) Processo A – é mais utilizado para a serragem de madeira e consiste no peneiramento, na secagem, no pré-aquecimento, na densificação, no resfriamento e na embalagem; b) Processo B – é mais utilizado para resíduos agrícolas normalmente secos e consiste no peneiramento, na trituração, no pré-aquecimento, na densificação, no resfriamento e na embalagem; e c) Processo C – é mais utilizado para materiais como bagaço de cana, fibras de coco e outros talos de cereais úmidos e consiste na secagem, na trituração, no pré-aquecimento, na densificação, no resfriamento e na embalagem.

Em virtude da maior superfície específica por unidade de peso, o pelete é mais recomendado para ser utilizado diretamente em caldeiras, embora apresente desempenho energético inferior ao resíduo pulverizado (Russomano, 1987).

No que se refere à aplicação, tanto do pelete como do briquete, ainda se tem pouca tradição de uso no Brasil, embora já se tenham técnicas comprovadas em nível internacional. Existem, entretanto, algumas instalações em funcionamento em vários Estados brasileiros, bem como fábricas de equipamentos para tais processos industriais.

A Figura 2.6 apresenta uma vista de vários tipos de combustíveis de resíduos lignocelulósicos densificados, tais como briquetes e peletes.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.6 – Amostras de combustíveis densificados. a) várias amostras de briquetes ligno-celulósicos, de carvão e de peletes; b) briquetes de carvão vegetal; e c) briquetes de serragem de madeira e casca de semente de algodão.

2.3.4 – Principais propriedades dos briquetes de resíduos ligno-celulósicos

No Brasil, mesmo com a abundância de biomassa, não existem normas para este tipo de combustível. Normalmente, para a pesquisa destas fontes de energia, utilizam-se como referências as normas existentes para carvão vegetal ou as normas internacionais pertinentes.

As propriedades mais importantes dos briquetes ligno-celulósicos são: teor de umidade, massa específica aparente e a granel, índice de decomposição, teor de cinza, teor de

material volátil, teor de carbono fixo e poder calorífico. Os elementos constituintes dos briquetes, como por exemplo carbono, hidrogênio e oxigênio, também devem ser conhecidos. Ainda existem outras propriedades que definem aspectos técnicos importantes, como por exemplo, pressão de densificação, geometria (forma e diâmetro), resistência à água e índice de quebra.

O conjunto das propriedades referentes ao teor de umidade, teor de cinza, material volátil e carbono fixo é denominado análise imediata, conforme abordado a seguir.

2.3.4.1 – Análise imediata

De acordo com Tabarés et al. (2000), o teor de umidade pode ser determinado conforme a norma ASTM D 2016-25:1974 e o teor de cinza e de matérias voláteis segundo a norma ASTM D-5142:1990, ambas dos EUA. A norma ASTM D-5142:1990 estabelece que para a determinação do teor de materiais voláteis deve-se utilizar uma amostra de 1g, isenta de umidade, que será queimada durante cinco minutos, a 950°C, e para se obter o teor de cinza, emprega-se uma amostra de 2g, que será queimada durante 5 horas, a 800°C.

No Brasil, não existe norma para determinar a análise imediata de briquetes lignocelulósicos. Vale (2000) utilizou a norma brasileira ABNT NBR 8112:1986 para carvão vegetal, a qual recomenda que para determinar o teor de cinza deve-se proceder à queima completa da amostra, a 700°C, e para o teor de matérias voláteis, a 900°C.

- Teor de umidade (TU)

Conforme a norma ABNT NBR 8112:1986, que prescreve os procedimentos para a determinação do teor de umidade do carvão vegetal, esta propriedade deve ser calculada de acordo com a Equação 2.1.

$$TU = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde: TU é o teor de umidade, em %; m_0 é a massa da amostra úmida, em grama, e m_1 é a massa da amostra à 0% de umidade, em grama.

Segundo Singh (2004), um baixo TU nos combustíveis densificados é benéfico, pois esses combustíveis com elevada umidade podem resultar em inchamento e até dar-se a sua desintegração.

De acordo com o autor referido anteriormente, o briquete ligno-celulósico com TU (base úmida) entre 8 a 12% (umidade ótima), quando bem prensado, é 20 a 30 % mais denso, comparado ao resíduo original. Também se observa que o briquete tem, pelo menos, volume cinco vezes menor do que sua matéria-prima. Com isso, tem-se pelo menos, cinco vezes mais energia em um metro cúbico de briquete do que no equivalente de partículas soltas.

Obernberger; Thek (2004) analisaram o TU de vários briquetes europeus, concluindo que, exceto para uma amostra, as demais apresentaram TU conforme a norma austríaca ONORM M 7135:2000, que estabelece o TU igual a 10% (base úmida).

Wamukonya; Jenkins (1995) examinaram, após seis meses de armazenamento, briquetes produzidos a partir da palha de trigo e de serragem de madeira, e concluíram que os primeiros apresentaram TU inferior ao segundo. Os autores justificaram que pela rápida secagem da palha, quando comparada a serragem, conseqüentemente registro-se baixo TU, justificando, em parte, a pouca durabilidade dos briquetes produzidos com essa matéria-prima.

Pesquisa desenvolvida por Li ; Liu (2000), que analisaram briquetes fabricados a partir de duas serragens distintas (de carvalho e de pinho) e diferentes TU ($TU \leq 4\%$ e $TU \geq 13\%$), ambos fabricados com pressão de 138 MPa, sem conservação da carga, concluíram que briquetes de ambas as serragens, com $TU \geq 13\%$, apresentaram baixa massa específica dois minutos depois da sua extrusão. As amostras se desintegraram com facilidade até quando na aplicação de uma pequena força. Os autores afirmaram, também, que briquetes de ambas as serragens, mas com $TU \leq 4\%$ apresentaram massa específica mais elevada. No entanto, estas amostras absorveram umidade do ar e deformaram-se significativamente, tornando-se frágeis depois de pouca idade de fabricação. Ao contrário, briquetes produzidos com TU próxima de 8% apresentaram massa específica elevada e bom desempenho por longo período. Considerando a massa específica e a deformação dos

briquetes em função do tempo, TU entre 5 e 12%, foram os mais propícios para se produzir briquetes de boa qualidade com todos os materiais investigados.

Segundo Grover; Mishra (1996) briquetes com TU (base úmida) entre 6 a 8 % são fortes e livre de rachaduras, sendo sua superfície lisa. Porém, quando este teor é maior que 10%, os briquetes são fracos e a sua superfície externa é irregular.

- Teor de cinza (CZ)

Segundo Russomano (1987), dá-se o nome de “cinzas” aos materiais inertes que, como tal, não participam da combustão; ou se acumulam nos cinzeiros dos equipamentos térmicos, exigindo sua remoção, ou são carregados pelos gases de exaustão, incrustando-se no interior da chaminé ou poluindo o ambiente.

Conforme Obernberger; Thek (2004), o teor de cinza influencia na emissão de poluentes. Portanto, deve-se evitar combustíveis com alto teor de cinzas.

Segundo Johansson et al. (2003), em geral quando se tem na câmara de combustão pequenos volumes de combustível e de oxigênio, e combustíveis de baixa qualidade, implicam em combustão incompleta e conseqüentemente, em maior teor de cinzas.

De acordo com Vale (2000), cinzas são substâncias inorgânicas que não se queimam, portanto, não produzem calor, o que confirma a tendência da redução do poder calorífico conforme haja aumento desta substância no combustível. Dessa forma, havendo aumento do teor de cinza, haverá diminuição da quantidade de materiais combustíveis, conseqüentemente, diminuição do poder calorífico.

Estudo desenvolvido por Obernberger; Thek (2004), que investigou o teor de cinza de briquetes de serragem de madeira, concluiu que algumas amostras européias apresentaram teor de cinza acima do limite recomendado pela norma austríaca ONORM M 7135:2000, que é de 0,5%. Não obstante, o elevado teor de cinza pode ser uma indicação de que os produtores usaram matéria-prima contaminada, como exemplo areia incorporada à serragem durante o armazenamento e manuseio.

Para determinação do teor de cinza dos briquetes, os autores referidos anteriormente aplicaram dois procedimentos distintos: a norma sueca SS 187171:1998 e a norma alemã DIN 51719:1996. A primeira, recomenda que a amostra deve ser queimada até 550°C e a segunda, até 815°C, ambas durante cinco horas. Os resultados obtidos por essas duas normas indicam que o teor de cinzas, conforme a norma alemã, é inferior ao da norma sueca. Isso se explica pela crescente decomposição da amostra, como também, pela evaporação parcial das matérias voláteis, com o aumento de temperatura. Isto posto, os autores referidos anteriormente recomendam que o teor de cinza dos briquetes lignocelulósicos deve ser determinado segundo a norma sueca.

- Teor de matéria volátil (MV)

Com relação ao teor de matérias voláteis, Brito; Barrichelo (1982) afirmam que, com exceção do carvão, todos os combustíveis sólidos, quando aquecidos a altas temperaturas antes de se queimarem, sofrem evaporação da maior parte de suas matérias voláteis e só após essa evaporação seus constituintes, na forma gasosa, misturam-se com o oxigênio do ar, resultando nas reações típicas da combustão.

Conforme Vale (2000), na queima de combustíveis sólidos, em função do teor de matérias voláteis, há eliminação de gases, na forma de chama, fazendo com que o calor se difunda em um espaço amplo da região de queima e não permita a obtenção de altas temperaturas em pontos específicos. Por isso, combustíveis com altos teores de matérias voláteis são queimados mais rapidamente.

Segundo Obernberger; Thek (2004), é alta a quantidade de matérias voláteis nos combustíveis de biomassa, variando em geral entre 76 e 86 % (base seca), o que resulta em maior emissão de gases na combustão.

- Teor de carbono fixo (CF)

Conforme Gomes; Oliveira (1980), na determinação do teor de matérias voláteis, parte do carbono sai juntamente com os gases quentes, como elemento formador das moléculas de CO, CO₂ e hidrocarbonetos. Uma outra quantidade de carbono é responsável pela formação da massa amorfa e como esta não sai junto com a matéria volátil, ela é

denominada por carbono fixo. Esta designação tem o objetivo de distinguir a existência do carbono sob duas formas: a gasosa e a amorfa.

De acordo com Tabarés et al. (2000), quanto a biomassa para uso como combustível, o carbono fixo é o componente mais significativo e é o principal contribuinte para produzir energia durante a combustão. O carbono contido na biomassa, incluindo a casca no caso da madeira, é maior que em resíduos de culturas agrícolas. Esse fato explica o maior poder calorífico da madeira comparada aos resíduos agrícolas.

Segundo Vale (2000), combustível com alto teor de carbono fixo tem queima mais lenta, e portanto, maior tempo para a decomposição dentro das câmaras de combustão, sendo mais vantajoso do que aqueles que queimam mais rápido.

2.3.4.2 – Massa específica (γ)

Conforme Quirino; Brito (1991), a massa específica dos briquetes apresenta importantes correlações com outras propriedades. Por exemplo, em pesquisa desenvolvida por este autor, a massa específica a granel foi a propriedade que apresentou maior correlação com o índice de combustão. Também a forma e a dimensão dos briquetes exerceram influência positiva, com a conseqüente melhor ocupação dos espaços vazios na fornalha.

Os briquetes tem uma massa específica até duas vezes maior que o combustível industrial de madeira, a lenha (Grover; Mishra, 1996). Segundo Quirino; Brito (1991), normalmente os combustíveis de biomassa densificados possuem massa específica aparente entre 0,9 e 1,0 kg/cm³ e massa específica a granel entre 0,7 e 0,8 kg/cm³.

De acordo com Johansson et al. (2003), quando se empregam briquetes com baixa massa específica na combustão, esses se desintegram mais facilmente, geram mais cinzas e emitem mais fumaça. Ainda, a quantidade de materiais que não entram em combustão pode ser maior, afetando as condições de queima.

Obernberger; Thek (2004) investigaram amostras de briquetes ligno-celulósicos de vários países da Europa e concluíram que a massa específica da matéria-prima influencia a massa específica do briquete e o seu comportamento na combustão. Partículas densas apresentam

tempo de combustão mais longo. Os autores ainda afirmaram que baixa massa específica tem efeito negativo no poder calorífico do combustível, no custo de seu transporte e na sua capacidade de armazenamento.

2.3.4.3 – Expansão longitudinal (ou deformação específica)

A expansão longitudinal do briquete ao longo do tempo foi pesquisada por Ndiema et al. (2002), que constataram que a massa específica e a expansão do briquete ligno-celulósico dependem de muitos fatores, tais como: tipo e propriedades das matérias-primas, magnitude e modo de densificação, geometria do material produzido e condições de armazenamento. Os autores concluíram que esses fatores são essenciais no processo de densificação de biomassa e que o ensaio de deformação longitudinal permite um prognóstico do desempenho do material em exame.

Pesquisa desenvolvida por Wamukonya; Jenkins (1995), que investigou a expansão longitudinal de briquetes produzidos a partir de várias matérias-primas, concluiu que as maiores deformações ocorreram no primeiro minuto depois da extrusão do briquete, exceto para amostras de serragem, que apresentaram maiores expansões entre um e dois minutos após a extrusão. A deformação inicial foi aproximadamente logarítmica com o tempo, até duas horas. Além disso, mudanças de temperatura e da umidade relativa do ar resultaram em índices de deformação desuniformes. As amostras foram armazenadas em temperatura entre 15 e 20°C e umidade relativa média de aproximadamente 50%. No final da segunda semana de análise, foi registrado aumento na umidade dos corpos-de-prova entre 10 e 15%. Os briquetes de palha de trigo apresentaram diminuição no seu comprimento depois de uma semana; isso ocorreu principalmente devido à perda de material. Foram registradas mais perdas ao longo do estudo e alguns briquetes de palha se desintegraram. Os briquetes das outras matérias-primas continuaram aumentando seu comprimento, mesmo depois de concluídas as análises.

Belle et al. (2003) estudaram as deformações de briquetes produzidos a partir de: cavaco de madeira, serragem de madeira e palha de trigo, e concluíram que o briquete de palha de trigo apresentou maior deformação, comparado aos demais. Esta amostra se expandiu cerca de 150% no sentido longitudinal, enquanto as demais se expandiram em 80 e 70%, respectivamente. Os autores concluíram que, em virtude da palha conter menor quantidade de lignina e extrativos na sua constituição, proporcionou redução da coesão entre as

partículas compactadas. Conseqüentemente, a palha apresenta menor capacidade de briquetagem. Estes autores produziram, também, briquetes a partir de palha de trigo e serragem, em proporções iguais. Mesmo assim, as deformações ainda foram consideráveis, comparadas à dos briquetes produzidos somente com palha. Aumentando a proporção de serragem foi obtida menor deformação.

Ndiema et al. (2002) afirmaram que as matérias-primas, suas proporções e o mecanismo de densificação, influenciam na deformação dos combustíveis de biomassa densificados e conseqüentemente, nas características de combustão, tais como capacidade de ignição e emissão de poluentes.

2.3.4.4 – Poder calorífico (PC)

Segundo ABNT NBR 8633:1984, o poder calorífico é o número de unidades de calor liberadas pela combustão de uma unidade de massa de uma substância, em atmosfera de oxigênio, a volume constante e sob condições específicas, de modo que toda a água proveniente da combustão esteja no estado líquido. Sua determinação pode ser teórica (pelo conhecimento da composição química elementar da substância), ou experimental (utilizando bomba calorimétrica).

- Poder calorífico teórico – pode ser determinado a partir de sua composição elementar, valendo-se da hipótese de Dulong, segundo a qual a quantidade de calor produzido é igual à soma das unidades de calor produzidas ao queimar, separadamente, cada um dos elementos que o constituem (Russomano, 1987).

Segundo Tabarés et al. (2000), o poder calorífico teórico foi estudado por Dulong, que utilizou a Equação 2.2, a seguir.

$$PCS_{0\%} = 80,8(\%C) + 344\left(\%H - \frac{\%O}{8}\right) + 22,2(\%S) \quad (2.2)$$

Onde: C, H, O e S são as porcentagens de carbono, de hidrogênio, de oxigênio e de enxofre, respectivamente, do combustível analisado.

Para o autor citado anteriormente, uma das vantagens dessa equação é que as variáveis C, H, O e S, são fáceis de serem determinadas, por meio da análise química elementar. Outro benefício é que, os instrumentos para a determinação da análise elementar são mais simples e menos dispendiosos que a bomba calorimétrica.

Segundo Vale (2000), a Equação 2.3, proposta por Laut, também pode ser utilizada para determinar o PCS.

$$PCS = 81,7C + 342,5H - 36,6O \quad (2.3)$$

Onde: C, H e O são os teores de carbono, de hidrogênio e de oxigênio, respectivamente, do combustível analisado.

O PCS também pode ser determinado a partir da análise imediata, valendo-se da Equação 2.4, de Goutel, para combustíveis com teor de material volátil inferior a 40% (Gomide, 1979).

$$PCS = 82(CF) + \alpha (MV) \quad (2.4)$$

Onde: CF e MV representam as frações em peso de carbono fixo e de matéria volátil do combustível analisado e α é o coeficiente determinado pela reação $[MV/(MV + CF)] \times 100$.

- Poder calorífico experimental – é determinado por meio de bomba calorimétrica, que é um aparelho que mede o calor liberado e absorvido por reações que ocorrem à volume constante.

Segundo Russomano (1987), na determinação do poder calorífico a partir do ensaio experimental, procede-se inicialmente com a pesagem de pequena quantidade do combustível seco a ser testado e coloca-se a amostra na bomba calorimétrica, em recipiente de aço, imerso em quantidade conhecida de água. O combustível, ao se queimar, aquece a água, cuja temperatura é medida com precisão. Calculando-se o calor absorvido pela água, tem-se o calor fornecido pelo combustível, e com auxílio da Equação 2.5, determina-se o poder calorífico superior (PCS).

$$PCS = \frac{W(\Delta T) - Q_f - Q_a}{m} \quad (2.5)$$

Onde: W é o equivalente de água do calorímetro, em cal/°C; ΔT é a variação de temperatura, em °C; Q_f é a quantidade de calor de combustão do fio de ignição, em cal, (1 cm = 0,7 cal); Q_a é a quantidade de calor de formação de ácido nítrico, em cal, (1 ml = 1,5 cal) e m é a massa da amostra, em grama.

Na prática, ao invés do PCS, utiliza-se o poder calorífico inferior (PCI), pois não se consegue recuperar a energia empregada para vaporização da água. Esse último é dado pela Equação 2.6.

$$PCI_{0\%} = PCS_{0\%} - \text{calor latente (ou calor de vaporização da água)} \quad (2.6)$$

Deduzindo a Equação 2.6, tem-se:

$$PCI_{0\%} = PCS_{0\%} - 600 \left[\left(\frac{9H}{100} \right) \right] \quad (2.7)$$

Onde: $PCS_{0\%}$ é o poder calorífico superior do combustível seco e H é o teor de hidrogênio do combustível analisado, que para a madeira, em geral, é relativamente constante, cerca de 6%, em base seca e 600 cal é a quantidade de calor necessário para evaporar 1g de água.

A Equação 2.8 resulta em:

$$PCI_{0\%} = PCS_{0\%} - 324 \quad (2.8)$$

A partir do PCI calcula-se o poder calorífico líquido (PCL), conforme a Equação 2.9, a seguir.

$$PCL_{0\%} = \left[PCI_{0\%} \left(100 - \frac{h}{100} \right) \right] - 6h \quad (2.9)$$

Onde: h é o TU do combustível investigado.

2.3.4.5 – Análise química elementar

Esta análise indica as porcentagens em massa de cada um dos elementos constituintes de um material. Conforme Obernberger; Thek (2004), carbono, hidrogênio e oxigênio são os principais componentes dos combustíveis de biomassa.

Segundo a literatura, inclusive Oliveira et al. (1982), em geral, os teores médios de carbono, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio da madeira, são: 47%; 41%; 6% e 0,3%; respectivamente. Para Singh (2004), já que a matéria-prima utilizada para fabricar o briquete vem da biomassa, acredita-se que este combustível pode se comportar também como a biomassa da qual se originou.

A análise elementar pode ser determinada pela espectrometria de fluorescência de raios-X, utilizando equipamento modelo Philips PW 2400.

2.3.4.6 – Índice de combustão

O índice de combustão é a relação entre a porcentagem de massa consumida de uma substância e o seu tempo de combustão (Tabarés et al., 2000).

Conforme Quirino; Brito (1991), um briquete de boa qualidade, comparado aos combustíveis sólidos convencionais, fornece temperaturas mais elevadas durante um maior tempo de combustão, consumindo menor quantidade de massa.

2.3.4.7 – Pressão de densificação

A pressão de densificação é fator importante no desempenho da combustão de briquetes. Essa propriedade influencia diretamente na deformação longitudinal e no índice de quebra (ou friabilidade) do briquete.

Estudo realizado por Ndiema et al. (2002) concluiu que embora a pressão de densificação proporcione efeitos consideráveis nos briquetes, existe uma pressão máxima além da qual nenhum resultado significativo será adicionado na coesão destes combustíveis.

Também Li; Liu (2000) estudaram o efeito da pressão de densificação, incluindo o seu tempo de aplicação, e concluíram que para dez segundos de aplicação da pressão de densificação, resultou aumento de 5% na massa específica das amostras. Quando este tempo foi superior a vinte segundos, seu efeito diminuiu significativamente. Observaram ainda, que a massa específica inicial, dois minutos depois da extrusão do briquete, foi sempre superior ao período total de vinte quatro horas. Isto significa que o briquete se expandiu, consideravelmente, neste período. Os autores concluíram que o tempo de aplicação da pressão de densificação no processo de briquetagem tem pouca influência na expansão do briquete.

Também os autores referidos anteriormente, analisaram a influência da conservação da pressão de densificação na massa específica dos briquetes constituídos de serragem de madeira e dois teores de umidades. Para ambos, as curvas de massa específica em função da pressão de densificação apresentaram o mesmo padrão. Como esperado, a massa específica aumentou de acordo com o aumento da pressão. Os autores verificaram ainda que o tempo de aplicação da carga teve mais influência nas pressões menores que nas altas, sendo que na pressão de 138 MPa este efeito se tornou desprezível. Ainda, foi observado que a serragem de madeira, com teor de umidade de 8,7%, produziu briquetes mais densos do que com 15%.

2.3.4.8 – Geometria (forma e diâmetro)

Conforme Quirino; Brito (1991), a temperatura de combustão dos briquetes depende de outros fatores, dentre os quais podem ser citadas a sua forma e a dimensão.

Ainda, de acordo com Tabarés et al. (2000), a geometria dos briquetes influencia na sua velocidade de combustão. Para estes autores, em princípio, briquetes retangulares são os que na combustão têm maior perda de peso, devido à queima que se inicia nas suas arestas. Estes autores constataram também, que os briquetes de diâmetros maiores apresentaram combustão mais lenta, comparados aos de diâmetros menores.

De acordo com o autor referido anteriormente, é importante efetuar a redução granulométrica dos resíduos de biomassa por meio de moinhos, com peneira de malha de

abertura não muito pequena, onde deste modo, é possível produzir briquetes mais densos e de melhor qualidade, comparados aos briquetes fabricados com resíduos finos. Esse procedimento também diminui os custos da briquetagem e gera capacidade de ignição mais rápida.

2.3.4.9 – Resistência à água

Em pesquisa realizada por Li; Liu (2000), que investigou a resistência à água de vários briquetes produzidos a partir de diferentes matérias-primas e sob boas condições de densificação, concluiu-se que nenhuma amostra suportou mais do que cinco minutos depois de submersa em água com temperatura ambiente. Quando os briquetes entraram em contato com a água, rapidamente, aumentaram de volume e se desintegraram dentro de poucos minutos, a partir de então, conclui-se que os briquetes ligno-celulósicos possuem baixa durabilidade quando em contato com água, o que exige proteção contra chuva, durante o seu transporte e armazenamento.

2.3.4.10 – Índice de quebra (ou friabilidade)

Conforme Obernberger; Thek (2004), o índice de quebra do briquete é um dos parâmetros mais importantes na combustão, sendo que um alto valor deste requisito pode causar um baixo desempenho nos equipamentos térmicos, aumentando a emissão de pó durante a combustão.

Ainda, o índice de quebra determina a resistência mecânica necessária para o transporte e manuseio dos briquetes.

Conforme Li; Liu (2000), o índice de quebra pode ser calculado usando um procedimento adaptado da norma ASTM D 441-86:2002 para carvão, onde se obtém o peso de cada corpo-de-prova antes e após ser depositado em um tambor giratório, com velocidade constante e tempo de 15, 30, 60, 120 e 240 min.

Estudo realizado por Wamukonya; Jenkins (1995), que investigaram o índice de quebra de briquetes de palha de trigo, de serragem e de cavaco de madeira, concluiu que os briquetes de maior e menor índice de quebra foram os de palha de trigo e de cavacos de madeira,

respectivamente. Ainda, misturando proporções iguais de palha e serragem, ocorreu redução no valor do índice de quebra. Isto posto, os autores concluíram que existe possibilidade de produzir briquetes a partir da mistura de palha e serragem e, conseqüentemente, aumentar o uso da palha como combustível, contribuindo para reduzir o uso da madeira como fonte de energia.

2.3.5 – Aspectos econômicos

De acordo com Acioli (1994), um ponto relevante ao se discutir a importância de uma fonte energética é a sua viabilidade econômica, que consiste em analisar se ela tem um custo igual ou menor que o de outras fontes em uso.

Segundo Hillring (1997), além das propriedades técnicas dos briquetes, outros fatores influenciam no seu preço, tais como: quantidade disponível, confiabilidade e/ou qualidade de provisão e pontualidade da entrega. Outros atributos favoráveis à diminuição do preço é a possibilidade de aquisições de grandes quantidades e a duração por longo tempo dos contratos de compra, diferentemente do caso da lenha nativa.

De acordo com Tabarés et al. (2000), o briquete pode ser considerado um combustível alternativo para os combustíveis fósseis, devendo-se, porém, para garantir a sua viabilidade, analisar o custo das matérias-primas e a distância para o ponto de consumo, que pode significar aumento considerável no seu preço.

2.3.6 – Normas referentes a briquetes de resíduos ligno-celulósicos

Segundo Obernberger; Thek (2004), para viabilizar o uso de briquetes e peletes em sistemas de aquecimento, é necessário que eles possuam boa qualidade. Vários países europeus já criaram normalizações para tais produtos e outros estão em fase de elaboração. Na Europa, também existem especificações técnicas das associações de produtores de briquetes e peletes, por exemplo, os procedimentos técnicos da Associação Austríaca de Peletes. Além das normas para cada país, estão sendo elaboradas normas dessa natureza para a comunidade européia.

A Tabela 2.4 apresenta as principais propriedades de briquetes e peletes e suas respectivas normas regulamentadoras. Não foram incluídos nesta tabela as normas referentes aos elementos constituintes como carbono, hidrogênio e oxigênio, dentre outros, já que este trabalho não tem como objeto de estudo as emissões de poluentes a partir da queima de briquete.

Tabela 2.4 – Propriedades dos briquetes e peletes e suas normas correspondentes (modificado – Obernberger; Thek, 2004)

PARÂMETROS	NORMA REGULAMENTADORA			
	ÖNORM M 7135:2000	ASSOCIAÇÃO AUSTRIÁCA DE PELETES	SS 187120:1998	DIN 51731:1996/ SN 166000:2001
Diâmetro	sim	sim	sim	sim
Comprimento	sim	sim	sim	sim
Massa específica aparente	-	-	sim	-
Massa específica a granel	sim	sim	-	sim
Teor de umidade	sim	sim	sim	sim
Teor de cinza	sim	sim	sim	sim
Poder calorífico superior	-	-	-	-
Poder calorífico inferior	sim	sim	sim	sim
Teor de aglomerante	sim	sim	sim	-
Índice de Quebra	sim	sim	sim	sim

2.3.7 – Aplicações dos briquetes de resíduos ligno-celulósicos

Conforme Grover; Mishra (1996), os briquetes são particularmente recomendados para: a) caldeiras (geração de calor); b) indústrias de processamento de alimentos (destilarias, padarias, cantinas, restaurantes etc.); c) indústrias de processos têxteis (tingimentos etc.); d) produtos agrícolas (secagem de tabaco, produtos para chá etc.); e) produtos de barro (fornos de tijolos, azulejos, cozimentos de objetos domésticos etc.); f) uso doméstico (aquecimento de comida e água); g) gaseificação e h) carvão.

Segundo Tabarés et al. (2000), a técnica de densificação mais usada no mundo é a peletização.

No Brasil, conforme comentado anteriormente, o interesse pela briquetagem sempre esteve voltado para o aproveitamento dos resíduos de carvão oriundos da indústria siderúrgica, levando a maioria dos trabalhos científicos para o desenvolvimento de produtos para este

setor industrial. Existem, entretanto, várias questões a serem investigadas para a efetiva prática da produção e uso dos briquetes ligno-celulósicos. Estas devem, essencialmente, abordar aspectos relacionados ao perfeito conhecimento de suas propriedades, permitindo melhor orientação do mercado, tanto para os produtores quanto para os consumidores, que no futuro podem dispor de diferentes classes destes combustíveis e de parâmetros normativos.

Segundo Simo; Siwe (2000), a demanda potencial por briquetes, como combustível alternativo, é importante nas regiões com alta densidade demográfica e escassez de lenha. Atualmente, essa técnica está em produção crescente na República de Camarões.

Belle et al. (2003) analisaram a possibilidade de produzir briquetes de boa qualidade para usos domésticos e pequenas indústrias no Quênia utilizando serragem de madeira, cavacos, palha de trigo e misturas desses resíduos, sem o uso de aglomerantes e aplicando pressões relativamente baixas.

Wamukonya; Jenkins (1995) analisaram a aplicação de briquetes de casca de semente de algodão no Sudão, e concluíram que estes combustíveis podem ser amplamente comercializados, se forem produzidos com baixo custo e convenientemente acessíveis para os consumidores, sem o uso de altas pressões e aglomerantes, que podem aumentar, significativamente, o seu custo. Por fim, os autores concluíram que a produção de briquetes, a partir de vários resíduos é viável, tendo em vista sua grande disponibilidade na região do estudo.

2.3.8 – Vantagens e desvantagens dos briquetes de resíduos ligno-celulósicos como fonte de energia

De acordo com Ndiema et al. (2002); Li; Liu (2000), as vantagens do briquete ligno-celulósico, comparadas aos combustíveis sólidos convencionais, são: facilidade de queima, aumento do poder calorífico líquido, melhoria das características de combustão (como menor teor de umidade), menor incidência de cinzas e emissões de poluentes, uniformidade de sua geometria, elevada massa específica e capacidade de resistir aos esforços de transporte e manuseio.

Omer (2005) aponta algumas vantagens do briquete ligno-celulósico comparado à lenha, entre elas, o maior poder calorífico líquido e a maior massa específica, implicando em um menor custo de transporte e maior competitividade no mercado.

Conforme Tabarés et al. (2000), ainda comparando o uso do briquete com os combustíveis fósseis, acrescenta-se às vantagens apresentadas anteriormente, a necessidade de menor quantidade de oxigênio para a combustão, uma vez que na constituição dos combustíveis de origem vegetal existe alto teor de oxigênio, o que favorece sua queima. Ainda, podem ser apontadas como vantagens o alto ponto de ignição e a baixa velocidade de queima dos briquetes.

Para o autor mencionado anteriormente, as principais desvantagens do briquete ligno-celulósico são a heterogeneidade da matéria-prima e as diferentes técnicas de densificação. Tais fatores tornam difícil a obtenção de uniformidade para diferentes marcas de briquetes existentes no comércio.

De acordo com Quirino; Brito (1991), como a temperatura máxima da combustão do briquete varia com a sua procedência, pode-se dispor de briquetes de várias características em um mesmo mercado local, o que de certo ponto é prejudicial, já que contribui para o vício de compra de um único fabricante.

Segundo Ndiema et al. (2002); Grover; Mishra (1996), como os briquetes possuem características similares à madeira e ao carvão vegetal, os fornos industriais empregados para o uso do briquete são os mesmos projetados para a lenha. Porém, certas mudanças em parâmetros operacionais, especialmente no que se refere à distribuição do ar de combustão, podem ser incorporadas na conversão. Ainda, quando se utiliza briquete produzido a partir de resíduos agrícolas, a quantidade de cinza se torna um inconveniente.

Para Grover; Mishra (1996), apesar dos briquetes apresentarem-se um pouco frágeis, estes não causam qualquer perigo de fogo devido a combustão espontânea, como é o caso dos resíduos agrícolas.

Segundo os autores referidos anteriormente, os briquetes têm uma propensão para quebrar durante a combustão e, dependendo do tamanho, tendem a passar através da grelha para o

cinzeiro, em alguns casos bloqueando a grelha, e conseqüentemente, reduzindo o seu desempenho de combustão. A técnica de briquetagem influencia no desempenho da combustão, sendo que os briquetes produzidos em prensa de parafuso sem fim possuem um melhor desempenho na combustão que aqueles de prensa de pistão.

E por fim, um dos inconvenientes do uso do briquete é a necessidade da redução da granulometria da sua matéria-prima, a qual onera o seu processo de fabricação, o que faz aumentar o consumo de energia.

3 – INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA

Esta seção apresenta um histórico da indústria de cerâmica vermelha, algumas propriedades principais referentes à argila e uma breve descrição do processo de fabricação de blocos cerâmicos, com ênfase na fase de queima. No final desta seção, também abordam-se alguns requisitos e propriedades de desempenho do bloco.

3.1 – INDÚSTRIA CERÂMICA

3.1.1. Histórico

Conforme as definições dadas pela American Ceramic Society e a American Society for Engineering Education, as cerâmicas ou os materiais cerâmicos compreendem todos os materiais de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, excetuados os metais e suas ligas, que ficam utilizáveis geralmente pelo tratamento em temperaturas elevadas (Souza Santos, 1975).

Denomina-se por cerâmica a pedra artificial obtida pela moldagem, secagem e cozimento de argilas ou de misturas de materiais contendo substância. Nos produtos cerâmicos a argila fica aglutinada por pequena quantidade de vidro, que surge pela ação do calor de cocção sobre os minerais argilosos (Bauer, 2000).

Conforme Bauer (2000), Resende (1998) e Souza Santos (1975), a palavra “cerâmica” é derivada do vocábulo grego *kerameikos*, que significa “feito de terra”. É uma arte antiga que acompanha a história da humanidade, desde o período pré-neolítico, quando se percebeu que a argila, quando deixada sob o sol escaldante, endurecia. Os primeiros objetos cerâmicos tinham utilidade de armazenar água e alimentos. No entanto, pode-se dizer que os objetos cerâmicos feitos de maneira mais sistemática surgiram no período neolítico, quando o homem constatou que o calor endurecia a argila. Existem indícios da atividade cerâmica em todas as civilizações.

Atualmente, o setor de materiais cerâmicos engloba vários subsetores, com características individuais e níveis de avanço tecnológico distintos. Segundo a Associação Brasileira de

Cerâmica (ABC, 2005), em função de diversos fatores, como matéria-prima, propriedades e áreas de utilização, este setor classifica-se em: cerâmica vermelha (ou estrutural), materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico e cerâmica técnica.

Segundo Souza Santos (1975), materiais cerâmicos são: materiais de cerâmica vermelha (ou estrutural), materiais de cerâmica branca, materiais refratários, vidros, cimento Portland, cales e gessos.

Conforme Bauer (2000), Resende (1998) e Souza Santos (1975), no século VII os chineses já fabricavam a porcelana. Enquanto isso, no resto do mundo só se fabricava a cerâmica vermelha, até que no século XVII, na Inglaterra, surgiu a louça branca. A partir daí, ocorreu uma grande expansão deste setor industrial, com base em técnicas modernas e pesquisas de laboratórios especializados. Surgiram tipos especiais de fornos, peças cerâmicas de dimensões exatas, moldagem a seco e porcelanas de alta resistência.

Segundo Bauer (2000) e Amboni (1997), foi no Mediterrâneo, aproximadamente há 2000 anos a.C., que os semitas inventaram o torno de oleiro – roda de madeira movida por pedal, que fazendo girar uma massa de argila sobre ela, permitia moldar objetos, geralmente de forma arredondada. Uma nova etapa da história da cerâmica começou com o surgimento dessa ferramenta, que permitiu maior rapidez, acabamento e qualidade dos produtos cerâmicos.

No século XVIII ocorreram importantes avanços tecnológicos no processo de fabricação de tijolos, que incluíram a padronização das formas e a queima em fornos contínuos do tipo túnel. No século XIX, a introdução da energia a vapor conduziu à mecanização do processo, possibilitando melhor controle da matéria-prima e secagem mais rápida (Reed, 1995 apud Tomazetti, 2003).

Segundo Obermeier, Vieira (1998), Petrucci (1998) e Mitidieri Filho; Cavalheiro (1988), entre 1850 e 1860, com o surgimento da primeira máquina de modelar, foi possível fabricar produtos de diversas formas e tamanhos, inclusive com furos ao longo de seu comprimento, visando principalmente à redução do peso próprio.

Na primeira metade do século XX o setor cerâmico teve um rápido desenvolvimento tecnológico, com maior mecanização do processo, controle de temperatura dos fornos e fabricação de produtos refratários para aplicação na indústria eletrônica. Na segunda metade deste mesmo século continuou o intenso desenvolvimento para este setor.

Embora os materiais cerâmicos tenham sido empregados há séculos, o entendimento científico e tecnológico da queima só teve intenso desenvolvimento durante os últimos 50 a 60 anos (Richerson, 1992 apud Tomazetti, 2003).

3.1.2 – A indústria de cerâmica vermelha no Brasil e principais aspectos na produção de blocos

Segundo Penido; Costa (1999), os primeiros produtos cerâmicos europeus e asiáticos que desembarcaram no Brasil foram trazidos pelos colonizadores. Os nativos já conheciam a arte de modelar a argila, porém, foi com a chegada dos primeiros portugueses que se deu início à utilização da técnica de produzir materiais cerâmicos para a construção civil, tais como tijolos e telhas cerâmicas.

Conforme Pracidelli (1989), as primeiras indústrias brasileiras de cerâmica vermelha surgiram no século XVI, nos Estados de Pernambuco, Bahia e Santa Catarina. Operavam com processos manuais e eram responsáveis pelo fornecimento de tijolos, telhas e manilhas para diversos Estados da federação.

Durante os últimos anos do século XIX e início do século XX, as indústrias cerâmicas passaram a se especializar em determinados produtos, o que gerou a divisão entre olarias e cerâmicas. Olarias seriam as unidades produtoras de tijolos e telhas, e cerâmicas, de produtos mais sofisticados, tais como: azulejo, manilhas, louças etc.

Segundo Macedo (1997), o processo de industrialização do Brasil teve início no período de 1900 a 1940, entretanto, o grande desenvolvimento do setor de cerâmica vermelha só ocorreu após a Segunda Guerra Mundial. Nessa época, observou-se uma rápida evolução nacional no setor industrial de cerâmica vermelha, em razão de: abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de técnicas e equipamentos industriais. Alguns desses equipamentos, conforme apontado por Kipper (2005), são a

extrusão a vácuo, na década de 60, e os primeiros secadores tipo estufa, na década de 70, possibilitando avanços importantes para a industrialização das olarias.

O subsetor de cerâmica vermelha é de grande importância para a indústria da construção civil, gerando milhares de empregos diretos e movimentando milhões de toneladas de matérias-primas. No Brasil, há poucas referências sobre este subsetor, sendo que são estimadas entre dez a doze mil o número de fábricas existentes, localizadas em todos os Estados da federação. A maioria é constituída de micro e pequenas empresas familiares, com infra-estrutura simples, empregando tecnologias desenvolvidas há mais de trinta anos.

Quanto aos produtos de cerâmica vermelha, os mais comuns são: tijolos (maciços e furados), blocos (vedação, estrutural e laje mista), telhas, canaletas, tubos (ou manilhas) e ladrilhos de revestimento.

A baixa rentabilidade da maioria das indústrias de blocos cerâmicos ainda não permitiram adequar seus processos de produção às mudanças ocorridas na construção civil, contribuindo, desta forma, com a perda de mercado para produtos com a mesma função na edificação. A necessidade atual de um mercado cada vez mais competitivo e exigente por qualidade tem induzido algumas indústrias cerâmicas a se empenhar em ajustar seus produtos, conforme as exigências das especificações de normas técnicas. Inúmeros autores, entre eles: Tomazetti (2003), Oliveira (2002), Tavares et al. (2002), Sposto; Perini (2000), Silva et al. (2000) e INMETRO (2000), têm constatado uma qualidade insatisfatória nos blocos cerâmicos produzidos no Brasil.

Ainda com relação à produção de blocos, observa-se que os seus custos de fabricação são fortemente voltados nos consumos de energia e mão-de-obra.

Conforme Duailibi Filho; Carvalho (2002); Langhaz (1991), os principais aspectos que influenciam a baixa qualidade na produção de blocos são a utilização de equipamentos térmicos de baixa eficiência energética e o emprego predominante de lenha nativa na fase de queima.

3.2 – ARGILAS PARA BLOCOS CERÂMICOS

3.2.1 – Constituição das argilas

Conforme Petrucci (1998), denomina-se argila o solo constituído, principalmente, de silicatos de alumínio hidratado, que possui a propriedade de formar, com a água, uma pasta plástica suscetível de conservar a forma moldada, secar e endurecer sob a ação do calor. Conforme Bauer (2000) e Petrucci (1998), este material provém da desintegração das rochas ígneas¹¹, sob a ação incessante dos agentes atmosféricos. Apresenta complexa constituição química formada, essencialmente, de partículas extremamente pequenas com número restrito de substâncias denominadas argilominerais, as quais são materiais argilosos constituídos de silicatos hidratados de alumínio, óxido de ferro e magnésia, comumente com alguma porcentagem de álcalis¹² e de alcalinos-terrosos. Junto com esses elementos básicos vem sílica, alumina, mica, calcário e matéria orgânica.

De acordo com vários autores, incluindo Bauer (2000), Petrucci (1998) e Caputo (1988), em geral, não se encontram argilas puras, mas misturadas, ainda que predomine um mineral determinante. Frequentemente há diferenças acentuadas até na mesma jazida, com diferentes espécies de argilas.

As substâncias constituintes das argilas são responsáveis, em parte, pelas características dos blocos cerâmicos. Conforme Bauer (2000), Petrucci (1998) e Verçoza (1987), seus principais constituintes influenciam nas características e propriedades do bloco cerâmico. Como exemplos tem-se o óxido de ferro misturado à caolinita proporcionando a cor vermelha aos blocos, ou em outros casos, a formação de manchas.

Segundo Vieira et al. (2003), Bauer (2000), Petrucci (1998) e Souza Santos (1975), a água também é um mineral integrante das argilas. As formas incluem: a) água livre – que preenche os vazios formados pelos grãos; b) água adsorvida – que está unida à superfície dos cristais separando-os e facilitando a trabalhabilidade no processamento dos produtos cerâmicos e; c) água de constituição – que forma parte da rede cristalina dos argilominerais.

¹¹ Rocha ígneas = também conhecidas como magmáticas, são formadas pela solidificação do magma.

¹² Álcali = nome comum aos óxidos, hidróxidos e carbonatos de metais alcalinos (Lítio, Sódio, Potássio, Rubídio e Césio).

A energia térmica elimina toda a água, qualquer que seja sua forma. Segundo Petrucci (1998), Souza Santos (1975), Van Vlack (1973) e Norton (1973), a água livre requer pouca energia para a sua retirada e a secagem pouco acima da temperatura ambiente é suficiente para a sua eliminação praticamente total. A água adsorvida pode ser eliminada pelo aquecimento entre 100 e 150°C e a de constituição requer temperaturas superiores a 300°C. Não ultrapassando essas temperaturas, os minerais podem se hidratar quantas vezes se queiram.

Vieira et al. (2003) e Petrucci (1998) afirmam que a água livre é responsável pela retração dos blocos cerâmicos, que a quantidade da água adsorvida é função do grau de divisão do mineral e do estado higrométrico do ambiente, e que a água de constituição é proporcional à porosidade do argilomineral, assim como ao grau de umidade.

De acordo com Petrucci (1998), na preparação industrial das pastas, adiciona-se água às argilas para que estas possam ser moldadas. Essa água de amassamento não é levada em conta no estado da desidratação, porém ela é eliminada a baixas temperaturas. Quando perde toda a água, o bloco adquire dureza e sonoridade, aumentando a sua porosidade.

3.2.2 – Classificação das argilas

As argilas podem ser classificadas segundo: a sua estrutura cristalina, o seu emprego e seu local de origem, ou ainda, conforme as suas características e propriedades essenciais. Neste trabalho será apresentada somente a classificação quanto à estrutura cristalina, abordada na análise mineralógica da argila utilizada nos blocos cerâmicos analisados (ver Seção 5).

Conforme Petrucci (1998), quanto à estrutura cristalina, as argilas classificam-se em: a) laminar, subdividida em caulinitas, montmorilonitas e ilitas e; b) fibrosas. Somente as de estrutura laminar são usadas na fabricação de produtos cerâmicos. As caolinitas são as mais puras e usadas na indústria de refratários. As montmorilonitas são pouco usadas; muito absorventes e de grande poder de inchamento, são misturadas com as caulinitas para corrigir a plasticidade da massa cerâmica. As ilitas são as mais abundantes e também as mais empregadas na fabricação de blocos cerâmicos.

A constituição mineralógica indica a temperatura adequada de queima; como exemplo, para a cerâmica branca, quando utiliza-se caolinita, há necessidade de temperatura mínima

de queima de 1200°C, e no caso do bloco cerâmico, quando na utilização da ilita, é necessário temperatura mínima de 900°C.

As argilas usadas na produção de blocos são, geralmente, argilas quaternárias¹³ e, às vezes, terciárias, das margens de rios, lagos ou várzeas, ricas em ferro e álcalis, de granulometria fina e contendo teor apreciável de matéria orgânica. A composição mineralógica destas argilas é a de uma mistura de caulinita, com ilita ou montmorilonita ou desses minerais em camadas mistas, além de apreciáveis teores de compostos de ferro (Souza Santos, 1975).

Ainda, as impurezas contidas nas argilas, ou que se adicionam a elas, podem influenciar as propriedades dos blocos e dificultar o seu processamento industrial. Entre essas impurezas, têm-se: sais solúveis, nódulos de cal, grãos duros, cristais de gesso etc. (Gomes, 1988).

De acordo com Souza Santos (1975), as argilas usadas para fabricação de blocos cerâmicos devem ser moldadas facilmente e ter resistência mecânica média ou elevada, antes e após a queima. Costumam apresentar cor vermelha após a queima em altas temperaturas, com mínimo de trincas e empenamentos. Elevados teores de ferro divalente, elementos alcalinos e alcalino-terrosos são prejudiciais, pelo fato de causar excessiva retração, reduzir a faixa de vitrificação e causar coloração indesejável.

3.2.3 – Propriedades das argilas

Conforme vários autores, dentre eles, Petrucci (1998) e Souza Santos (1975), as características essenciais das argilas para serem utilizadas na produção de blocos são determinadas pela plasticidade, pela capacidade de absorção e cessão de água, e por seu comportamento ao calor (alteração de volume durante a secagem e o cozimento). As características secundárias são determinadas principalmente pela retração linear de secagem, porosidade e cor.

¹³ Argilas quaternárias e terciárias = equivalem aos materiais argilosos que tiveram origem na era Cenozóica (Souza 1973).

3.2.3.1 – Granulometria das argilas

Segundo Gomes (1988) e Souza Santos (1975), o tamanho das partículas das argila é uma característica muito importante, uma vez que ele influencia outras propriedades, tais como: plasticidade, permeabilidade e resistência no estado seco ao ar, que são dependentes, além da dimensão das partículas, da distribuição granulométrica e de sua forma.

Conforme Petrucci (1998), a composição granulométrica da argila tem íntima relação com sua resistência no estado seco ao ar. Segundo este autor, a distribuição do tamanho das partículas mais adequada para uma argila oferecer boa resistência à flexão é aquela que possui minerais argilosos em torno de 60%, estando o resto do material dividido igualmente entre silte, areia fina e média.

O mesmo autor referido anteriormente recomenda que, quando a granulometria original das argilas não atende os critérios referidos anteriormente, estas devem ser dosadas a fim de apresentar plasticidade máxima quando úmida, resistência à tração máxima quando seca, e retração mínima durante a secagem.

Por outro lado, Macedo (1997) afirma que a finura da argila não influencia somente na sua plasticidade, mas também se estende a outras propriedades, tais como: comportamento na secagem, retração de secagem, empenamento e resistência à flexão.

Para a determinação da composição granulométrica pode-se utilizar o método de ensaio normatizado pela norma ABNT NBR 7181:1984.

3.2.3.2 – Plasticidade

Conforme Souza Santos (1975), a plasticidade das argilas é essencialmente resultante das forças de atração entre as partículas lamelares dos argilominerais e a ação lubrificante da água. Pode-se admitir que a plasticidade se desenvolve quando a argila tem água suficiente para cobrir toda a superfície dos argilominerais com uma película de água, que age como lubrificante, facilitando o deslizamento da fração lamelar umas sobre as outras quando uma tensão tangencial for aplicada.

De acordo com Bauer (2000), Gomes (1988) e Souza Santos (1975), a plasticidade das argilas está diretamente correlacionada com fatores da própria matéria-prima, tais como: composição mineralógica, dimensões e formato das partículas e da presença de outros minerais, além dos argilominerais. A plasticidade será maior em argilas com maior teor de minerais argilosos e maior porcentagem de grãos finos. Vieira et al. (2003) e Petrucci (1998) afirmam que a plasticidade nas argilas varia, ainda, com a quantidade de água empregada no seu processo de conformação.

Argilas muito plásticas não devem ser utilizadas na fabricação de blocos cerâmicos, pois requerem muita água, o que faz com que os blocos não possam ser satisfatoriamente moldados, em função do excesso de umidade (Grim, 1962 apud Tomazetti, 2003).

Segundo Ribeiro et al. (2003), a composição das argilas, e conseqüentemente, da massa cerâmica, determina parcialmente a plasticidade. De modo genérico, pode-se afirmar que a maioria das massas cerâmicas para extrusão são constituídas fundamentalmente por duas argilas, uma muito plástica (frequentemente micácea ou ílítico-montmorilonítica) e por outra pouco plástica (normalmente muito silicosa). Habitualmente, a mistura final é feita por meio de dosagem e depende da plasticidade de cada argila e do grau de plasticidade pretendido para a mistura. Uma das vantagens da utilização de, pelo menos, duas argilas de diferentes plasticidades, é o fácil ajuste da plasticidade às condições de processamento, especificamente a extrusão.

Conforme o autor referido anteriormente, comparando o comportamento dos argilominerais em função da plasticidade, percebe-se que a montmorilonita requer mais água para se trabalhar do que a caolinita, uma vez que, além do filme de água que envolve os cristais, existe também, a água que ocupa os espaços entre as camadas estruturais da montmorilonita. Por outro lado, os cristais de montmorilonita têm tamanhos e espessura médias inferiores aos de caolinita, apresentando por isso, maior superfície específica.

De acordo com Ribeiro et al. (2003), entre os métodos para medir a plasticidade das argilas, destacam-se: os limites de Atterberg, o índice de plasticidade de Pfefferkorn e as curvas tensão/deformação. Os procedimentos de ensaios para determinação dos limites de Atterberg, representados pelos Limites de Plasticidade (LP) e de Liquidez (LL) são normatizados pela ABNT NBR 7180:1984 e ABNT NBR 6459:1984, respectivamente.

Conforme Caputo (1988), os solos podem ser classificados em função do índice de plasticidade, em: a) fracamente plástico: $1 < IP < 7$; b) medianamente plástico: $7 < IP < 15$; e; c) altamente plástico: $IP > 15$.

Fiori (2001) também classifica os solos baseado no índice de plasticidade, da seguinte forma: a) não plástico: $IP < 1$; b) levemente plástico: $1 < IP < 7$; c) moderadamente plástico: $7 < IP < 17$; d) altamente plástico: $17 < IP < 35$; e; e) extremamente plástico: $IP > 35$.

Conforme Souza Santos (1975), a quantidade de água necessária para tornar uma argila suficientemente plástica, para ser moldada por um determinado método é denominada água de plasticidade ou água de moldagem. Para este autor, qualquer que seja o tipo de moldagem (plástica, semi-plástica, semi-seca, manual, colagem) quanto mais plástica é uma argila maior é a água de moldagem e também o limite de plasticidade, isto é, mais água é necessária para formar uma massa plástica. A água de moldagem para a extrusão é igual ou superior ao limite de plasticidade da mesma argila, porém é inferior ao limite de liquidez.

Write (1965) apud Souza Santos (1975) fez um estudo detalhado do limite de plasticidade das argilas. A faixa de variação da água de moldagem dos grupos de argilominerais é a seguinte: a) caulinita – entre 8,9 e 56,3 %; b) ilita – entre 17 e 38,5 %; c) montimorilonita – entre 82,9 e 250 %.

3.2.3.3 – Retração linear de secagem e de queima

A retração é a tendência que a argila tem em diminuir de volume pela perda de umidade por secagem e queima. Conforme Pianca (1977), é importante conhecer o grau de retração da argila, a fim de dar aos blocos cerâmicos crus dimensões que depois de queimados alcancem as medidas requeridas.

Conforme Norton (1973), a maioria das massas cerâmicas retraem-se, uma vez que os poros se fecham por causa da solicitação da tensão superficial, aproximando os grãos entre si. Essa propriedade pode ser medida, determinado-se a mudança de comprimento ou volume quando uma amostra é seca ou após sua queima.

Para o autor mencionado anteriormente, tal propriedade é de grande importância no processamento de grandes peças, pois uma grande retração necessita de secagem muito lenta para evitar trincas e se obter as dimensões desejadas. Esse autor afirma que, geralmente, as argilas plásticas de granulometria fina têm retração mais elevada.

De acordo com Grim (1962) apud Tomazetti (2003), o aumento desta propriedade está relacionado com o aumento da água de plasticidade e, em alguns argilominerais, com a diminuição do tamanho das partículas. Argilominerais alongados e fibrosos tendem a ter grande retração de secagem, em função da perda de empacotamento de suas partículas.

Segundo Tomazetti (2003), quando ocorre a queima do bloco cerâmico há nova redução de volume, relacionada à perda da água de constituição, e à redução ou eliminação dos poros. Esta segunda retração é denominada retração de queima e Cardoso (1995) afirma que ela é consequência das reações físicas e químicas das argilas quando submetidas à ação do calor.

Para Grim (1962) apud Tomazetti (2003), a retração de queima varia com a distribuição do tamanho dos grãos, tendendo a aumentar com a quantidade de material com partículas de pequeno tamanho. Alguns constituintes dos argilominerais têm influência na retração de queima, tais como o quartzo, que em proporção considerável reduz o volume do produto cerâmico.

Segundo Petrucci (1998), apesar de grande percentagem de areia com silte ser indesejável, esta deve ser, às vezes, adicionada à massa cerâmica, para diminuir a retração na queima e aumentar a refratariedade.

3.2.3.4 – Porosidade

Segundo Norton (1973), a porosidade de um corpo cerâmico é muito importante, pois serve como uma excelente medida de grau de sinterização em função da temperatura de queima. Esta propriedade mede o grau de vitrificação obtido na temperatura que o bloco cerâmico foi queimado, visto que, para uma mesma massa cerâmica, à medida que aumenta-se a temperatura de queima, diminuem-se os vazios entre os grãos, melhorando significativamente a resistência mecânica e outras características como o índice de absorção de água.

A porosidade influi de modo direto na durabilidade de blocos cerâmicos, e depende das características da matéria-prima e das transformações estruturais e químicas do material. (Ioshimoto; Thomaz, 1990).

3.3 – FABRICAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS

Conforme a norma ABNT NBR 15270-1:2005, os blocos cerâmicos devem ser fabricados por conformação plástica de matéria-prima argilosa, contendo ou não aditivos, e queimados a elevadas temperaturas.

Segundo Van Vlack (1984), no processo de queima de blocos cerâmicos, parte das partículas são aglomeradas até o formato desejado, com aquecimento que visa produzir uma ligação entre as mesmas.

A produção do bloco cerâmico consiste em várias fases, desde a escolha da argila e a sua extração, até a obtenção do produto final. Estas fases são: preparação da matéria-prima, moldagem da massa cerâmica e tratamento térmico.

O fluxograma do processamento típico de blocos cerâmicos está esquematizado na Figura 3.1, a seguir.

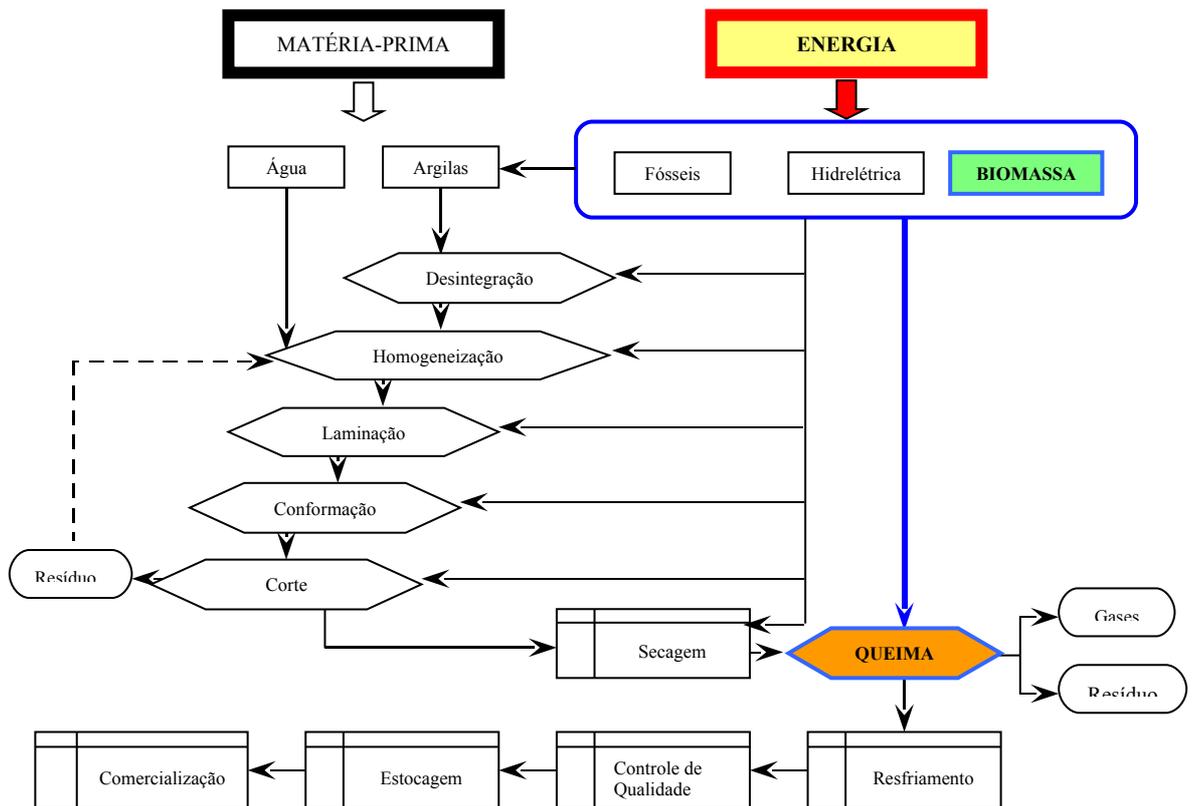


Figura 3.1 – Fluxograma do processo típico de produção de blocos cerâmicos, com foco na energia consumida na fase de queima (concepção do autor deste trabalho)

A seguir serão detalhados os diversos estágios do processo de fabricação dos blocos cerâmicos.

3.3.1 – Extração de argilas

Grande parte das matérias-primas utilizadas na produção de blocos cerâmicos é natural, encontrando-se em depósitos espalhados na crosta terrestre. Em geral, a extração das argilas é realizada a céu aberto, antecedida de estudos das características do material que se vai explorar. Os meios auxiliares de que se dispõem para extração e transporte das argilas até o local de estocagem vão desde equipamentos rudimentares até equipamentos mecanizados de grande porte.

A Figura 3.2 apresenta uma vista da extração de argila para a produção de blocos cerâmicos.



Figura 3.2 – Extração de argila para produção de blocos cerâmicos em uma jazida no município de Rio Verde/GO

3.3.2 – Tratamento das argilas

O tratamento da argila compreende os processos de depuração, divisão, homogeneização, obtenção da umidade adequada e laminação da massa cerâmica.

Segundo a literatura, entre eles: Petrucci (1998), Cardoso (1995), Santos; Silva (1995), Zandonadi; Ioshimoto (1991) e Verçoza (1987), a primeira etapa do tratamento é denominada sazonalidade. Consiste em submeter a argila recém-extraída à ação dos agentes atmosféricos, em período que normalmente varia de seis meses a dois anos, quando são eliminadas as impurezas prejudiciais ao material. As argilas são depositadas em camadas, nas quais sua espessura e alternância dependem dos tipos utilizados e das propriedades desejadas da mistura final. A exposição às intempéries provoca a lavagem dos sais solúveis, a fermentação e a oxidação da matéria orgânica, prática que melhora a plasticidade das argilas, facilitando a moldagem por extrusão. Além disso, evita a expansão das peças logo após a moldagem, com ocorrência de deformações, trincas e rupturas dos produtos na fase de secagem, e o desenvolvimento de gases durante a queima.

A Figura 3.3 apresenta o sazonalidade de argila para a produção de blocos cerâmicos.



Figura 3.3 – Sazonamento de argila para a produção de blocos cerâmicos em uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO

Após o sazónamento, a matéria-prima é transportada para o caixão alimentador, onde, se necessário, é feita a dosagem que deve seguir com rigor as proporções previamente estabelecidas. A mistura dosada é conduzida ao desintegrador, onde os grandes blocos de argilas são desintegrados. Em seguida, o material é transportado para o misturador, onde se processa a homogeneização e o ajuste final adicionando água, quando necessário. E por fim, a mistura é transferida para o laminador que tem a função de executar uma pré-laminação e completar a homogeneização.

A Figura 3.4 apresenta as operações de homogeneização e laminação de material argiloso.



(a)



(b)

Figura 3.4 – Preparo da argila para fabricação de blocos cerâmicos em uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO. a) homogeneização; b) laminação.

3.3.3 – Conformação e corte do bloco

A técnica de conformação de blocos por extrusão é a mais utilizada nas indústrias cerâmicas. A massa cerâmica é moldada na forma de uma pasta plástica, porém rígida, em

uma prensa denominada extrusora (ou maromba), composta de uma rosca-sem-fim que comprime a mistura ao passar por uma chapa de aço perfurada. Em seguida, o material é picado, caindo na câmara de vácuo, onde é processada a desaeração. Logo abaixo dessa câmara, outra rosca-sem-fim força a massa através do molde (ou boquilha), que imprime o formato predefinido formando uma coluna contínua, que é cortada no comprimento desejado.

A Figura 3.5 apresenta uma vista dos equipamentos utilizados na fase de moldagem e corte de blocos cerâmicos.



Figura 3.5 – Produção de blocos cerâmicos em uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO. a) boquilha de moldagem; b) mesa de corte.

3.3.4 – Processamento térmico (secagem e queima) do bloco

O processamento térmico é de fundamental importância na fabricação de blocos cerâmicos, pois dele dependem o desenvolvimento das suas propriedades finais. Este tratamento compreende as fases de secagem e queima.

3.3.4.3 – Secagem

Segundo Vieira et al. (2003), a secagem do bloco é uma fase delicada e complexa, pois nela deve-se eliminar a água necessária para a obtenção de uma massa plástica. Roman (1983) garante que, quando seco, o bloco está em condições de resistir as altas temperaturas que ocorrem na queima, sem ocorrer danos.

Cardoso (1995) adverte que a secagem natural é essencial, porque se o bloco for levado ainda úmido à estufa de secagem (secagem artificial) ou ao forno (fase de queima), a água contida no seu interior ficará retida pela retração da camada externa, e conseqüentemente, provocará tensões diferenciais internas, causando defeitos e até prejuízo com a perda do produto.

Segundo o autor referido anteriormente, durante o processo de secagem ocorrem dois fenômenos que devem realizar-se simultaneamente e com a mesma velocidade: a evaporação da umidade na superfície do bloco, seguida de uma difusão de umidade das zonas internas de maior concentração de teor de umidade para as camadas externas de menor concentração.

De acordo com Van Vlack (1970), após a secagem da água de moldagem, há um aumento na resistência mecânica do bloco. O filme superficial lubrificante é removido e as forças de Van der Waals entre os grãos se tornam mais efetivas. Dessa forma, o bloco adquire resistência suficiente para os fins a que se destina.

A Figura 3.6 apresenta dois métodos de secagem empregados na produção de blocos cerâmicos.



Figura 3.6 – Métodos de secagem de blocos cerâmicos em uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO. a) secagem natural e b) secagem artificial.

Os blocos cerâmicos sofrem retração de 4 a 15% durante a secagem e queima, dependendo do tipo de argila (Roman, 1983).

3.3.4.4 – Queima (ou cozimento) de blocos cerâmicos

Segundo vários autores, inclusive Bauer (2000), Pianca (1977), Souza Santos (1975) e Norton (1973), a fase de queima constitui a operação mais importante na fabricação de blocos cerâmicos.

Conforme Santos (2001), Petrucci (1998) e Bauer (2000), esta fase é complexa, onde ocorrem reações químicas importantes, proporcionando aos blocos características finais, tais como resistência mecânica e cor, dentre outras. Os principais aspectos que influenciam a queima são: a temperatura, o tempo de queima, a velocidade de aquecimento e de resfriamento, a atmosfera ambiente¹⁴, o tipo de forno e o combustível utilizado, entre outros.

Para Santos (2001) e Petrucci (1998), não existem tempo e curva de temperatura de queima¹⁵ típicos para todas as argilas, uma vez que estes variam de acordo com o tipo de forno, tipo de argila, eficiência do processo de queima, distribuição do calor na câmara de queima, condições ambientais e geometria dos blocos a serem queimados. A combinação do tempo total de queima com a temperatura, além de ser importante na qualidade do bloco, tem influência significativa no consumo de combustível utilizado durante a queima. Se a queima for lenta, os defeitos em grande parte são eliminados, porém haverá gasto excessivo de combustível. A queima rápida é economicamente interessante, entretanto, pode comprometer a qualidade do produto. Por outro lado, baixas temperaturas ou curto período de queima, contribuem no surgimento de blocos crus, principalmente em alguns pontos mais frios da câmara de queima.

De acordo com Cardoso (1995), normalmente quando a queima é rápida, os poros superficiais se fecham e não permitem o escape dos gases, tornando o bloco mais poroso no seu interior.

Segundo Van Vlack (1984), o princípio da sinterização consiste na redução dos poros entre as partículas e uma simultânea contração do bloco, combinada com o aumento da união e

¹⁴ Atmosfera ambiente = ar de referência;

¹⁵ Curva de queima = relação entre a temperatura do forno e o tempo de aquecimento.

da resistência de ligações químicas entre partículas adjacentes quando aquecidas em altas temperaturas.

A sinterização é o ponto de integração máxima dos minerais da argila durante a queima. Ultrapassando este estágio os blocos cerâmicos entram em desintegração e se fundem, derretendo e se tornando uma pasta.

Quanto aos fornos utilizados na queima de blocos, os mesmos podem ser classificados em periódicos (ou intermitentes) e contínuos.

De acordo com Medeiros (2006), os principais equipamentos térmicos usados na região em estudo, para queima de blocos cerâmicos, são o forno periódico de chama invertida e o forno contínuo tipo-túnel, apresentados a seguir.

- Forno periódico (ou intermitente)

Segundo Norton (1973) e Cardoso (1995), o forno periódico é um equipamento com carga e câmara de combustão imóveis, no qual o processo de queima consiste em carregar o forno, queimar até a temperatura desejada, resfriar, e então, retirar os blocos para armazenamento e distribuição. Esse é o tipo de forno cerâmico mais antigo e difundido.

De acordo com Norton (1973), os primeiros fornos periódicos tinham a fornalha abaixo da sua base, de forma que os gases de combustão passavam através do empilhamento dos blocos de forma direta. Esses fornos eram denominados fornos de chama direta e apresentam, como principal desvantagem, a temperatura não uniforme. Os fornos de chama invertida, frequentemente utilizados nos dias atuais, possuem vantagens em relação aos de chama direta, já que os gases de combustão circulam na câmara de queima, através do empilhamento dos blocos, sendo conduzidos por dutos até a chaminé.

Conforme Santos (2001), os tipos de fornos mencionados anteriormente são os mais antigos e mais utilizados por indústrias cerâmicas de pequeno e médio porte. Na Europa e em outros países, o emprego destes fornos é raro, limitando-se exclusivamente a empresas, que por tradição ou necessidade do mercado o utilizam. Entretanto, apesar de seus inconvenientes, os fornos periódicos ainda são muito usados no Brasil e os mais

empregados pelas indústrias cerâmicas são: forno de campanha, forno de chama invertida, forno paulista e forno de plataforma.

De acordo com Santos (2001), Bauer (2000) e Cardoso (1995), das principais vantagens dos fornos periódicos, comparados aos contínuos, destacam-se: a) espaços menores de instalação, b) concepção simples e execução fácil e rápida, c) menor custo de instalação, d) maior flexibilidade da produção, podendo adaptar-se com facilidade à flexibilidade do mercado consumidor e queimar peças distintas e com diferentes parâmetros de queima e, e) manutenção sem parada da produção.

Conforme Oliveira (2002), Santos (2001), Bauer (2000) e Santos e Silva (1995), entre as principais desvantagens dos fornos periódicos, comparados aos contínuos, incluem-se: a) elevado consumo de combustível ou baixo rendimento térmico, em virtude da grande quantidade de calor necessária, a cada ciclo de queima, para aquecer a estrutura do forno, e a perda de calor pelas paredes, abóbada e gases de exaustão da chaminé, b) baixa produtividade, c) distribuição não uniforme de temperatura, d) maior consumo de mão-de-obra, e) maior dificuldade de automação da produção, f) maior desgaste da estrutura, em virtude das variações sucessivas de calor e frio e, g) excesso de manuseio nos blocos cerâmicos.

Segundo Souza (1991) o custo da etapa de queima para as indústrias que utilizam fornos periódicos, é cerca de 40 a 50% de seu custo final de produção.

A Figura 3.7, a seguir, ilustra um forno periódico de chama invertida.

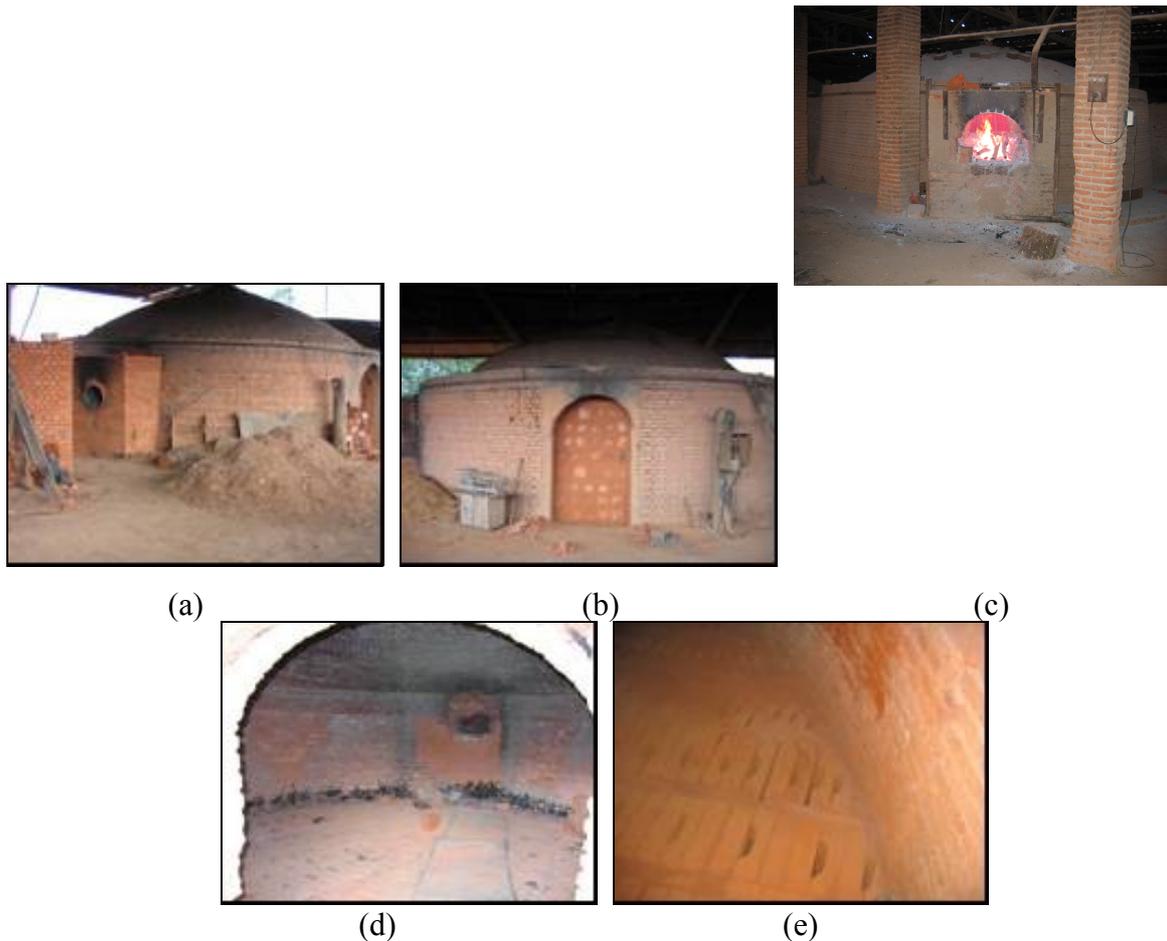


Figura 3.7 – Forno periódico de chama invertida de uma indústria cerâmica de Novo Gama/GO. a) detalhe da abóbada; b) detalhe da porta; c) detalhe da fornalha; d) vista interna e e) detalhe do piso.

- Fornos contínuos

Os fornos contínuos são equipamentos térmicos em que o ciclo de queima é realizado sem interrupção, isto é, enquanto a queima dos blocos cerâmicos de uma vagoneta (carro transportador) chega ao final, outra está sendo iniciada, sem descontinuidade.

Conforme Santos (2001), os tipos de fornos contínuos utilizados na indústria de cerâmica vermelha são: forno hoffman de galeria longitudinal, forno hoffman de galeria transversal, forno túnel convencional; forno túnel de queima rápida e forno a rolos.

Forno contínuo hoffman – Segundo Santos (2001), o forno hoffman, nome de seu inventor, foi criado em 1858, e pode ser considerado como um equipamento térmico, constituído de galerias (longitudinais ou transversais), que contornam um canal interno o qual conduz o ar de combustão até a chaminé.

A Figura 3.8, a seguir, apresenta uma vistas de um forno contínuo do tipo hoffman de galeria longitudinal.

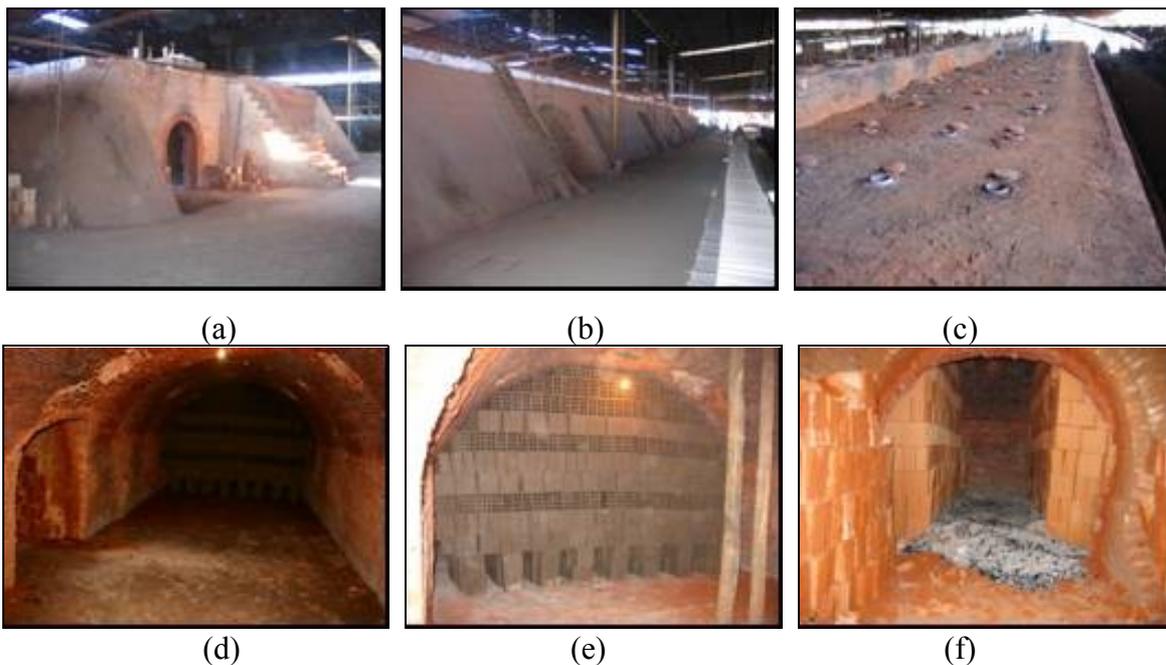


Figura 3.8 – Forno hoffman de galeria longitudinal de uma indústria de cerâmica vermelha do DF. a) vista externa frontal; b) vista externa lateral; c) vista externa superior; d) vista interna: galeria; e) vista interna: cela de queima e f) vista interna: câmara de combustão.

Segundo vários autores, inclusive Bauer (2000), Petrucci (1998), Pianca (1977) e Norton (1973), o ciclo de queima no forno hoffman consiste, essencialmente, em carregar os locais denominados celas de queima, quando, em outra região anterior do forno, está ocorrendo a queima do bloco. O bloco é colocado na galeria do forno, deixando-se espaços vazios sob os orifícios (ou agulheiros) das câmaras de combustão. Graças à elevada temperatura de queima, os gases da combustão, conduzidos para a chaminé, atravessam outras celas, antes de chegarem no condutor permanente de gás e, em seguida, à chaminé. Concluída a queima de uma cela, prossegue a da cela adjacente e assim, sucessivamente, até que toda a carga do forno seja queimada. Após a queima dos blocos cerâmicos de uma cela é realizado o resfriamento da estrutura do forno e do bloco cerâmico. O ar, sempre admitido pelas portas e agulheiros das câmaras de combustão já queimadas, chega às celas a serem queimadas, preaquecido, tornando mais econômica a combustão. Quando em condições de manuseio, é realizada a descarga dos blocos já queimados.

Forno contínuo tipo túnel – De acordo com Tomazetti (2003), Santos (2001) e Norton (1973), o forno tipo túnel, inventado em 1877, é o equipamento térmico mais utilizado pelas grandes indústrias de cerâmica vermelha por apresentar maior capacidade produtiva e melhor rendimento energético. Como o próprio nome indica, é constituído por um túnel, subdividido em três zonas, a saber: zona de preaquecimento, zona de queima e

zona de resfriamento, havendo o aproveitamento de calor de uma zona para outra. Os blocos são colocados sobre vagonetas, que se move sobre trilhos, ao longo do comprimento do túnel, empurrada por meio de um sistema hidráulico automático.

Normalmente, dois quintos do comprimento total deste tipo de forno são reservados à zona de preaquecimento, um quinto à zona de queima e outros dois quintos à zona de resfriamento. Podem ser construídos de alvenaria convencional ou pré-fabricada (Santos, 2001).

Segundo o autor referido anteriormente, o forno túnel surgiu na indústria de cerâmica branca. Porém, graças às suas vantagens, passou a ser empregado com sucesso também na indústria de cerâmica vermelha. Apresenta grande variedade de características construtivas, tais como tipo de isolamento térmico das paredes, possibilidade de controle automático do processo de queima, entre outras. Tais características dependem da necessidade produtiva e da disponibilidade econômica de cada empresa.

De acordo com Santos (2001), as vagonetas utilizadas neste tipo de forno são bastante solicitadas aos esforços mecânico e térmico e apresentam estruturas resistentes ao calor, como por exemplo refratárias ou de fibras cerâmicas, com a finalidade de reduzir perdas térmicas, desgaste e conseqüente manutenção das mesmas.

De acordo com Tomazetti (2003) e Santos (2001), as principais vantagens dos fornos contínuos, comparado aos periódicos, são: a) maior produtividade, b) menor consumo de combustível, c) possível controle e aproveitamento dos gases de exaustão, d) uniformidade da cozedura, e) grande economia em mão-de-obra, f) menor manuseio do produto cerâmico e, g) maior facilidade de automação da produção.

Conforme Norton (1973), o forno contínuo tipo túnel tem duas vantagens importantes comparado ao periódico e até mesmo ao forno hoffman, a saber: a) a estrutura do forno a qualquer ponto permanece na mesma temperatura por um longo tempo; protegendo-o das deformações provenientes de variação periódica de temperatura, b) as peças são empilhadas sobre as vagonetas e podem ser carregadas e descarregadas fora do forno.

Segundo Santos (2001), entre as principais desvantagens dos fornos contínuos, comparados aos periódicos, destacam-se: a) concepção mais complexa, b) construção mais demorada e de elevado custo de instalação, c) parada na produção para manutenção, d) menor flexibilidade de produção e, e) necessidade de que seja sempre o mesmo tipo de material a cozer.

O forno contínuo tipo túnel é mostrado na Figura 3.9.

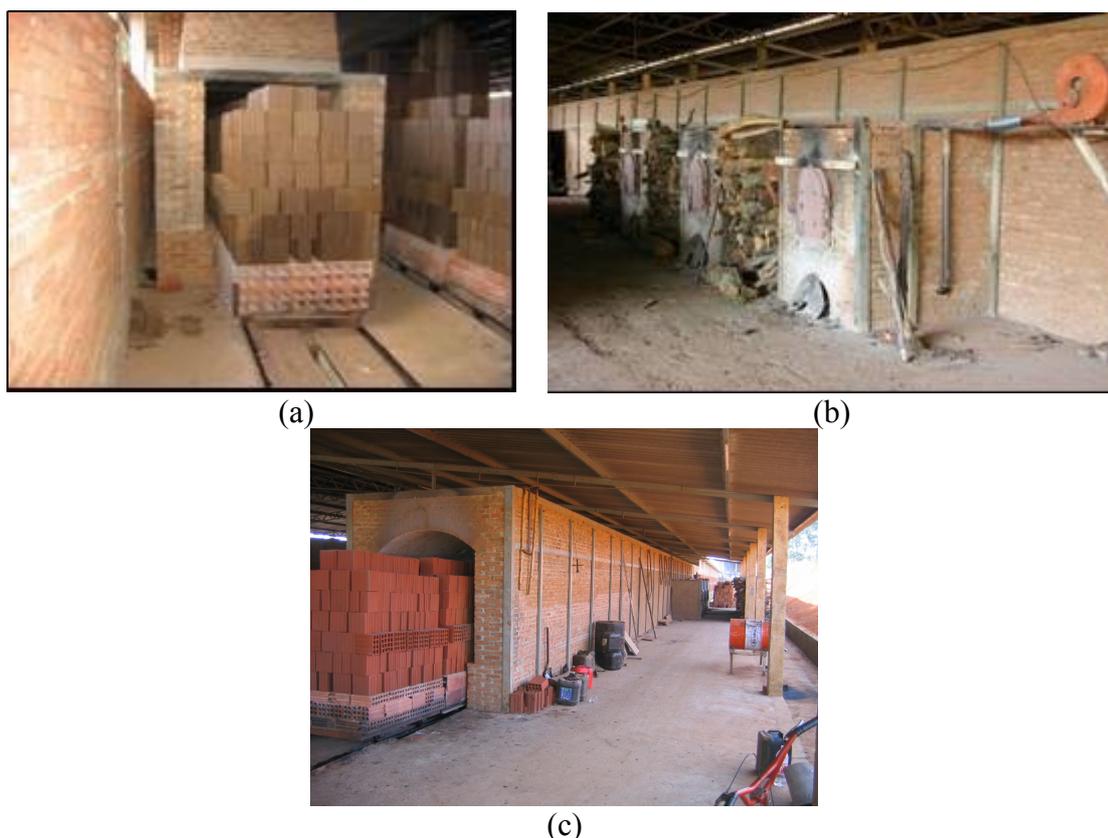


Figura 3.9 – Forno contínuo tipo túnel de uma cerâmica de Campo Limpo/GO. a) entrada da zona de preaquecimento; b) vista externa da zona de queima; e c) saída da zona de resfriamento.

Os combustíveis utilizados nos fornos das indústrias de cerâmica vermelha constituem a fonte de energia térmica empregada para aquecer os blocos, evaporar a umidade dos blocos e produzir o calor necessário para a decomposição e cristalização dos constituintes das argilas.

Os combustíveis utilizados nos fornos contínuos são: a lenha, o óleo combustível e o gás natural.

3.3.5 – Resfriamento dos blocos cerâmicos

Após a queima, os blocos cerâmicos devem ser resfriados lentamente no interior do forno, durante horas, sob o risco de surgirem defeitos, tais como fissuras, em função do choque térmico, quando do contato com o ar exterior, mais frio. O tempo de resfriamento depende, entre outros fatores, do tipo de produto queimado.

Conforme Santos (2001), é importante controlar a velocidade de resfriamento ou seja, como a temperatura diminui ao longo do resfriamento. Isso é necessário, em virtude das variações dimensionais que ocorrem durante esta fase (contração). Se o tempo recomendado não for cumprido, poderão ocorrer danos, tais como: deformações, fissuras ou quebras.

3.4 – REQUISITOS E DESEMPENHO DE BLOCOS CERÂMICOS

De acordo com Pianca (1977), os principais requisitos exigidos para os blocos cerâmicos são:

- Regularidade da forma e igualdade nas dimensões;
- Arestas com vértices bem delineados e faces com superfícies ásperas;
- Som cheio e claro, quando percutido com o martelo;
- Homogeneidade e ausência de defeitos;
- Fratura de grão fino e compacto, de cor uniforme, sem manchas que denunciem a presença de calcário na argila;
- Facilidade de corte;
- Resistência suficiente para suportar os esforços de compressão e
- Absorção de água compatível a sua função.

Segundo Ribeiro et al.(2003), Weber et al. (2001), Ribeiro et al. (1996), Fonseca et al. (1994), Pracidelli (1989), Vargas (1977), Pianca (1977) e Souza Santos (1975), alguns defeitos mais comuns nos blocos cerâmicos são: denteamento, rebarba, desvio em relação ao esquadro, empenamento, deformações (fissura, cavidade, fenda, entalhe, trinca etc.), subcozimento ou supercozimento, coração negro, laminações nas paredes externas e nos septos, e com arestas arredondas.

A ABNT NBR 15270:2005 estabelece os requisitos para caracterização geométrica, física e mecânica dos blocos cerâmicos.

As características geométricas do bloco cerâmico são as seguintes: medidas das faces (largura (L), altura (H) e comprimento (C)), espessura das paredes externas e dos septos, desvio em relação ao esquadro (D) e planeza das faces (F). Para as características geométricas é exigido controle nas dimensões referentes a L, H e C.

Conforme a ABNT NBR 15270:2005, a tolerância dimensional individual relacionadas à dimensão efetiva do bloco cerâmico é de ± 5 mm e a tolerância dimensional relacionada à média é de ± 3 mm. A espessura mínima das paredes externas é de 7 mm e a espessura mínima das paredes dos septos é de 6 mm. Quanto ao desvio em relação ao esquadro, e a planeza das faces o valor máximo deve ser de 3 mm.

As propriedades físicas dos blocos cerâmicos são: massa seca (m_s), índice de absorção d'água (AA) e o índice de absorção inicial (AAI).

Conforme a ABNT NBR 15270:2005, o índice de absorção d'água não deve ser inferior a 8%, nem superior a 22% e o índice de absorção inicial do bloco cerâmico deve ser inferior a 30 g/193,55 cm²/min.

De acordo com a mesma norma, a propriedade mecânica dos blocos cerâmicos é a resistência à compressão individual. De acordo com a norma referida anteriormente, o limite mínimo da resistência à compressão de cada bloco de vedação, usados com furos na horizontal, deve ser igual a 1,5 MPa.

Além das inspeções geral e por ensaios apresentadas, também é importante analisar nos blocos cerâmicos a retração linear de secagem e após a queima e o seu índice de porosidade, cujos procedimentos de ensaio são apresentados na Seção 4.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

As diversas etapas que contemplam o escopo do trabalho experimental são:

- Levantamento da existência de briquetes ligno-celulósicos comerciais e de suas matérias-primas, que podem servir como combustível na queima de bloco cerâmico na região em estudo; seleção de um briquete comercial e de uma indústria de blocos;
- Caracterização do briquete ligno-celulósico comercial, de suas matérias-primas e da lenha de eucalipto, nas indústrias selecionadas como estudo de caso (fabricante do briquetes e fabricante de blocos);
- Comportamento do forno cerâmico, ao longo da fase de queima dos blocos, incluindo: curvas de temperatura, tempo de combustão e consumos de energia e de mão-de-obra e;
- Análise da viabilidade energético-econômica da fase de queima dos blocos, a partir do briquete ligno-celulósico.

A metodologia deste trabalho é representada por três fluxogramas, conforme apresentado nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, a seguir.

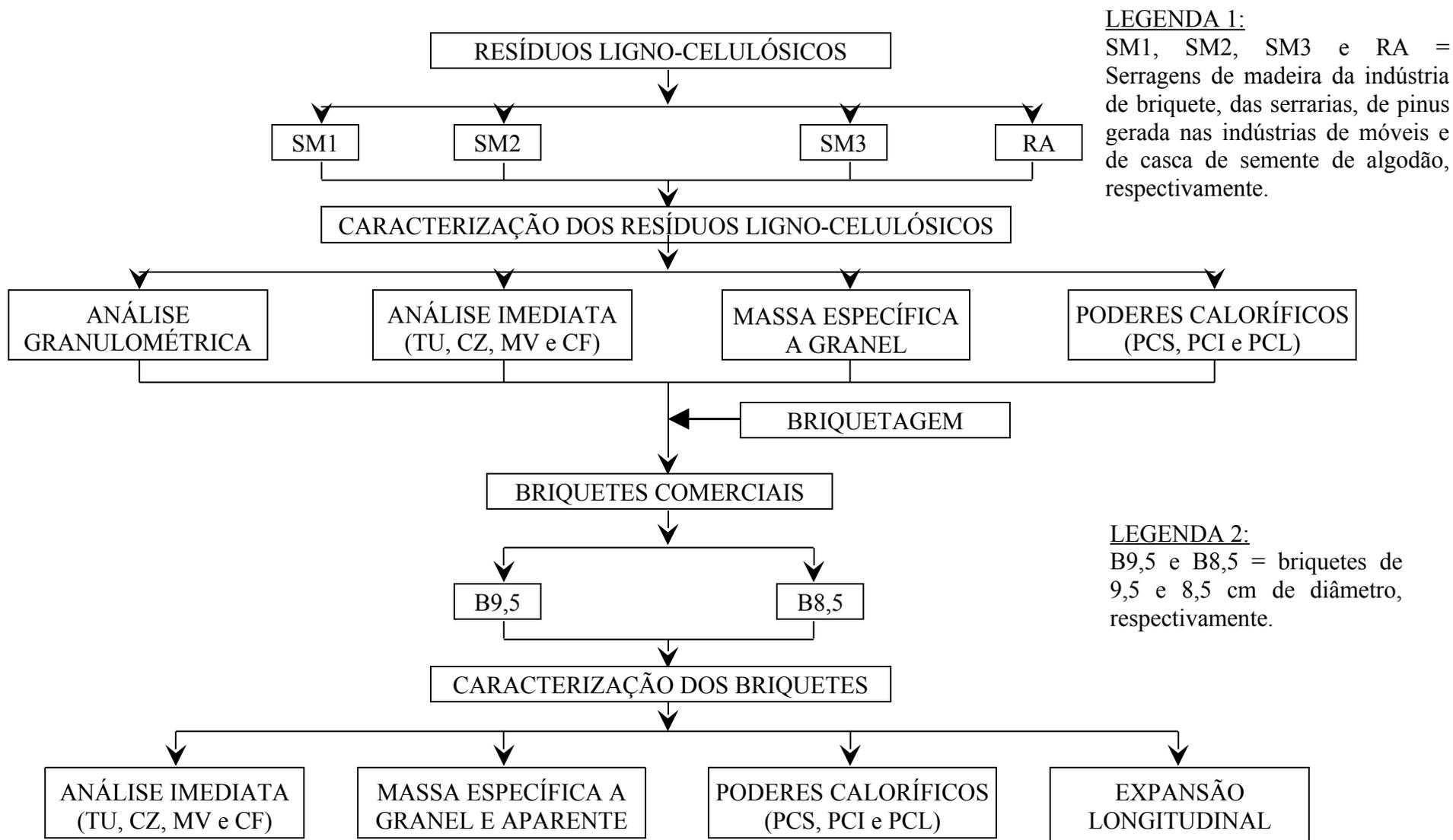


Figura 4.1: Fase 1 do Programa Experimental – Levantamento e caracterização dos briquetes e de suas matérias-primas no DF e GO

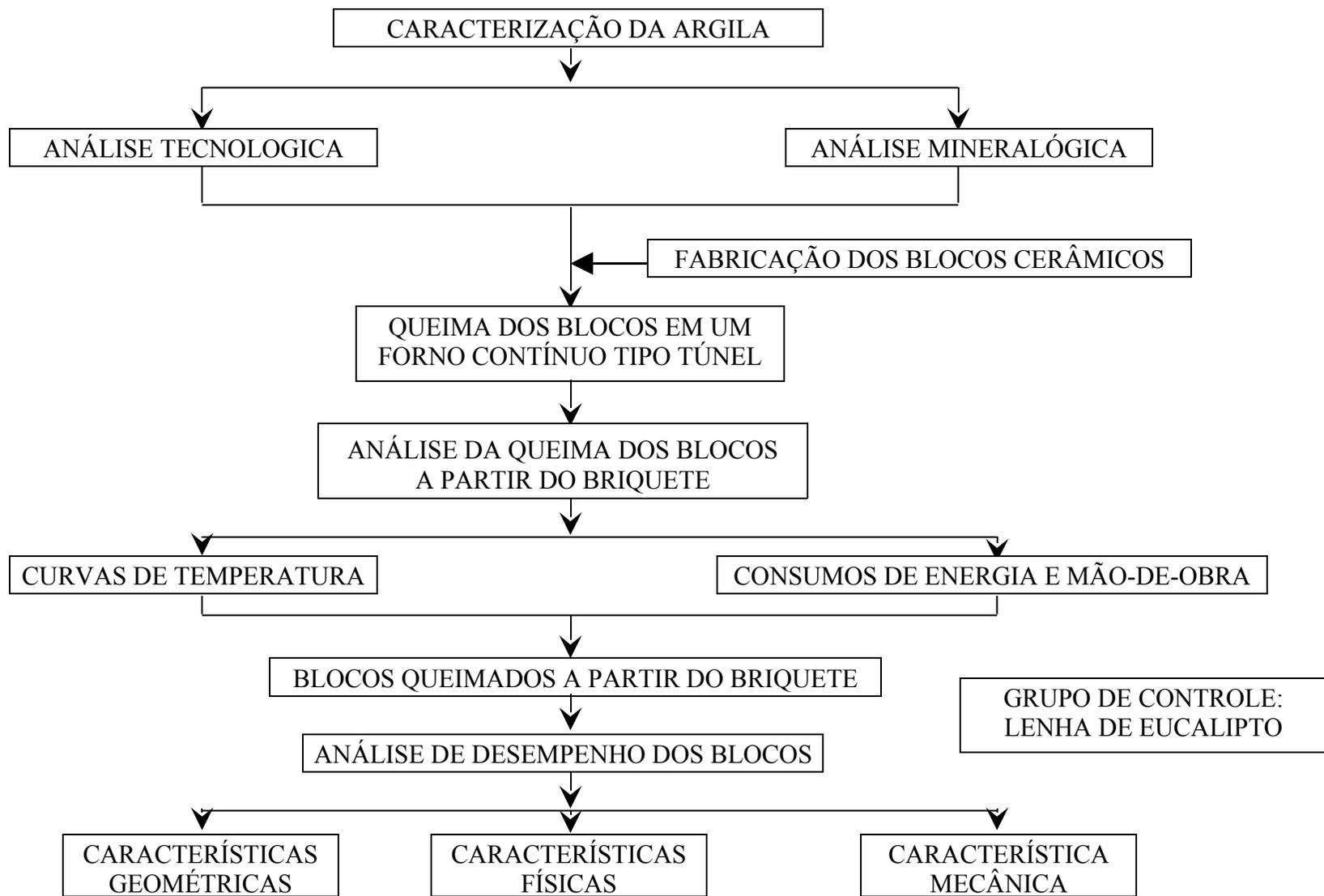


Figura 4.2: Fase 2 do Programa Experimental – Análise da aplicação do briquete na queima dos blocos cerâmicos.

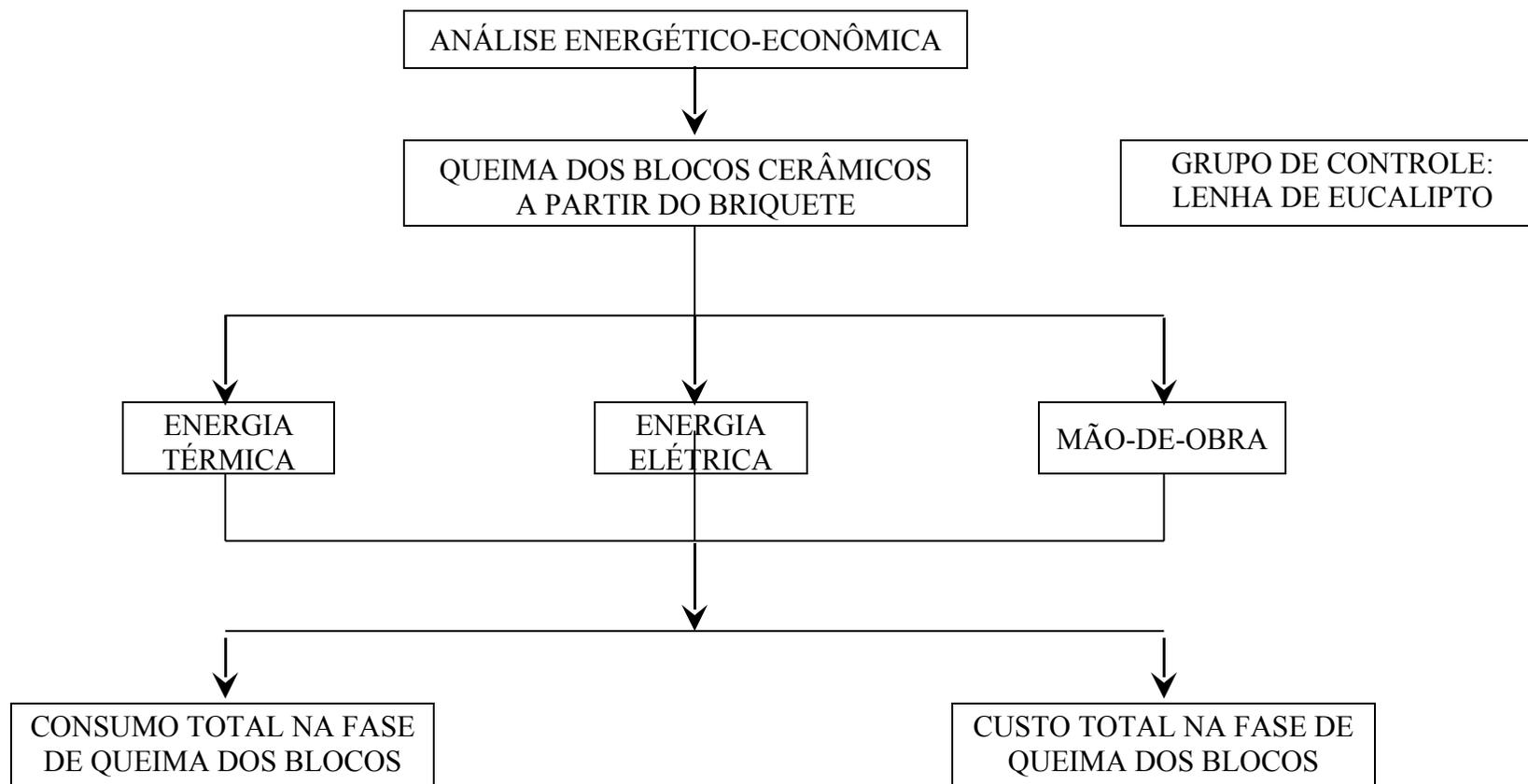


Figura 4.3: Fase 3 do Programa Experimental – Análise energético-econômica da queima dos blocos cerâmicos a partir do briquete.

No planejamento deste trabalho foi necessário efetuar um estudo-piloto, com o intuito de melhorar o entendimento sobre a aplicação do uso do briquete na fase de queima dos blocos, bem como da análise dos combustíveis na indústria de cerâmica vermelha.

4.1 – ESTUDO-PILOTO: ESTIMATIVA DO CONSUMO DE BRIQUETE E DE LENHA DE EUCALIPTO PARA QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS

Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento da segunda fase do programa experimental, que consiste na investigação do processo de queima dos blocos cerâmicos no forno contínuo selecionado. Nesta etapa foi realizada uma estimativa do consumo de briquete e de lenha utilizados na queima do bloco.

4.1.1 – Consumo de briquete para a queima dos blocos cerâmicos

O processo de queima dos blocos não deve ser interrompido, para não haver perda de energia, neste sentido procedeu-se a um monitoramento na indústria de cerâmica vermelha, para determinar o consumo de briquetes e de lenha de eucalipto necessário para a fase de queima dos blocos.

4.2 – DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO ESTUDO

Para este estudo, estabeleceram-se algumas variáveis do processo de queima dos blocos, consideradas essenciais ao desenvolvimento deste trabalho, conforme apresentado a seguir.

4.2.1 – Variáveis independentes

- Briquetes comerciais produzidos na região em estudo;
- Bloco cerâmico de vedação;
- Forno cerâmico utilizado na indústria de cerâmica vermelha estudo-de-caso;
- Zona de queima do forno a ser analisada;
- Tempo de queima de uma carga completa da zona de queima do forno analisado;
- Custos energéticos na fase de queima dos blocos e;
- Custo da mão-de-obra empregada na fase de queima dos blocos.

4.2.2 – Variáveis dependentes

Características dos resíduos ligno-celulósicos (matérias-primas) dos briquetes:

- Análise granulométrica;
- Análise imediata (TU, CZ, MV e CF);
- Massa específica a granel e;
- Poder calorífico (PCS, PCI e PCL).

Características dos briquetes analisados:

- Análise imediata (TU, CZ, MV e CF);
- Massa específica a granel;
- Massa específica aparente;
- Poder calorífico (PCS, PCI e PCL) e;
- Expansão longitudinal.

Curvas de temperaturas da fase de queima dos blocos;

Consumo da energia (térmico-elétrica) na fase de queima dos blocos;

Consumo de mão-de-obra na fase de queima dos blocos;

Desempenho dos blocos queimados a partir de briquetes e de lenha de eucalipto:

- Argila utilizada nos blocos queimados com briquete e lenha de eucalipto

Características das argilas consumidas na fabricação dos blocos: ensaios tecnológicos (análise granulométrica e índices de consistência) e análise mineralógica (difração de raios-X);

- Blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto

Características geométricas: medidas e planeza das faces, espessuras das paredes externas e dos septos e desvio em relação ao esquadro;

Características físicas: água de moldagem, retração linear de secagem e de queima, índice de absorção de água, absorção de água inicial e porosidade;

Característica mecânica: resistência à compressão.

Custo da energia (térmico-elétrica) da fase de queima dos blocos e;

Custo da mão-de-obra da fase de queima dos blocos.

A seguir são descritas as três fases da metodologia da pesquisa, conforme apresentado no fluxograma da Figura 4.1.

4.3 – FASE 1: LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO BRIQUETE LIGNO-CELULÓSICO COMERCIAL, DE SUAS MATÉRIAS-PRIMAS E DA LENHA DE EUCALIPTO NO DF E GO.

A atividade inicial deste trabalho consistiu na busca de informações, tais como: localizações das usinas de briquetagem no DF e GO, tipos de briquetes produzidos, quantidades e destino final. O objetivo desta etapa da pesquisa foi a obtenção de dados referentes aos briquetes ligno-celulósicos produzidos no universo em estudo, com potencial para servir de combustíveis na fase de queima de blocos cerâmicos.

Na região de estudo existe apenas uma indústria de briquetes, situada no Estado de Goiás. Normalmente, esta indústria produz briquetes de serragem de madeira em conjunto com casca de semente de algodão ou bagaço de cana-de-açúcar, dependendo da sazonalidade das culturas agrícolas locais.

Neste trabalho foram utilizados briquetes produzidos por esta indústria, com diâmetros de 8,5 cm e de 9,5 cm, denominados respectivamente por B8,5 e B9,5. As matérias primas destes briquetes foram designadas por SM1, SM2, SM3 e RA, referentes à serragem de madeira produzida na indústria de briquetes, serragem de madeira das serrarias e indústrias de móveis, serragem de *pinus* e casca de semente de algodão, respectivamente.

A quantidade de resíduos ligno-celulósicos pode ser estimada em função do percentual de substratos gerados nas colheitas agrícolas e da quantidade de madeira beneficiada nas indústrias da madeira. Assim, para se obter as quantidades de resíduos da região em estudo, foram adotados os dados da produção agrícola de 2003, publicados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE.

Após a identificação dos briquetes ligno-celulósicos da região em estudo, foram coletadas amostras de briquetes e de suas matérias-primas para ensaios de caracterização, conforme anteriormente apresentado na Figura 4.1.

A seguir, estão apresentadas as principais propriedades dos briquetes e resíduos investigadas neste trabalho. Foi realizada análise estatística e empregados os seguintes softwares: The SAS System for Windows v8 e The R Project for Statistical Computing. Também foi utilizado o teste de Mann-Whitney (Wilcoxon).

4.3.1 – Caracterização dos resíduos (matérias-primas) dos briquetes

A caracterização dos resíduos foi realizada no Laboratório de Produtos Florestais – LPF, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, em Brasília/DF, por meio dos seguintes ensaios: análise granulométrica, análise imediata, massa específica a granel e poder calorífico. A seguir, são detalhados os ensaios mencionados.

4.3.1.1 – Geometria dos resíduos (dimensões)

A análise granulométrica dos resíduos foi realizada conforme a norma ABNT NBR 7181:1984, específica para solos.

4.3.1.2 – Análise imediata dos resíduos

A análise imediata determina os teores de umidade, de cinza, de matérias voláteis e de carbono fixo. No Brasil, não existe norma para essa análise; nesse trabalho foi adotado o procedimento estabelecido pela norma ABNT NBR 8112:1986, para carvão vegetal.

Alguns dos equipamentos utilizados durante os ensaios da análise imediata são apresentados na seqüência de fotos ilustradas na Figura 4.4.

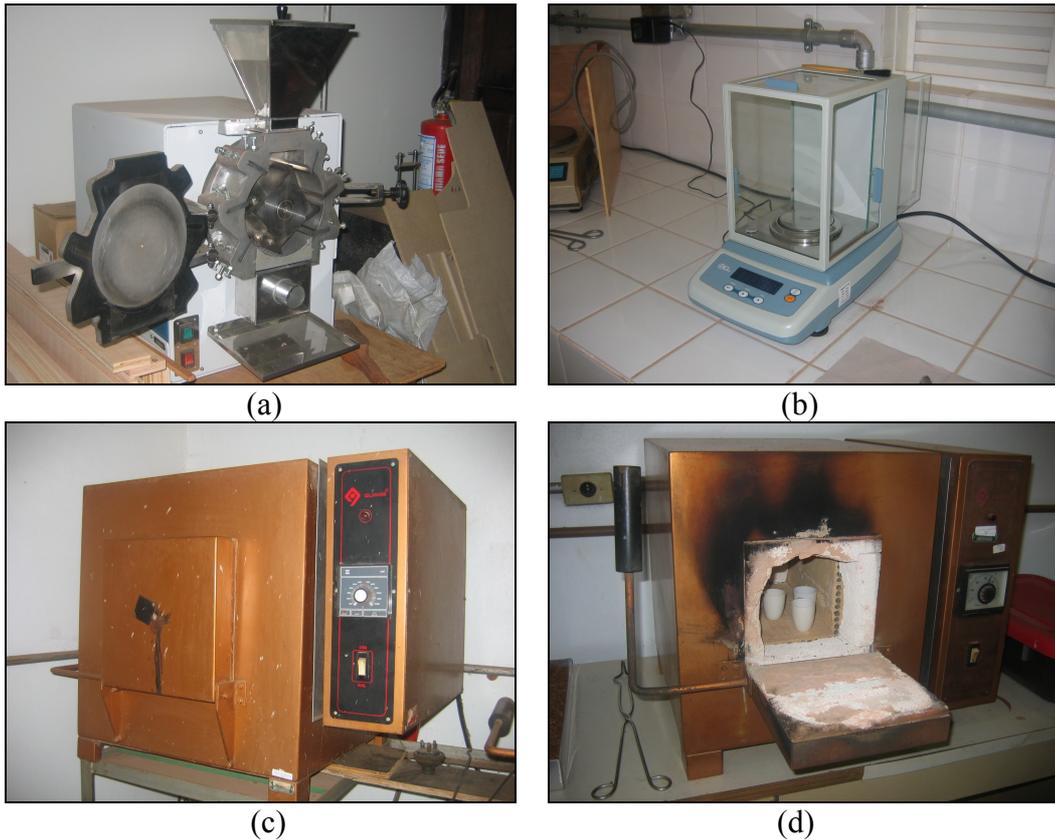


Figura 4.4 – Equipamentos empregados nos ensaios da análise imediata. a) triturador de amostras; b) balança analítica; c) forno mufla: vista externa e; d) forno mufla com cadinhos.

A seguir, apresenta-se uma síntese de como foram determinados os teores de umidade, de cinza, de matérias voláteis e de carbono fixo neste trabalho.

- Teor de umidade (TU)

As normas brasileiras que estabelecem os procedimentos para determinar o teor de umidade dos combustíveis de biomassas são: a ABNT NBR 8112:1986, para carvão vegetal e a ABNT NBR 7993:1983, para madeira reduzida à serragem.

Neste trabalho foi adotado o procedimento de ensaio da ABNT NBR 7993:1983, que prescreve a seguinte metodologia: a) secar a cápsula de alumínio a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$, esfriar em dessecador e pesar com precisão de 0,1 mg. Repetir a operação até se obter massa constante; b) pesar 1 a 2 gramas da amostra diretamente na cápsula mencionada antes, previamente tarada; c) secar em estufa a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ por 4 horas; d) transferir para o dessecador e deixar esfriar até a temperatura ambiente. Pesar com precisão de 0,1 mg;

e) repetir esta operação até obter massa constante. E por fim, calcular a umidade, expressa em porcentagem de massa úmida da amostra, pela Equação 4.1, a seguir.

$$TU = \frac{M - M_1}{M} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde: TU é o teor de umidade, em %; M é a massa inicial da amostra úmida e M₁ a massa seca em estufa, ambas em gramas.

Na análise do TU foram avaliadas cinco e nove amostras dos briquetes e da lenha de eucalipto, respectivamente. Devido ao fato da norma brasileira utilizada neste ensaio não estabelecer valores limites específicos para a matéria-prima do briquete em estudo, o resultado foi comparado ao valor estabelecido pela norma austríaca ONORM M 7135 (2000).

- Teor de cinza (CZ)

A norma utilizada para este ensaio foi a ABNT NBR 8112:1986. De acordo com essa norma, tem-se o seguinte procedimento de ensaio: a) pesar aproximadamente 1 g de amostra, isenta de umidade e com granulometria inferior a 0,210 mm; b) colocar a amostra em um cadinho sem tampa, previamente seco e tarado; c) colocar o cadinho com a amostra em um forno mufla previamente aquecida a (700 ± 10)°C; d) deixar o cadinho no forno mufla a (700 ± 10)°C, até que a amostra se queime completamente e; e) retirar a amostra do forno mufla, esfriar em um dessecador e determinar a massa final. O teor de cinza deve ser calculado de acordo com a Equação 4.2, a seguir.

$$CZ = \frac{m_1 - m_0}{m} \quad (4.2)$$

Onde: CZ é o teor de cinza, em %; m₀ é a massa do cadinho, m₁ a massa do cadinho mais o resíduo e m a massa da amostra seca a 0% de umidade, ambos em gramas.

O resultado deste ensaio foi comparado aos valores estabelecidos na norma austríaca ONORM M 7135 (2000), na norma alemã DIN 51719 (1996) e na norma sueca SS 187171 (1998), analogamente ao teor de umidade.

- Teor de matérias voláteis (MV)

A norma utilizada para este ensaio foi a ABNT NBR 8112:1986. O procedimento resumido dessa norma para este ensaio inclui: a) pesar, aproximadamente, 1 g de amostra, isenta de umidade e com granulometria inferior a 0,210 mm e superior a 0,150 mm; b) colocar a amostra em um cadinho com tampa, previamente seco e tarado; c) colocar o cadinho com a amostra sobre a porta do forno mufla, previamente aquecida a $(900 \pm 10)^\circ\text{C}$, permanecendo nessa posição durante 3 minutos; d) colocar o cadinho, após 3 minutos, no interior do forno mufla e deixá-lo por 7 minutos com a porta fechada e; e) retirar a amostra do forno mufla, esfriar em um dessecador e determinar a massa final. O teor de matéria volátil é determinado pela Equação 4.3, a seguir:

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde: MV é o teor de matérias voláteis, em %; m_2 é a massa inicial do cadinho mais a amostra, m_3 é a massa final do cadinho mais a amostra e m é a massa da amostra seca a 0% de umidade, ambos em gramas.

O resultado deste ensaio foi comparado aos limites estabelecidos por Obernberger; Thek (2004).

- Teor de carbono fixo (CF)

Segundo a norma ABNT NBR 8112:1986, o teor de carbono fixo é calculado subtraindo-se de 100 a soma dos teores de matérias voláteis e de cinza, conforme a Equação 4.4, a seguir.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (4.4)$$

Onde: CF é o teor de carbono fixo; CZ é o teor de cinza e MV o teor de matéria volátil, ambos em %.

4.3.1.3 – Massa específica a granel (γ_g)

Foi determinada a massa específica a granel, utilizando-se a metodologia prescrita na norma ABNT NBR 6922:1981, para carvão vegetal.

O procedimento consiste em: a) colocar a amostra no estado natural em um recipiente de peso e volume conhecido e; b) determinar a massa da amostra colocada no recipiente. A massa específica a granel deve ser calculado conforme a Equação 4.5, a seguir.

$$\gamma_g = \frac{m_a}{V_r} \quad (4.5)$$

Onde: γ_g é a massa específica a granel, em g/cm^3 (ou kg/m^3); m_a é a massa da amostra no estado natural, em g (ou kg); V_r é o volume do recipiente, em cm^3 (ou m^3).

4.3.1.4 – Poder calorífico superior (PCS)

O Poder calorífico superior foi determinado através de um calorímetro isotérmico, conforme a metodologia prescrita na norma ABNT NBR 8633:1984, para carvão vegetal. Alguns dos equipamentos utilizados durante o ensaio do poder calorífico superior estão apresentados na seqüência de fotos ilustradas na Figura 4.5, a seguir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.5 – Ensaio do PCS de uma amostra de madeira realizado no LPF-IBAMA/DF.

a) suporte, cadinho e garrafa; e) balde e acessório de água; f) bomba de oxigênio e g) calorímetro.

Resumidamente, o procedimento consiste em: a) em um cadinho previamente tarado, pesar a amostra completamente seca, com granulometria abaixo da peneira de 0,25 mm; b) estender, entre os dois terminais da bomba calorimétrica, 10 cm de fio de níquel-cromo, de modo a garantir seu contato com a amostra; c) colocar 5 ml de água destilada na bomba calorimétrica; d) montar e carregar a bomba calorimétrica com oxigênio; d) colocar o vaso calorimétrico com água destilada na camisa isolante; e) colocar a bomba dentro do vaso calorimétrico e; f) montar a aparelhagem e iniciar o ensaio. O PCS foi calculado conforme a Equação 4.6, a seguir:

$$PCS = \frac{W(\Delta T) - Q_f - Q_a}{m} \quad (4.6)$$

Onde: PCS é o poder calorífico superior a volume constante, em kcal/kg; W é o equivalente de água do calorímetro, em cal/°C; ΔT é a variação de temperatura, em °C; Q_f é

a quantidade de calor liberado pela combustão do fio de ignição (1 cm = 0,7 cal), em cal; Q_a é a quantidade de calor liberado pela formação do ácido nítrico (1 ml = 1,5 cal), em cal; e m é a massa da amostra, em grama.

4.3.1.5 – Poder calorífico inferior (PCI)

O poder calorífico inferior foi determinado em função do poder calorífico superior (PCS) do combustível analisado, utilizando-se a Equação 4.7.

$$PCI = PCS_{0\%} - 324 \quad (4.7)$$

4.3.1.6 – Poder calorífico líquido (PCL)

O poder calorífico líquido foi determinado em função do poder calorífico inferior (PCI) do combustível analisado, utilizando-se a Equação 4.8.

$$PCL_{0\%} = \left[PCI_{0\%} \left(100 - \frac{h}{100} \right) \right] - 6h \quad (4.8)$$

Onde: h é o teor de umidade do combustível analisado.

4.3.2 – Caracterização do briquete empregado na queima dos blocos cerâmicos

Para verificar a influência das características do briquete ligno-celulósico sobre o seu desempenho, quando submetido à combustão, foram analisados os seguintes parâmetros, recomendados pela bibliografia de referência: análise imediata, massa específica aparente e a granel, poder calorífico e expansão longitudinal.

Não existe norma brasileira para combustíveis de biomassa densificados. Na determinação da análise imediata, da massa específica a granel, do poder calorífico superior, do poder calorífico inferior e do poder calorífico líquido, foram adotados os mesmos procedimentos considerados nos subitens 4.3.1.2; 4.3.1.3; 4.3.1.4, 4.3.1.5 e 4.3.1.6. No entanto, os

métodos de ensaio para determinar a massa específica aparente e a expansão longitudinal do briquete, que não são aplicados para partículas soltas, serão detalhados a seguir.

4.3.2.1 – Massa específica aparente (γ_A)

No Brasil, não existe norma para determinar a massa específica aparente de outros produtos de biomassa, a não ser para o carvão vegetal, cuja norma é a ABNT NBR 9165:1985. Neste trabalho foram adotados os procedimentos prescritos no método de ensaio da ABNT MB-2887:1988, de solo.

A Figura 4.6 apresenta os equipamentos empregados no ensaio da massa específica aparente dos briquetes e da lenha de eucalipto analisados.



Figura 4.6 – Equipamentos utilizados no ensaio de massa específica aparente dos combustíveis analisados. a) determinação da massa antes do briquete ser parafinado; b) determinação da massa do briquete parafinado, imerso em água.

O procedimento deste ensaio consistiu em: a) pesar o corpo-de-prova no estado natural; b) revestir o corpo-de-prova com uma película fina de parafina derretida, para a obtenção de uma superfície nivelada; c) aguardar o resfriamento da parafina e determinar a massa do corpo-de-prova parafinado e; d) imergir o corpo-de-prova totalmente na água, colocando-o sob um recipiente acoplado ao prato da balança e determinar a massa do corpo-de-prova parafinado imerso na água. A massa específica aparente natural é calculada conforme a Equação 4.9, a seguir.

$$\gamma_A = \frac{M}{V_c} \quad (4.9)$$

Onde: γ_A é a massa específica aparente natural da amostra, em g/cm³; M é a massa do corpo-de-prova, em grama; e V_c é o volume do corpo-de-prova, em cm³, calculado pela Equação 4.10.

$$V_c = \frac{(M_p - M_i)}{\gamma_{\text{água}}} - \frac{(M_p - M_c)}{\gamma_{\text{parafina}}} \quad (4.10)$$

Onde: V_c é o volume do corpo-de-prova, em cm³; M_p é a massa do corpo-de-prova parafinado, em grama; M_i é a massa do corpo-de-prova imerso em água, em grama; M_c é a massa do corpo-de-prova, em grama; $\gamma_{\text{água}}$ é a massa específica da água (considerar igual a 1 g/cm³) e γ_{parafina} é a massa específica da parafina utilizada, em g/cm³.

4.3.2.2 – Expansão longitudinal (ou deformação específica)

Não existe norma brasileira ou trabalhos na literatura nacional para este ensaio, para os combustíveis de biomassa densificados. Neste trabalho foi adotada a metodologia apresentada por Ndyema et al. (2002), que estabelece que o comprimento longitudinal do briquete deve ser determinado para 1, 2, 3, 5, 10, 15 e 30 minutos após a sua extrusão, bem como para 1, 2 e 24 horas e ainda para 7, 15, e 30 dias.

Algumas das etapas do procedimento do ensaio de expansão longitudinal dos briquetes são apresentadas na seqüência de fotos ilustradas na Figura 4.7.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7 – Ensaio de expansão longitudinal dos briquetes. a) extrusão dos briquetes; b) corpos-de-prova em análise na primeira hora após a sua extrusão; c) medida da expansão ao longo de trinta dias após a fabricação.

4.3.3 – Caracterização da lenha de eucalipto (grupo de controle)

A caracterização da lenha de eucalipto foi realizada a partir da determinação dos seguintes parâmetros: análise imediata, massa específica aparente e a granel e poder calorífico. Os mesmos procedimentos descritos no subitem 4.3.2, referente ao briquete ligno-celulósico, foram aplicados à lenha de eucalipto, com exceção do ensaio de deformação longitudinal.

4.4 – FASE 2: ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO BRIQUETE LIGNO-CELULÓSICO NA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGILAS E DOS BLOCOS

4.4.1 – Utilização de briquetes na fase de queima dos blocos cerâmicos

Para obter as temperaturas ao longo da fase de queima dos blocos, foi utilizado o sistema eletrônico de controle de temperatura, já instalado na indústria cerâmica selecionada para este trabalho. Esse controlador de temperatura é constituído de termopares tipo K (em um total de quatro), instalados na parte interna do forno, na região superior e central das zonas de preaquecimento e queima e conectados a um indicador digital, externamente, onde é registrada a temperatura da câmara de queima.

A Figura 4.8 apresenta os dispositivos utilizados para determinação da temperatura na câmara de queima, ao longo da fase de queima dos blocos.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8 – Instrumentos de medir temperaturas do forno de uma indústria cerâmica de Campo Limpo/GO. a) termopares tipo K; b) instalação do termopar e; c) indicador digital de temperatura.

Na queima dos blocos com a lenha de eucalipto, foram consideradas as mesmas condições de queima do briquete, incluindo os mesmos operadores do forno e a mesma zona de queima. Para a determinação das curvas de temperaturas e dos consumos de energia e mão-de-obra, foram realizados processos de queimas com respectivo monitoramento em um total de três repetições.

4.4.2 – Caracterização da argila aplicada nos blocos cerâmicos

Para a análise do desempenho dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto procedeu-se, primeiramente, à caracterização da argila (matéria-prima) dos blocos. Para isso, foram coletadas, na esteira transportadora localizada após a fase de laminação e antes da extrusão dos blocos, amostras das argilas, para realizar os ensaios tecnológicos e mineralógico.

Inicialmente foi efetuada análise tecnológica visando estudar as características físicas e mecânicas das argilas, tais como: análise granulométrica, limites de liquidez e de plasticidade, de acordo com as normas ABNT NBR 7181:1984; ABNT NBR 6459:1984 e NBR 7180:1984, respectivamente. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Solos do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília.

Em seguida, procedeu-se à análise mineralógica, por meio do ensaio de difração de raio-X, para determinar quantitativamente os argilominerais presentes, tais como: caulinita, montmorilonita, illita entre outros.

Concernente ao ensaio mineralógico, as amostras das argilas analisadas foram moídas e dispersas em suspensão aquosa, espalhadas em uma lâmina de vidro e secas ao ar para orientação preferencial das partículas. Após a preparação das lâminas, ambas foram analisadas em um equipamento RIGAKU D/MAX – 2/C, operando com tubo de cobre, sob voltagem de 30 kV e 10 mA, velocidade de varredura de 2º/minuto, no intervalo de 2 a 70 teta. Esse ensaio foi realizado no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

4.4.3 – Avaliação do desempenho dos blocos cerâmicos

Após a caracterização da argila, foi feita a avaliação de desempenho dos blocos, considerando-se a queima com briquete e eucalipto. Para a avaliação do desempenho dos blocos queimados a partir de briquetes, comparativamente à lenha de eucalipto, foi realizada uma análise a partir dos seguintes ensaios: inspeção geral (identificação e caracterização visual) e inspeção por ensaios (características geométricas, físicas e mecânicas), conforme detalhados a seguir. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais – LEM, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

Além dos ensaios indicados na norma atual brasileira de blocos cerâmicos, para esta avaliação foram realizados ensaios, tais como: retração linear de secagem e de queima, porosidade aparente.

4.4.3.1 – Inspeção geral

A inspeção geral dos blocos foi realizada de acordo com os procedimentos prescritos pela norma ABNT NBR 15270-3:2005, bem como os requisitos estabelecidos na parte 1 desta mesma norma.

Os ensaios realizados consistiram na identificação e na caracterização visual dos blocos. No primeiro, procedeu-se à verificação da identificação do fabricante e das dimensões de fabricação e no segundo, à presença de irregularidades prejudiciais ao seu emprego na função especificada. Foram realizadas amostragens simples, conforme recomendada pela norma anteriormente mencionada.

4.4.3.2 – Inspeção por ensaios: características geométricas, físicas e mecânica

As características geométricas avaliadas foram as seguintes: medidas das faces, incluindo largura (L), altura (H) e comprimento (C); espessura das paredes externas e dos septos; desvio em relação ao esquadro (D) e planeza das faces (F). As determinações dessas características foram obtidas pela medida nos blocos para seis amostras, três queimadas

com briquetes e três com lenha de eucalipto, de acordo com os procedimentos prescritos na norma ANBT NBR 15270:2005, resumidos a seguir.

- Características geométricas do bloco cerâmico

A Figura 4.9, a seguir, ilustra os ensaios realizados para a determinação das características geométricas dos blocos ensaiados.

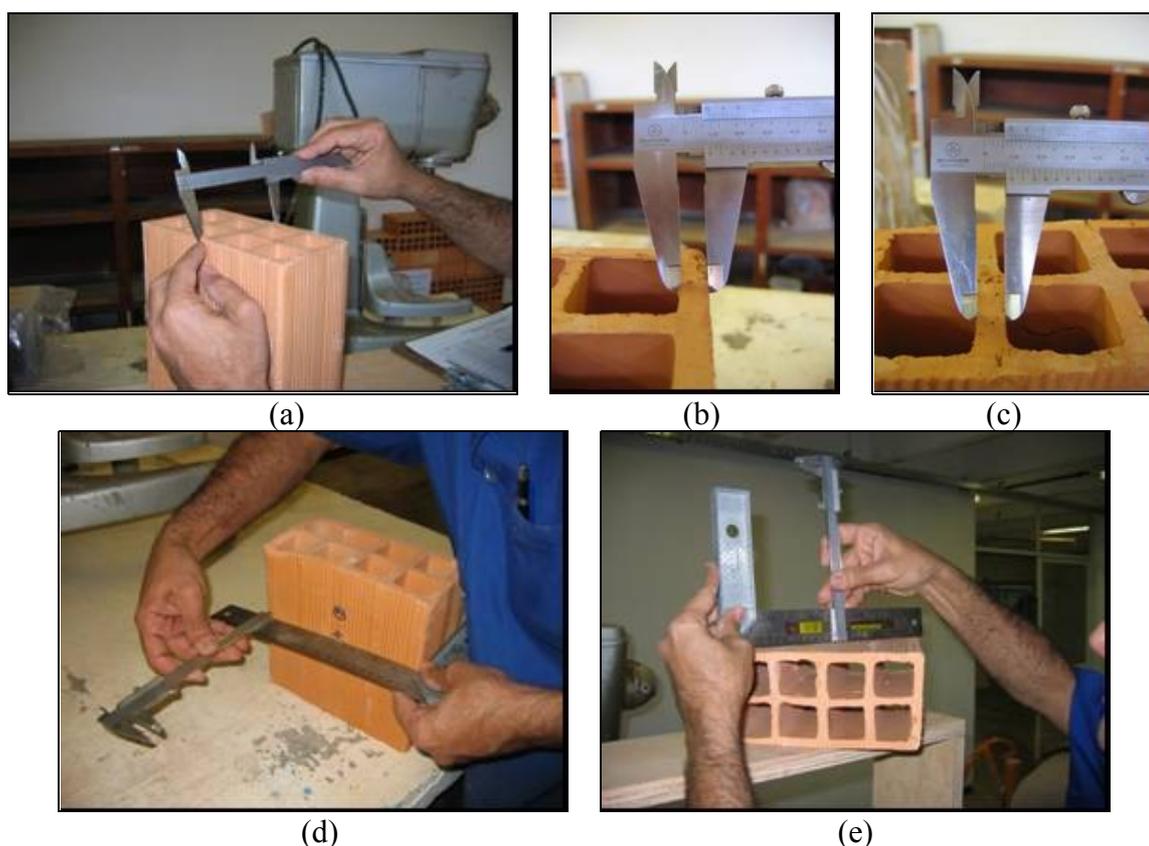


Figura 4.9 – Inspeção por ensaios dos blocos ensaiados. a) determinação da largura de uma das faces; b) medida da espessura na parede externa; c) medida da espessura do septo; d) determinação do desvio em relação ao esquadro e; e) determinação da planeza da face.

Medidas das faces (dimensões efetivas): Os valores da largura (L), altura (H) e comprimento (C) foram obtidos determinando-se a medida no centro de cada face, paralelamente à dimensão a ser tomada, a partir de um paquímetro com precisão de 0,1 mm.

Espessura das paredes externas: foi determinada em um ponto de cada face, buscando o ponto de menor espessura, a partir de uma régua metálica de precisão de 0,1 mm. Estes

valores foram comparados com a espessura mínima estabelecida pela norma atual de blocos.

Espessura dos septos: foram obtidas na sua parte central, considerando-se, no mínimo, quatro pontos e buscando os septos de menor espessura, a partir de um paquímetro com precisão de 0,1 mm. Os valores encontrados foram comparados ao limite estabelecido pela norma de blocos.

Desvio em relação ao esquadro (D): foram medidos entre uma das faces destinadas ao assentamento e uma das faces destinada ao revestimento do bloco, por meio de um esquadro metálico com precisão de 0,1 mm. Os valores obtidos neste ensaio foram comparado aos valores estabelecidos pela norma de blocos.

Planeza das faces (F): foi determinada a planeza de uma das faces destinadas ao revestimento, através da flecha formada na diagonal do bloco, medida com um régua metálica com precisão de 0,1 mm. Os resultados encontrados foram comparados com os valores limites estabelecidos pela norma de bloco cerâmico.

- Características físicas do bloco cerâmico

As características físicas do bloco determinadas neste trabalho foram: índice de absorção d'água (AA), índice de absorção inicial (AAI), umidade de moldagem, retração na secagem e na queima e porosidade aparente.

Índice de absorção d'água (AA): Este ensaio foi realizado conforme o Anexo B da norma ABNT NBR 15270-3:2005 e consistiu em verificar o percentual de água absorvido pelo bloco, obtido a partir da diferença entre a massa seca e a massa úmida do corpo-de-prova. As amostras foram constituídas por seis corpos-de-prova. A Figura 4.10, a seguir, apresenta uma vista do ensaio do índice de absorção d'água realizado.



(a)



(b)

Figura 4.10 – Ensaio do índice de absorção d'água dos blocos ensaiados. a) determinação da massa inicial do corpo-de-prova e; b) corpos-de-prova imersos ao longo do ensaio para determinação da massa úmida.

Índice de absorção inicial (AAI): Este ensaio for realizado conforme os procedimentos prescritos no Anexo E da norma ABNT NBR 15270-3:2005, onde recomenda-se que a amostra seja constituída, no mínimo, de seis corpos-de-prova. A Figura 4.11 apresenta uma vista do ensaio do índice de absorção inicial dos blocos realizado.



(a)



(b)

Figura 4.11 – Ensaio do índice de absorção inicial dos blocos realizado. a) face do corpo-de-prova imerso em lâmina d'água e; b) determinação da massa final do

corpo-de-prova.

Umidade de moldagem: Este ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos por Cardoso (1995). Resumidamente, consistiu em coletar amostras de blocos, imediatamente após a conformação, e a sua pesagem, obtendo-se a sua massa úmida. Em seguida os blocos foram secos durante 24 horas, em temperatura ambiente e secos em estufa à temperatura de 110°C. O esfriamento foi realizado na própria estufa, em um período de aproximadamente 3 horas. Novamente os blocos foram pesados para se obter a sua massa seca. O índice de água de moldagem (AM) foi determinado pela Equação 4.11, a seguir.

$$AM = \frac{M_U - M_S}{M_U} \times 100 \quad (4.11)$$

Onde: AM é o índice de água de moldagem, em %; M_U é a massa úmida do bloco e M_S a massa seca do bloco, ambos em grama.

Retração linear de secagem e de queima: Este ensaio foi determinado a partir das medidas das faces dos blocos – largura (L), altura (H) e comprimento (C), imediatamente após a sua conformação. Em seguida, estes blocos foram secos em temperatura ambiente, conforme o período de secagem adotado pelo fabricante. No último instante da secagem natural, antes de colocar os blocos na secagem artificial, esses foram medidos novamente. Após a secagem artificial efetuou-se uma nova medida das faces. A retração linear de secagem foi obtida pela Equação 4.12.

$$RS = \frac{L_0 - L_i}{L_0} \times 100 \quad (4.12)$$

Onde: RS é a retração linear de secagem, em %; L_0 é o comprimento da face do corpo-de-prova úmido e L_i é comprimento da face do corpo-de-prova seco, ambos em centímetro.

Para o ensaio de retração linear após a queima do bloco procedeu-se analogamente à retração linear de secagem, com as seguintes alterações: as medidas iniciais e finais foram obtidas antes de iniciar a fase de queima do bloco e após a sua queima, respectivamente. A retração linear de queima foi obtida pela Equação 4.13.

$$RQ = \frac{L_i - L_2}{L_i} \quad (4.13)$$

Onde: RQ é a retração linear de queima, em %; L_i e L_2 são os comprimentos do corpo-de-prova, antes e depois do processo de queima, respectivamente, ambos em centímetro.

Porosidade aparente: Neste ensaio adotou-se a metodologia usada por Cardoso (1995), onde a porosidade aparente é determinada pelo quociente entre o volume dos poros abertos e o volume aparente do corpo-de-prova, cumprindo os seguintes procedimentos: o bloco foi seco em estufa a 110°C, determinando-se sua massa seca, em grama, em seguida o bloco foi imerso em água fervente durante 2 horas. Quando o bloco foi retirado, este foi enxugado com pano úmido e pesado, obtendo-se a sua massa úmida, em grama. Em seguida, o bloco foi totalmente imerso em água, e depositado em um recipiente acoplado ao prato da balança hidrostática, onde foi possível obter-se a sua massa aparente, em grama. A porosidade aparente foi calculada pela Equação 4.14.

$$PA = \frac{M_U - M_S}{M_U - M_A} \quad (4.14)$$

Onde : PA é a porosidade aparente, em % ; M_U é a massa do corpo-de-prova úmido, em grama; M_S é a massa do corpo-de-prova seco, em grama; e M_A é a massa do corpo-de-prova imerso em água, em grama.

- Característica mecânica do bloco cerâmico

A característica mecânica do bloco é representada pela resistência à compressão individual, conforme prescrito pelo Anexo C da norma ABNT NBR 15270:2005.

Resistência à compressão: O ensaio foi realizado conforme prescrito na norma de blocos. Primeiramente, os blocos foram submetidos a limpeza e capeamento com pasta de cimento, em seguida, foram imersos em água potável por 24 horas, a partir do que foram tomadas as suas medidas com um paquímetro de precisão de 0,1 mm e submetidos à ensaios de resistência à compressão em uma prensa universal.

A Figura 4.12, a seguir, apresenta a ruptura no ensaio de resistência à compressão dos blocos ensaiados.



Figura 4.12 – Ensaio de resistência à compressão e vista do momento de ruptura de blocos.

4.5 – FASE 3: ANÁLISE ENERGÉTICO-ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DO BRIQUETE NA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS

A análise energético-econômica completa de um material ou componente deve considerar o somatório do consumo de energia e o custo das atividades em todo o processo de sua fabricação. Por exemplo, para o bloco cerâmico é contabilizado o dispêndio de energia e o custo econômico, desde a extração e transporte da argila até o armazenamento final do bloco na fábrica.

Numa análise mais ampla ainda, pode se considerar também, a energia indireta, ou seja, aquela consumida na fabricação das máquinas e instalações diretamente usadas na produção do bloco. Todavia, segundo Guimarães (1985), isto pouco acrescentaria uma vez que são produzidas grandes quantidades de blocos com os mesmos equipamentos durante a sua vida útil, não justificando esta exaustiva tarefa, exceto em casos específicos.

Como a unidade de comercialização do bloco cerâmico é o milheiro, o consumo energético e o custo econômico calculado neste estudo foram determinados, também, para mil blocos.

4.5.1 – Análise energética: consumo de energia na fase de queima dos blocos cerâmicos

Nesta análise foram considerados os consumos energéticos referentes a energia térmica, a energia elétrica e a mão-de-obra empregada na fase de queima dos blocos. A energia térmica foi determinada com base na massa total de briquetes utilizados na queima dos blocos; a energia elétrica, em função da energia consumida pelos equipamentos auxiliares usados na queima dos blocos e a mão-de-obra, na jornada de trabalho dos operários empregados na queima dos blocos.

Conforme BEN (2006), a contabilização das diferentes formas de energia se dá com a utilização de fatores de conversão, que levem em consideração a capacidade de liberação de calor, em calorias, de cada energético quando da sua combustão, $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$. Desse modo, como o consumo da energia elétrica dos equipamentos são dados em kWh, tem-se que efetuar a conversão da energia térmica de kcal para kWh, para que os consumos de energia sejam expressos na mesma unidade (kWh). O consumo da mão-de-obra, porém, será apresentado separadamente, em horas.

Para o cálculo do consumo total de energia, respectivo a energia térmica e elétrica, denominado de consumo energético total parte 1, foi utilizada a Equação 4.15.

$$CTE_1 = CTE_T + CTE_{EQ} \quad (4.15)$$

Onde: CTE_1 é o consumo energético total parte 1, em kW; CTE_B é o consumo total de energia térmica, em kW; CTE_{EQ} é o consumo total de energia elétrica, em kW.

Para o cálculo do consumo total alusivo a mão-de-obra, denominado de consumo energético total parte 2, foi utilizada a Equação 4.16.

$$CTE_2 = CT_{MO} \quad (4.16)$$

Onde: CTE_2 é o consumo energético total parte 2 e CT_{MO} é o consumo total de mão-de-obra empregada na fase de queima dos blocos, ambos em hora.

Os procedimentos de cálculo dos consumos da energia térmica, da energia elétrica e da mão-de-obra, referidos anteriormente, são apresentados nos itens 4.5.1.1; 4.5.1.2 e 4.5.1.3, a seguir.

4.5.1.1 – Consumo da energia térmica

A estimativa do consumo de briquete em uma zona do forno contínuo é de certa forma complexa. No entanto, com o comprimento das zonas de preaquecimento, queima e resfriamento e com a velocidade de deslocamento das vagonetas ao longo do forno, pode-se definir o tempo que cada vagoneta utiliza para atravessar cada zona. Assim sendo, pode-se determinar o consumo de combustível na zona de queima (ou de temperatura máxima) dos blocos.

Devido a dificuldade de se definir o tempo em que as vagonetas contendo os blocos a serem queimados atravessam o forno contínuo tipo túnel, considerou-se constante a sua velocidade de deslocamento no interior do forno em todo o trabalho experimental. A partir deste pressuposto, estimou-se o tempo para as vagonetas atravessarem as zonas do forno.

A Figura 4.13 apresenta uma vista das três zonas do forno em estudo, com os seus respectivos comprimentos e cargas de blocos.

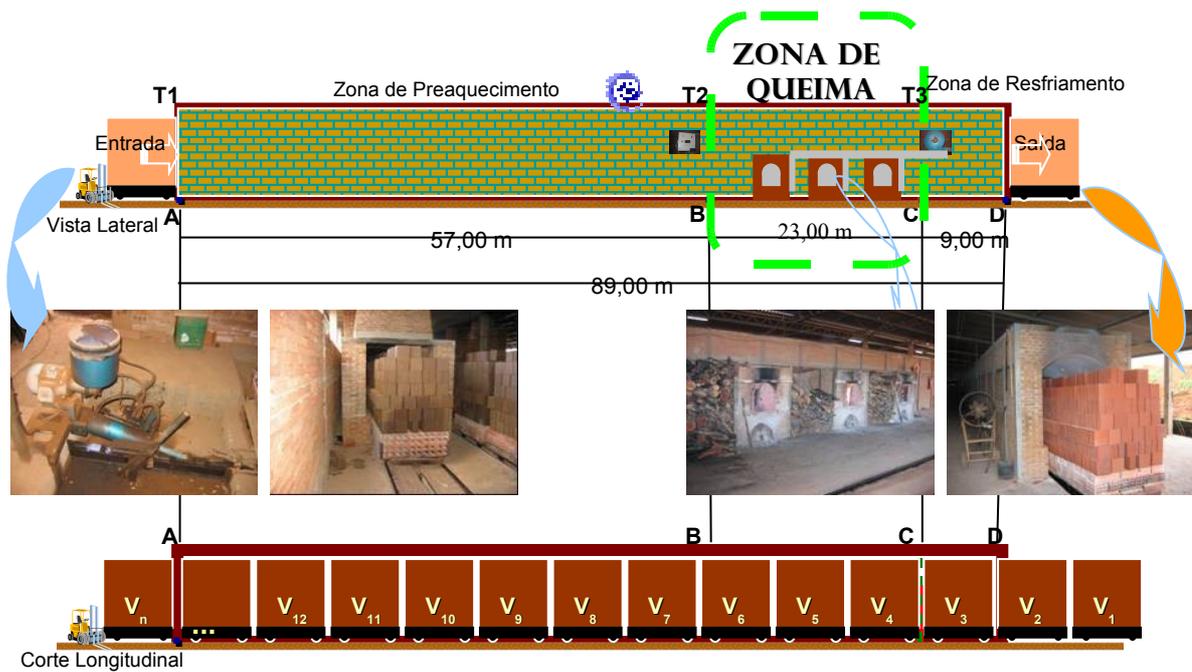


Figura 4.13 – Vista das três zonas do forno em estudo, com os seus respectivos comprimentos e a reprodução das vagonetas com blocos.

A Figura 4.14, a seguir, apresenta uma vista de um corte longitudinal do forno em estudo, com desenho das vagonetas utilizadas na queima dos blocos. Os símbolos T1, T2, T3 representam os tempos iniciais e finais, para as vagonetas cruzarem a zona de preaquecimento e de queima. Também está representado nesta figura, uma carga completa de blocos na zona de queima do forno em estudo, onde esta carga inicia a entrada na zona de queima no tempo T2. A zona de queima está totalmente completa com uma carga de blocos no tempo T3 e só no tempo T4 é quando esta carga inicia a sua saída completa da zona de queima. Para avaliação do consumo de combustível deste programa experimental foram realizadas três análises da queima dos blocos de uma carga completa da zona de queima do forno em estudo.

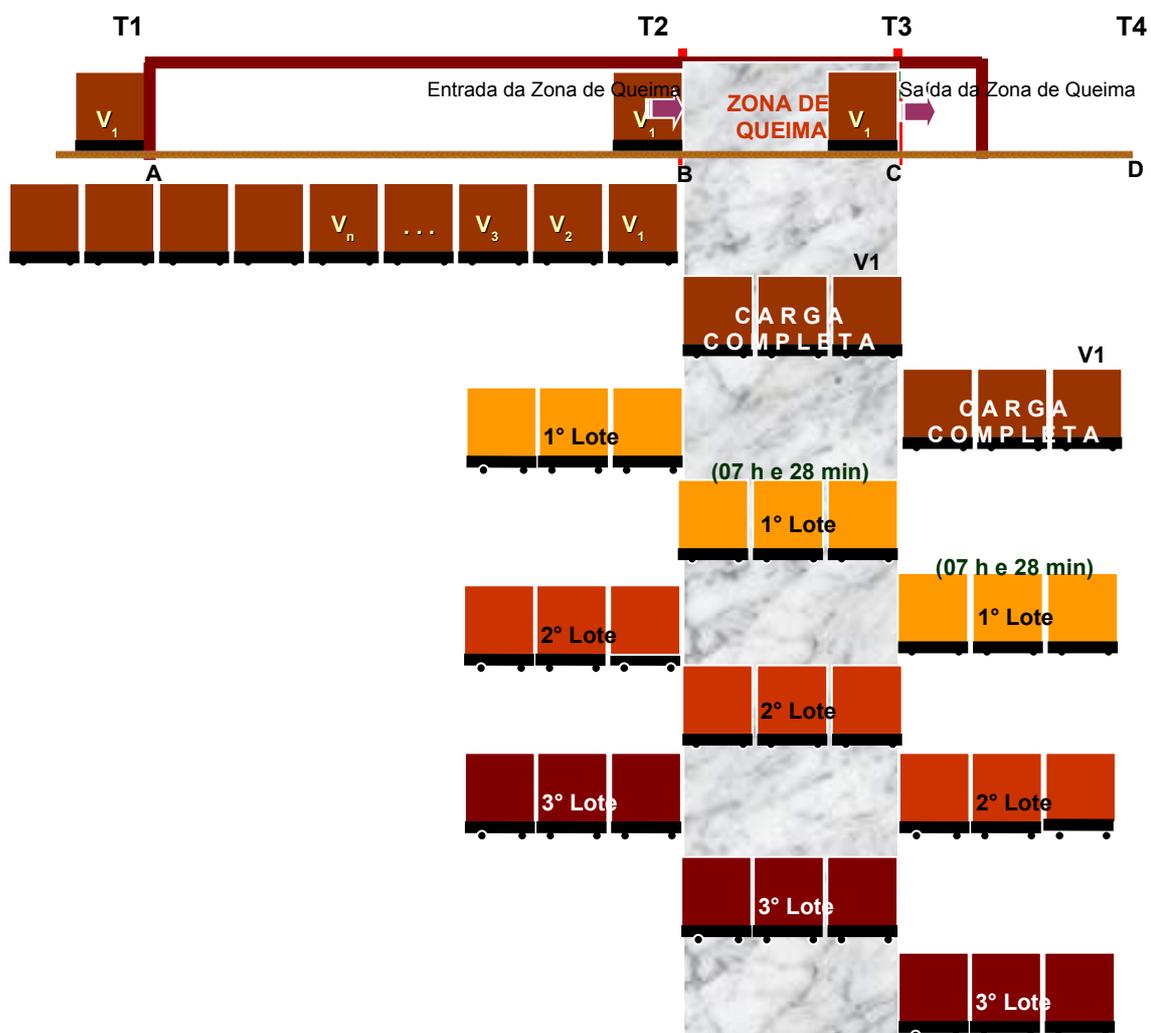


Figura 4.14 – Detalhe das zonas do forno e da carga completa de bloco da zona de queima

Os consumos dos combustíveis foram determinados do seguinte modo: pesou-se uma quantidade expressiva de briquetes e lenha de eucalipto, a serem aplicados na fase de queima dos blocos. Depois de concluída a fase de queima de uma carga completa da zona de queima, pesou-se o combustível restante. Dessa forma, determinou-se o consumo pela diferença entre a quantidade inicial e final de combustível consumido.

No consumo de energia térmica considerou-se o consumo energético do briquete, o qual foi determinado pelo produto da massa total de briquete aplicada na queima dos blocos e o seu respectivo poder calorífico líquido, conforme a Equação 4.16, a seguir.

$$CTE_T = m_B \times PCL_B \quad (4.16)$$

Onde: CTE_T é o consumo total da energia térmica, em kcal; m_B é a massa total do briquete utilizado na queima dos blocos, em kg; e PCL_B é o poder calorífico líquido do briquete, em MJ/kg.

4.5.1.2 – Consumo total da energia elétrica

A energia elétrica consumida pelos equipamentos, tais como: empurrador de vagonetas, ventoinhas e exaustor, foi calculada pelo somatório do produto do consumo da energia prescrito pelo fabricante desses equipamentos e o tempo de funcionamento de cada equipamento na fase de queima dos blocos, conforme a Equação 4.17.

$$CTE_{EQ} = [CE_{EQ1} \times T_{EQ1}] + [CE_{EQ2} \times T_{EQ2}] + \dots + [CE_{EQn} \times T_{EQn}] \quad (4.17)$$

Onde: CTE_{EQ} é o consumo total da energia elétrica, em kW; CE_{EQ1} , CE_{EQ2} e CE_{EQn} são os consumos de energia elétrica dos equipamentos 1, 2 e n, respectivamente, em kW/h; e T_{EQ1} , T_{EQ2} e T_{EQn} são os tempos de funcionamento dos equipamentos 1, 2 e n, respectivamente, em hora.

4.5.1.3 – Consumo total da mão-de-obra

Este consumo foi calculado pelo somatório do número de hora-homem empregada na fase de queima dos blocos, conforme a Equação 4.18.

$$CT_{MO} = H_{TOP1} + H_{TOP2} + \dots + H_{TOPn} \quad (4.18)$$

Onde: CT_{MO} é o consumo total da mão-de-obra empregada na fase de queima dos blocos, em hora; e H_{TOP1} , H_{TOP2} , e H_{TOPn} são as horas de trabalho dos operários 1, 2 e n, respectivamente, em hora.

4.5.2 – Análise econômica: custo total do consumo energético na fase de queima dos blocos cerâmicos

Não considerou-se neste trabalho o custo energético da fabricação dos briquetes, pois entende-se que esta despesa está diluída no preço de mercado do briquete, cobrado pela

indústria de briquetes. O custo energético da produção dos briquetes analisados neste trabalho é tema de outra tese de doutorado, em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Faculdade de Tecnologia da UnB.

Neste trabalho foram contabilizados, exclusivamente, as despesas com a aquisição dos briquetes, com o consumo da energia elétrica e com a mão-de-obra utilizada na fase de queima dos blocos cerâmicos.

O custo total da energia consumida na fase de queima dos blocos foi determinado conforme a Equação 4.19.

$$R\$_{FQB} = R\$CTE_T + R\$CTE_{EQ} + R\$CT_{MO} \quad (4.19)$$

Onde: $R\$_{FQB}$ é o custo energético total da fase de queima dos blocos, em reais; $R\$CTE_T$ é o custo total da energia térmica da fase de queima dos blocos, em reais; $R\$CTE_{EQ}$ é o custo total da energia elétrica usada na fase de queima dos blocos, em reais; e $R\$CT_{MO}$ é o custo total da mão-de-obra empregada na fase de queima dos blocos, em reais.

Os procedimentos adotados para as determinações dos custos da energia térmica, da energia elétrica e da mão-de-obra utilizada na fase de queima dos blocos, são apresentados a seguir.

4.5.2.1 – Custo da energia térmica

Este custo incluiu a despesa com a compra do briquete e foi calculado pelo produto do preço da massa do briquete na região em estudo e da massa total de briquetes aplicada na fase de queima dos blocos, conforme a Equação 4.20, a seguir.

$$R\$CE_T = R\$_B \times m_B \quad (4.20)$$

Onde: $R\$CE_T$ é o custo da energia térmica, em reais; $R\$_B$ é o valor do quilo do briquete no universo de estudo, em reais, e; m_B é a massa total do briquete utilizado na fase de queima dos blocos, em kg.

4.5.2.2 – Custo da energia elétrica

Este custo foi calculado pelo produto do consumo total da energia elétrica dos equipamentos utilizados na fase de queima dos blocos (item 4.5.1.2) e da tarifa de um kW cobrada pela concessionária de energia elétrica da região em estudo. A Equação 4.21 apresenta a fórmula para o cálculo deste custo.

$$R\$CTE_{EQ} = CTE_{EQ} \times R\$_{energia} \quad (4.21)$$

Onde: $R\$CTE_{EQ}$ é o custo do consumo da energia elétrica dos equipamentos utilizados na fase de queima dos blocos, em reais; CTE_{EQ} é o consumo energético total dos equipamentos (item 4.5.1.2), em kWh; e $R\$_{energia}$ é a tarifa de energia elétrica cobrada pela concessionária de energia elétrica da região em estudo, em reais.

4.5.2.3 – Custo da mão-de-obra

No cálculo desse custo considerou-se o valor da hora de trabalho e o tempo gasto pelos operários empregados na fase de queima dos blocos, conforme a Equação 4.22.

$$R\$CT_{MO} = [R\$_{OP1} \times H_{TOP1}] + [R\$_{OP2} \times H_{TOP2}] + \dots + [R\$_{OPn} \times H_{TOPn}] \quad (4.22)$$

Onde: $R\$CT_{MO}$ é o custo total da mão-de-obra empregada na fase de queima dos blocos, em reais; $R\$OP_1, R\$OP_2, \dots, R\$OP_n$ são os valores da hora de trabalho dos operários 1, 2, ..., n, respectivamente, em reais; e $H_{TOP_1}, H_{TOP_2}, \dots, H_{TOP_n}$ são os tempos de trabalho dos operários 1, 2, ..., n, respectivamente, em hora.

5 – APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 – POTENCIAL E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS LIGNO-CELULÓSICOS UTILIZADOS NOS BRIQUETES EM ESTUDO

5.1.1 – Potencial dos resíduos utilizados em briquetes no DF e GO

Conforme mencionado na Seção 2, um dos poucos registros existentes sobre o potencial de resíduos ligno-celulósicos brasileiros, diz respeito à produção anual das colheitas agrícolas e florestais. Essas informações permitem quantificar o total de resíduos ligno-celulósicos em determinada região. A Tabela 5.1 apresenta uma estimativa da produção total de algodão, cana-de-açúcar e madeira em toras, bem como as percentagens de resíduos gerados nessas colheitas no Brasil, DF e GO, considerando-se o ano-base de 2003.

Tabela 5.1 – Produção agrícola, florestal e geração de resíduos ligno-celulósicos no Brasil, DF e GO para 2003

MATÉRIA-PRIMA	PRODUÇÃO AGRÍCOLA E FLORESTAL		FORMAÇÃO DE RESÍDUOS		
			PORCENTAGEM GERADA NA COLHEITA (%)	TOTAL GERADO NO BRASIL	TOTAL GERADO NO DF + GO
	BRASIL	DF + GO			
Algodão (x 10 ⁶ t)	4,18	0,33	50 ^a	2,09	0,16
Cana-de-açúcar (x 10 ⁶ t)	396,01	12,92	28 ^b	1100,88	3,62
Madeira em tora (x 10 ⁶ m ³)	20,66	0,04	50 ^c	10,33	0,02

^a = Cuchet et al. (2004); ^b = BRASIL (1984); ^c = Wamukonya; Jenkins (1995).

Conforme a Tabela 5.1, percebe-se que a produção nacional e local (DF + GO) de cana-de-açúcar é expressiva, com potencial para o uso em briquetes. No caso do algodão, a produção local é cerca de 8% da produção nacional. Para a madeira, porém, observa-se que o DF e GO não são produtores potenciais, já que a sua maior parte vêm do Norte do País e, comumente, passam por beneficiamento prévio nos locais de origem, quando é realizado o seu desdobro. Contudo, as serrarias e indústrias de móveis dessa região também geram serragem de madeira, passível de ser aproveitada na produção do briquete, em vez de ser, simplesmente, queimada ou depositada ao ar livre, causando poluição.

5.1.2 - Caracterização dos resíduos (matérias-primas) do briquete

É essencial estudar o comportamento dos resíduos ligno-celulósicos para a sua aplicação na briquetagem. Neste trabalho foi realizada a caracterização do resíduo de semente de algodão e das serragens de madeira, por se tratar das matérias-primas empregadas na produção dos briquetes analisados (ver item 5.2.2). A Figura 5.1 apresenta os resíduos aproveitados na fabricação dos briquetes objeto de estudo.

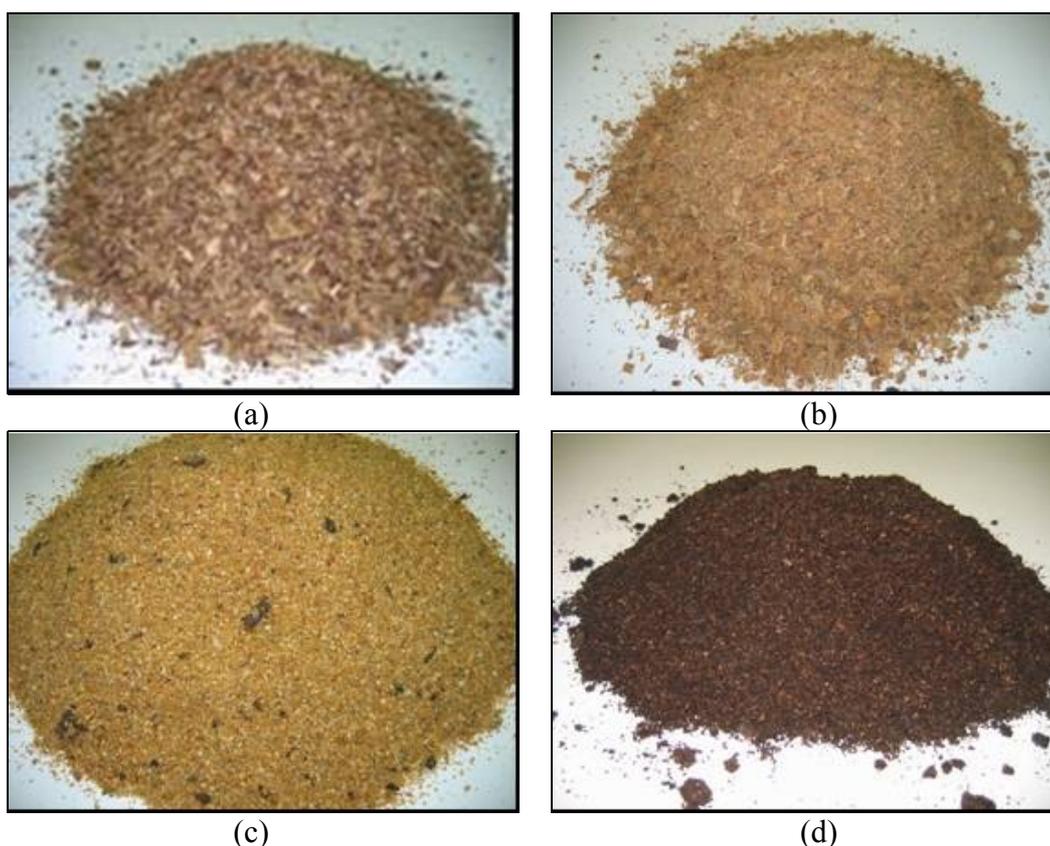


Figura 5.1 – Resíduos utilizados na fabricação dos briquetes analisados. a) serragem de madeira produzida na indústria de briquetes; b) serragem de madeira das serrarias e indústrias de móveis; c) serragem de *pinus* e; d) resíduo de semente de algodão.

A Tabela 5.2 apresenta o resultado da caracterização da serragem produzida na indústria de briquetes (SM1), da serragem gerada nas serrarias e indústrias de móveis (SM2), da serragem de *pinus* (SM3) e do resíduo de semente de algodão (RA), matérias-primas dos briquetes analisados.

Tabela 5.2 – Caracterização das serragens de madeira e da casca de semente de algodão utilizadas na fabricação dos briquetes analisados

PROPRIEDADE	CASCA DE SEMENTE DE ALGODÃO	SERRAGEM DE MADEIRA
Teor de umidade [%]	49,34	SM1 = 28,63
		SM2 = 19,74
		SM3 = 51,31
Teor de cinza [%]	8,44	2,10
Teor de matérias voláteis [%]	78,98	89,02
Teor de carbono fixo [%]	12,58	8,88
Massa específica a granel [kg/m ³] (base úmida)	359,04	SM1 = 228,18
		SM2 = 184,49
		SM3 = 274,83
Poder calorífico superior [kcal/kg]	4.465,37	4.532,95

Tomando-se como base o valor ideal para o teor de umidade das matérias-primas dos briquetes, entre 8 e 12%, os valores obtidos apresentaram-se expressivos, indicando a necessidade de secagem para atingir a umidade ideal, tornando a tecnologia de briquetagem mais dispendiosa. A Tabela B.1 do Apêndice B, apresenta os resultados do ensaio de teor de umidade dos resíduos utilizados na fabricação dos briquetes utilizados neste trabalho.

Os resultados dos teores de umidade dos resíduos empregados na fabricação dos briquetes estudados, apresentaram valores muito maiores que o limite apontado pela norma austríaca ONORM M 7135:2000.

O resíduo de semente de algodão apresentou valor superior à serragem de madeira, implicando em maior dispêndio de horas/homem de trabalho para a sua remoção dos cinzeiros. O expressivo teor de cinza dos resíduos agrícolas é esperado, e em parte, deve-se ao alto teor de sílica presente nesses substratos. Comparando estes teores de cinzas com o limite prescrito na norma ONORM M 7135:2000, que é de 0,5%, observa-se que eles estão bem acima do valor preconizado.

A porcentagem de matérias voláteis do resíduo da casca de semente de algodão está no intervalo entre 76 e 86% (base seca), estabelecido para biomassa vegetal, conforme mencionado na Seção 3. No entanto, a serragem de madeira apresentou valor superior ao do resíduo de semente de algodão e pouco acima do intervalo referido anteriormente.

Conforme mencionado na Seção 3, a quantidade de matérias voláteis influencia o comportamento de decomposição e a combustão do briquete produzido. Nesta caso, o resíduo de semente de algodão é mais adequado.

Quanto à massa específica a granel, observou-se que a serragem de madeira apresentou valor inferior a do resíduo de semente de algodão, podendo tornar seu custo de transporte mais oneroso e em conseqüência, tornar o briquete mais caro. Observa-se que o valor desta propriedade depende da granulometria e do teor de umidade. Como esse ensaio foi realizado com o material úmido, o teor de umidade, assim como o tamanho das partículas, influenciaram no resultado. A Tabela B.2, do Apêndice B, apresenta os resultados do ensaio de massa específica a granel dos resíduos utilizados na fabricação dos briquetes usados neste trabalho.

Conforme as Tabelas A.1 a A.4 do Apêndice A, e a Figura 5.2, a seguir, percebe-se que os resíduos SM3 e RA possuem dimensões menores que SM1 e SM3, fora dos limites recomendados por Grover; Mishra (1996). Disso decorre uma maior massa por unidade de volume, e conseqüentemente, maior massa específica a granel.

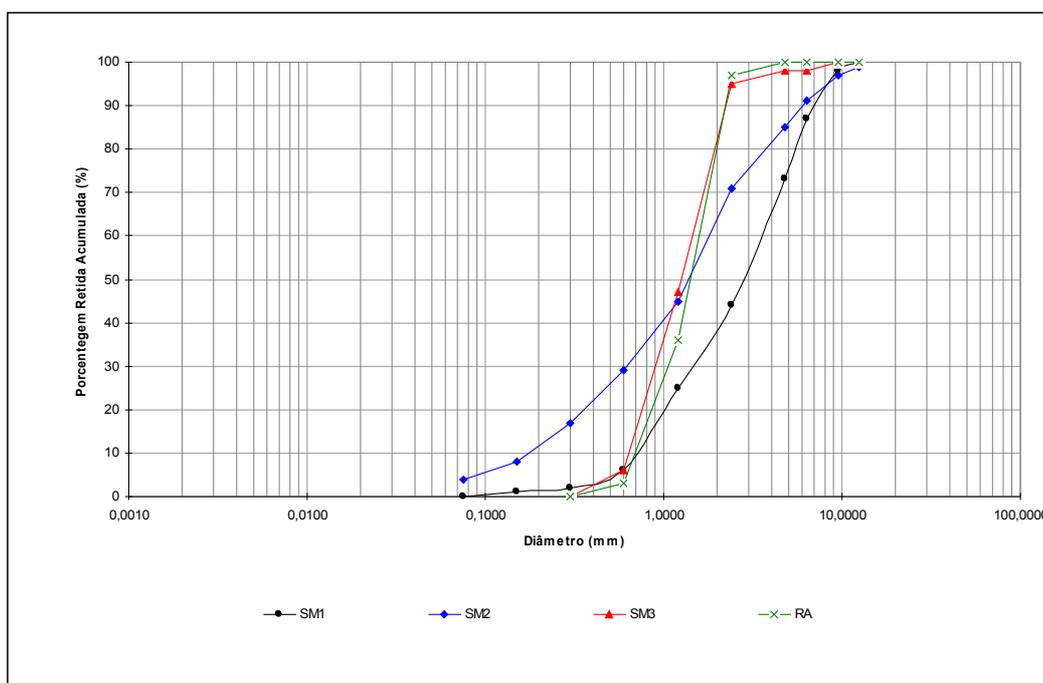


Figura 5.2 – Curvas granulométricas dos resíduos SM1, SM2, SM3 e RA, matérias-primas dos briquetes analisados.

No que se refere ao poder calorífico superior, todos os resíduos apresentaram valor próximo do poder calorífico superior da madeira, de acordo com a bibliografia consultada (ver Seção 2), entre 4500 e 5000 kcal/kg.

5.2 – DESCRIÇÃO DA INDÚSTRIA DE BRIQUETE E CARACTERIZAÇÃO DO BRIQUETE EM ESTUDO

5.2.1 – Descrição da indústria de briquete

Conforme às indústrias fabricantes de prensas de briquetagem no Brasil – Biomax Indústria de Máquinas Ltda., Irmãos Lipper & Cia Ltda. e Pelmec Indústria e Comércio de Máquinas e Equipamentos Ltda., no universo de estudo existe uma única fábrica de briquetes ligno-celulósicos, situada em Goianápolis, Estado de Goiás. A mesma tem capacidade para uma produção mensal de 900 toneladas de briquetes. Atualmente, produz em torno de 70% da capacidade prevista e seus briquetes tem como destino final indústrias do gênero alimentício do Distrito Federal e dos Estados de Goiás e Minas Gerais.

5.2.2 – Caracterização dos briquetes comerciais e da lenha de eucalipto

Os briquetes comerciais utilizados neste trabalho, fabricados pela indústria de briquete referida anteriormente, constituem-se por serragem de madeira e resíduo de semente de algodão, numa proporção equivalente a 75 e 25% do volume de massa prensada, respectivamente. Possuem diâmetros de 9,5 e 8,5 cm, sendo neste trabalho denominados por B9,5 e B8,5. Os comprimentos médios no primeiro mês após a sua fabricação variam entre (39 - 39,5)cm e (34,3 - 34,7)cm, respectivamente. A Figura 5.3 apresenta uma vista destes briquetes.



Figura 5.3 – Vista dos briquetes comerciais em estudo. a) seção transversal dos B9,5 e B8,5; b) briquetes de comprimentos entre 34,3 e 39,5 cm e; c) vista dos briquetes.

Primeiramente foi executada a caracterização dos briquetes comerciais descritos anteriormente e da lenha de eucalipto denominado no programa experimental de grupo de controle. A espécie de lenha de eucalipto utilizada foi a *urophylla*. Foram realizados ensaios de análise imediata, de massa específica a granel e aparente, de poder calorífico superior e de expansão longitudinal, conforme os procedimentos mencionados na Seção 4 deste trabalho. A seguir, são apresentados os resultados destes ensaio.

5.2.2.1 – Análise Imediata

- Teor de Umidade (TU)

A Figura 5.4 apresenta os valores para TU dos combustíveis analisados.

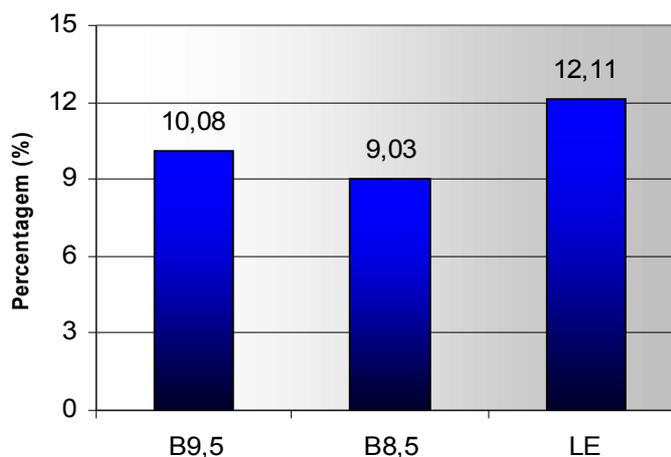


Figura 5.4 – Valores de TU dos combustíveis analisados

Conforme a Figura 5.4 observa-se que B9,5; B8,5 e LE registraram TU de 10,08%; 9,03% e 12,11%, respectivamente. O maior valor de TU ocorreu para LE e o menor para B8,5.

O TU varia dentro de uma ampla faixa de valores, em função da espécie vegetal, da época do corte e do tipo de armazenamento. O TU é uma das propriedades mais importantes dos combustíveis de biomassa, sendo que quanto maior, menor é a quantidade líquido de calor liberada na sua combustão, pois parte da sua energia é empregada para aquecer e vaporizar a água. Deste modo, o B8,5 tem maior potencial para combustão, ao contrário da LE que apresentou o maior TU, liberando portanto, quando queimada, uma menor quantidade de calor por quilo de lenha consumida.

Mesmo considerando o TU da LE um pouco superior ao TU de B9,5 e B8,5, adverte-se que aquele TU é diferente da realidade praticada na região de estudo, em indústrias que operam com lenha nativa recém-cortada com TU elevado. No estudo-piloto o autor deste trabalho registrou para a lenha nativa TU entre 22 e 64%.

Realizando o teste *Qui-Quadrado de Pearson* (como regra de decisão adotou-se que para o p-valor maior que 0,05 os resultados são provenientes de uma distribuição uniforme e portanto, equivalentes) obteve-se p-valor de 0,7901. Logo, conclui-se que os valores de TU dos combustíveis investigados são provenientes de uma distribuição uniforme e portanto, equivalentes.

As Tabelas C.1 a C.3 do Apêndice C, apresentam os resultados obtidos para TU dos combustíveis analisados.

- Teor de Matéria Volátil (MV)

A Figura 5.5 apresenta os valores para os MV dos combustíveis analisados.

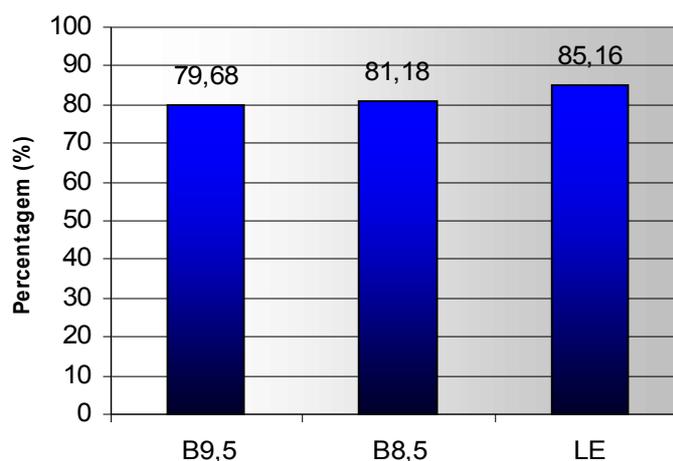


Figura 5.5 – Valores de MV dos combustíveis analisados

O menor e o maior MV foram registrados para o B9,5 e a LE, sendo 79,68% e 85,16 %, respectivamente. Para o B8,5 foi registrado um valor MV de 81,18%.

Conforme a Figura 5.5, observa-se que os MV dos combustíveis analisados atendem o limite mencionado na Seção 3 para biomassa vegetal, que é entre 76 e 86% (base seca). Também foi citado naquela seção, que o MV influencia o comportamento de combustão dos combustíveis sólidos. Deste modo, o B9,5 apresenta maior tempo de permanência na câmara de combustão, ao contrário da LE que oferece o menor.

Realizando o teste *Qui-Quadrado*, que registrou p-valor de 0,9068, conclui-se que os valores de MV dos combustíveis analisados são provenientes de uma distribuição uniforme e portanto, equivalentes.

As Tabelas C.4 a C.6 do Apêndice C, apresentam os resultados obtidos para MV dos combustíveis analisados.

- Teor de Cinza (CZ)

A Figura 5.6 apresenta os valores de CZ dos combustíveis analisados.

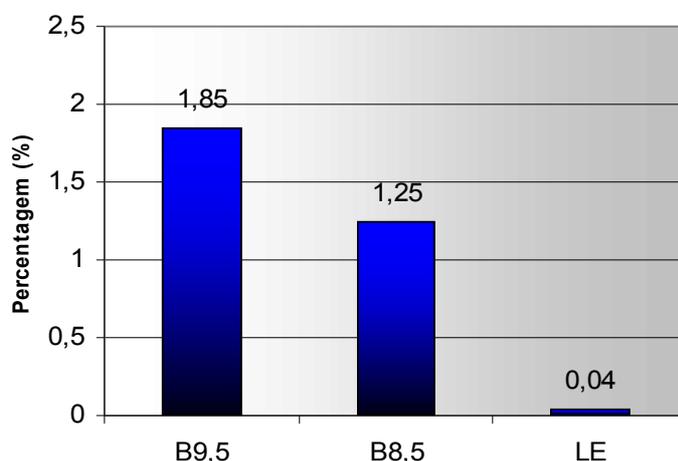


Figura 5.6 – Valores de CZ dos combustíveis analisados

Conforme a Figura 5.6, os valores de CZ dos combustíveis analisados foram 1,85%, 1,25% e 0,04%, para o B9,5 e B8,5 e para a LE, respectivamente. O maior teor de CZ foi registrado para B9,5 e o menor para a LE.

Conforme mencionado na Seção 2, a madeira como combustível industrial é atrativa pelo baixo valor de CZ. Assim sendo, LE foi o combustível que apresentou o menor valor de CZ. Embora os briquetes sejam produzidos da maior parte de serragem de madeira, na sua fabricação também foi adicionado resíduo de semente de algodão, o qual apresenta expressiva quantidade de sílica, originando elevados valores de CZ. Neste aspecto, LE apresenta o maior potencial para a combustão e B9,5 o menor.

Conforme a caracterização das matérias-primas dos briquetes analisados, o valor de CZ do resíduo composto por SM1, SM2 e SM3 foi de 2,1%, enquanto de RA foi 8,44%. Esperava-se que o CZ dos briquetes também apresentassem valores entre 2,1 e 8,44%, no entanto este fato não ocorreu, provavelmente em função de contaminação com outros materiais, como por exemplo a areia, ao contrário dos briquetes investigados.

Como nas demais análises, realizou-se o teste *Qui-Quadrado*, que acusou p-valor de 0,4439, conclui-se que os valores de CZ dos combustíveis estudados são provenientes de uma distribuição uniforme e portanto, equivalentes.

As Tabelas C.4 a C.6 do Apêndice C, apresentam os resultados do ensaio de CZ dos combustíveis analisados.

- Teor de Carbono Fixo (CF)

A Figura 5.7 apresenta os valores de CF para os combustíveis analisados.

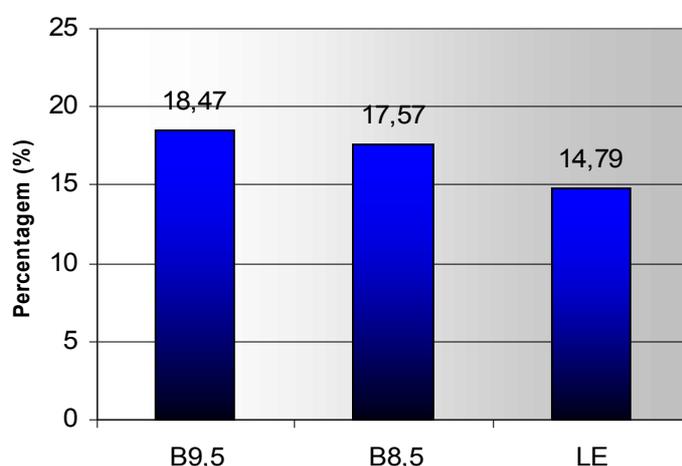


Figura 5.7 – Valores de CF dos combustíveis analisados

Conforme a Figura 5.7, os valores encontrados para CF são iguais a 18,47%, 17,57% e 14,79%, correspondendo ao B9,5; B8,5 e LE.

Conforme mencionado na Seção 2, dos constituintes da biomassa a serem empregada como combustível, o CF é o componente mais significativo, uma vez que combustíveis com alto teor de carbono fixo tem queima mais lenta e portanto, maior tempo de queima na sua combustão. Neste aspecto, o combustível mais vantajoso é o B9,5 e o pior LE.

Considerando que nas análises anteriores os MV e CZ apontaram valores equivalentes e que CF depende dos primeiros, esperava-se que o CF também fosse equivalente. Tal

hipótese foi confirmada aplicando-se o teste *Qui-Quadrado*, que acusou p-valor de 0,8048, aceitando a suposição que os CF dos combustíveis analisados são provenientes de uma distribuição uniforme e portanto, equivalentes.

5.2.2.2 – Massa específica

- Massa específica a granel (γ_g)

A Figura 5.8 apresenta o resultado obtido para γ_g para os combustíveis analisados.

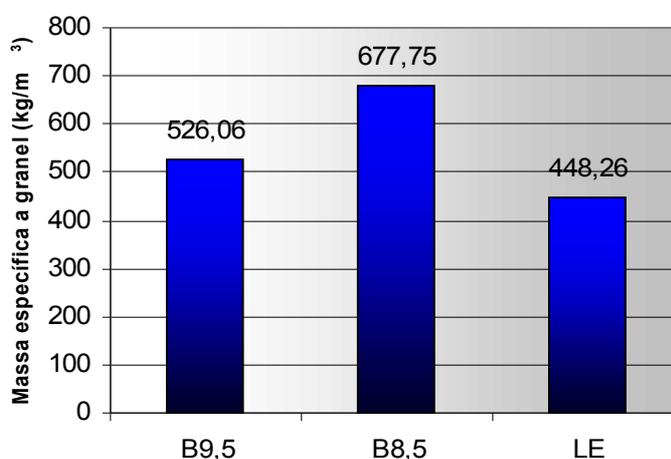


Figura 5.8 – Valores de γ_g dos combustíveis analisados

Da Figura 5.8, os valores de γ_g são iguais a 526,06 kg/m³; 677,75 kg/m³ e 448,26 kg/m³, para B9,5; B8,5 e LE, respectivamente.

Como a massa e o volume dos combustíveis variam em função do seu TU, adverte-se que os valores de γ_g registrados na Figura 5.8, foram obtidos para os TU apresentados no subitem 5.2.3.1. Porém, lenha com TU superior ao valor obtido neste trabalho origina γ_g inferior, conseqüentemente, conforme mencionado na Seção 2, menor quantidade de calor na sua combustão.

Para uma mesma massa de combustível a queima do B8,5 produz maior quantidade de calor, comparativamente ao B9,5 e LE, uma vez que aquele possui o menor TU.

Realizou-se o teste *Qui-Quadrado*, que acusou p-valor de 0,01, concluindo-se então, que há diferença significativa entre estes valores.

- Massa específica aparente (γ_A)

A Figura 5.9 apresenta os valores obtidos para γ_A dos combustíveis analisados.

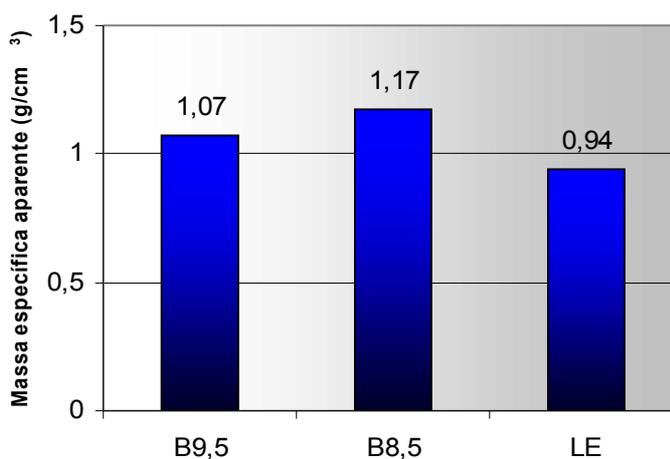


Figura 5.9 – Valores de γ_A dos combustíveis analisados

Da Figura 5.9, os valores de γ_A são iguais a 1,07 g/cm³; 1,17 g/cm³ e 0,94 g/cm³, respectivamente ao B9,5; B8,5 e LE.

Realizou-se o teste *Qui-Quadrado*, que acusou p-valor de 0,99, concluiu-se que não há diferença significativa entre estes valores, podendo-se considerar que os mesmos são equivalentes.

5.2.2.3 – Poder Calorífico

- Poder calorífico superior (PCS)

A Figura 5.10 apresenta os valores de PCS para os combustíveis analisados.

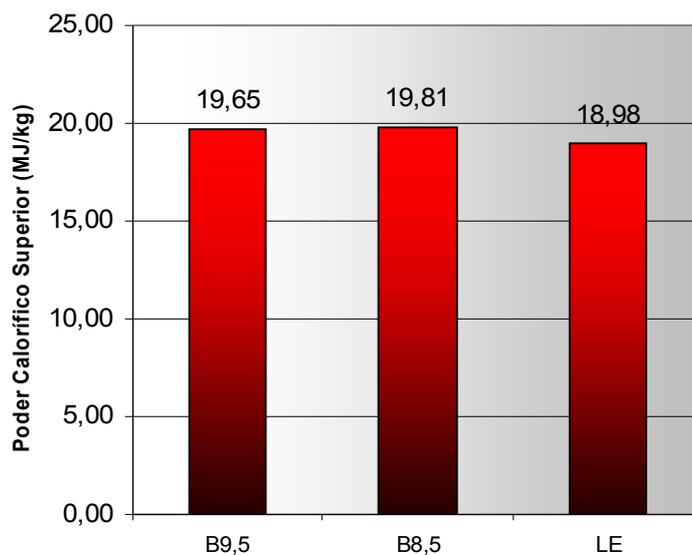


Figura 5.10 – Valores de PCS dos combustíveis analisados

Conforme a Figura 5.10, observa-se que B8,5 apresentou o maior valor do PCS e LE o menor. Utilizando-se o teste *Qui-Quadrado*, que apresentou p-valor de 0,1049, concluiu-se que não há diferença significativa entre esses valores.

As possíveis razões do pequeno acréscimo do PCS do B9,5 e B8,5, comparados a LE, são: a heterogeneidade da serragem de madeira que provém de diferentes espécies vegetais e os elementos constituintes do resíduo de semente de algodão, os quais contêm maior porcentagem de substâncias oleaginosas (extrativos).

- Poder calorífico inferior (PCI)

A Figura 5.11 apresenta os valores de PCI para os combustíveis analisados.

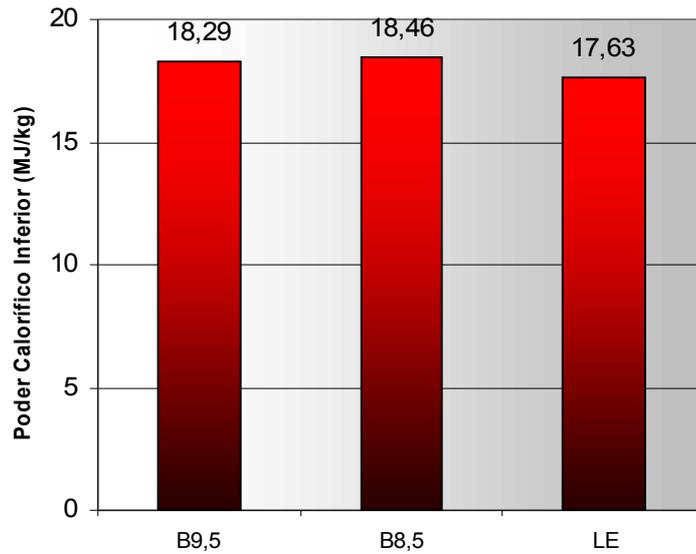


Figura 5.11 – Valores de PCI dos combustíveis analisados

Conforme a Figura 5.11, observam-se os valores do PCI dos combustíveis analisados, sendo que o B8,5 apresentou o maior valor e LE o menor. Conforme mencionado na Seção 2, quanto aos fatores que influenciam no PCI, um dos mais prejudiciais é o TU, pois quanto maior este requisito menor o PCI.

Para confirmar a hipótese de que há diferença significativa entre os valores de PCI dos combustíveis analisados, o teste *Qui-Quadrado* apontou p-valor 0,001, garantindo que os valores do PCI do B8,5 e da LE não eram provenientes da mesma distribuição uniforme, portanto, eram diferentes, ao contrário dos valores do PCI dos briquetes analisados que eram equivalentes.

- Poder calorífico líquido (PCL)

Conforme referido na Seção 4, o PCL foi determinado em função do PCI e do TU dos combustíveis analisados. A Figura 5.12 apresenta os valores de PCL dos combustíveis analisados.

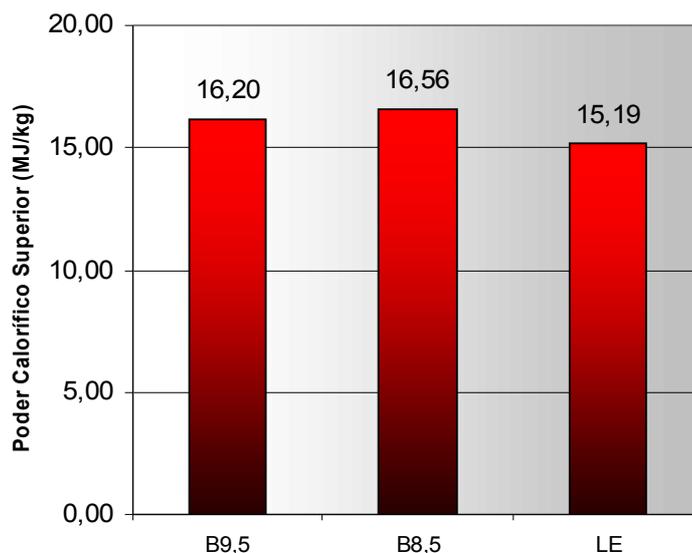


Figura 5.12 – Valores de PCL dos combustíveis analisados

Analisando-se a Figura 5.12, observa-se que o PCL de B9,5; B8,5 e LE foram de 16,20 MJ/kg; 16,56 MJ/kg e 15,19 MJ/kg, respectivamente. Nesta análise, o combustível que apresentou maior PCL foi o B8,5 e o menor LE.

Para confirmar a hipótese de que há diferença significativa entre os valores apresentados anteriormente, aplicou-se o teste *Qui-Quadrado*, que apontou p-valor 0,01, garantindo que os valores do PCL do B8,5 e da LE não eram provenientes da mesma distribuição uniforme, e portanto, eram diferentes, ao contrário dos valores do PCL dos briquetes analisados que eram equivalentes.

O PCL é determinado em função do PCI e do TU do combustível examinado. Como o PCI foi diferente, também esperava-se PCL diferente.

5.2.2.4 – Expansão longitudinal (ou deformação específica)

As Tabela D.1 e D.2 do Apêndice D, apresentam as medidas de comprimento do B8,5 e B9,5; respectivamente, ao longo do ensaio de deformação específica. As Figuras 5.13 e 5.14, a seguir, apresentam as curvas das variações dos comprimentos do B9,5 e B8,5, respectivamente, examinados ao longo de trinta dias após a sua extrusão.

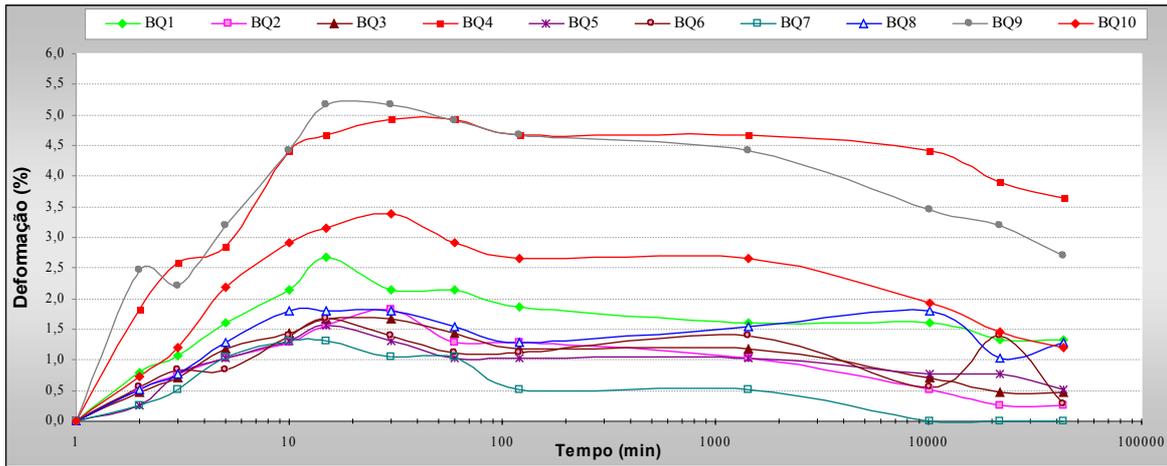


Figura 5.13 – Deformações longitudinais do B9,5.

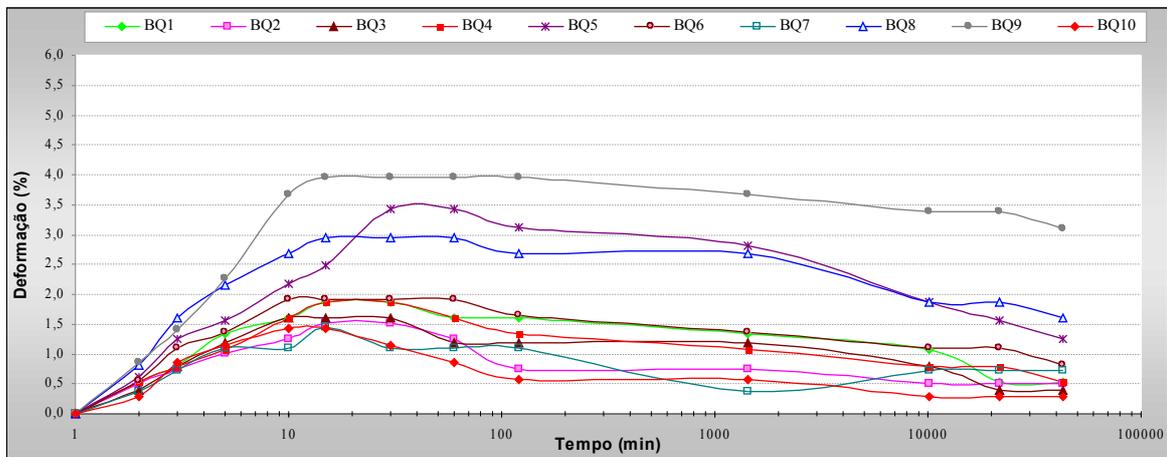


Figura 5.14 – Deformações longitudinais do B8,5.

Conforme os resultados obtidos para a deformação específica dos briquetes, observou-se que os comprimentos médios inicial e o máximo, no período das análises, foram de 39,0 e 40,0 cm, para amostras do B9,5; e de 34,3 e 35,0 cm, para amostras do B8,5. O menor e o maior aumento do comprimento para o B9,5 foram de 0,5 e 2,1 cm, respectivamente. Para o B8,5, estes valores foram de 0,4 e 1,4 cm. No entanto, percebeu-se uma variação no comprimento longitudinal dos briquetes ao longo deste experimento. Depois de 30 dias de sua fabricação, o aumento médio registrado foi de 1,02 cm (2,62%) para o B9,5 e 0,76 cm (2,22%) para o B8,5.

Conforme dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, no período deste ensaio, as temperaturas mínima e máxima foram 15,7 e 24,6°C e a umidade relativa – UR do ar variou entre 31 e 85%, resultando índices de deformações não uniformes. A maior UR do ar ocorreu no 6º dia de ensaio e a temperatura mínima foi registrada no 7º dia, quando os

corpos-de-prova já apresentavam redução de comprimento, sendo que na maioria deles esta redução progrediu até o 30º dia de ensaio.

Conforme mencionado na Seção 2, esta variação de comprimento é normal e ocorre em função da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar. Espontaneamente, o briquete atinge o equilíbrio higroscópico com o ambiente em seu entorno, sofrendo alterações na sua dimensão.

Corroborando com Wamukonya; Jenkins (1995), neste experimento as maiores deformações longitudinal ocorreram, também, nos primeiros minutos após a extrusão dos briquetes. O B8,5 proporcionou melhor desempenho que o B9,5. Logo, deve-se ter cuidado no transporte e armazenamento deste combustível, principalmente em depósitos que não admitam expansão do briquete.

As Tabela E.1 e E.2 no Apêndice E, apresentam as temperaturas ambiente e as umidades relativas do ar, respectivamente, no período do ensaio de expansão longitudinal dos briquetes estudados.

5.3 – COMPORTAMENTO DA COMBUSTÃO DOS BRIQUETES NA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS

Conforme a Seção 4, o processo de queima de blocos é constituído de três fases distintas: preaquecimento, queima e resfriamento. Neste trabalho foi analisada somente a queima, onde se utiliza o combustível em estudo, o briquete.

A indústria cerâmica selecionada opera com um forno contínuo tipo túnel, e utiliza lenha nativa como combustível para queima de blocos cerâmicos. Ao dar início à queima dos blocos a partir do briquete, imaginava-se que seria necessário realizar algum ajuste no forno, tais como trocar as grelhas dos queimadores e alteração da quantidade de oxigênio introduzido na câmara de combustão. No entanto, não foi necessário realizar nenhum ajuste.

5.3.1 – Consumo de energia

5.3.1.1 – Descrição do forno contínuo utilizado

O forno cerâmico selecionado neste trabalho foi o forno contínuo tipo túnel, situado em uma indústria de cerâmica vermelha, no município de Campo Limpo – Goiás. Este forno foi escolhido por proporcionar, conforme mencionado na Seção 4, menor consumo de combustível.

O forno contínuo tipo túnel é dividido em três zonas distintas: zona de preaquecimento, zona de queima (ou de temperatura máxima) e zona de resfriamento. A Figura 5.15, apresenta uma seqüência de fotos que ilustra o forno escolhido para analisar a combustão dos briquetes na fase de queima dos blocos.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.15 – Forno contínuo tipo túnel da indústria cerâmica estudo-de-caso. a) entrada da zona de preaquecimento; b) vista externa da zona de queima (queimadores) e; c) saída da zona de resfriamento.

A Tabela 5.3 apresenta as características do forno empregado para a queima dos blocos cerâmicos a partir do briquete.

Tabela 5.3 – Características do forno utilizado para queima dos blocos

CARACTERÍSTICAS DO FORNO CONTÍNUO TIPO-TÚNEL	
Comprimento da zona de preaquecimento (m)	57,00
Comprimento da zona de queima (m)	23,00
Comprimento da zona de resfriamento (m)	9,00
Altura interna máxima da zona de queima (m)	2,13
Largura interna da zona de queima (m)	1,45
Número de queimadores (unidade)	6

As Figuras F.1 a F.22 do Apêndice F, apresentam ilustrações das vagonetas versus tempo de deslocamento, nas zonas de preaquecimento e de queima do forno analisado, nas queima dos blocos a partir do B9,5; B8,5 e LE.

5.3.1.2 – Consumo de energia térmica

Neste trabalho considerou-se a análise da combustão do briquete somente na zona de queima (região do forno onde a temperatura de queima é máxima), conforme apresentado na Seção 4.

Os consumos médios dos combustíveis, para a queima de uma carga completa da zona de queima do forno em estudo, são apresentados na Figura 5.16.

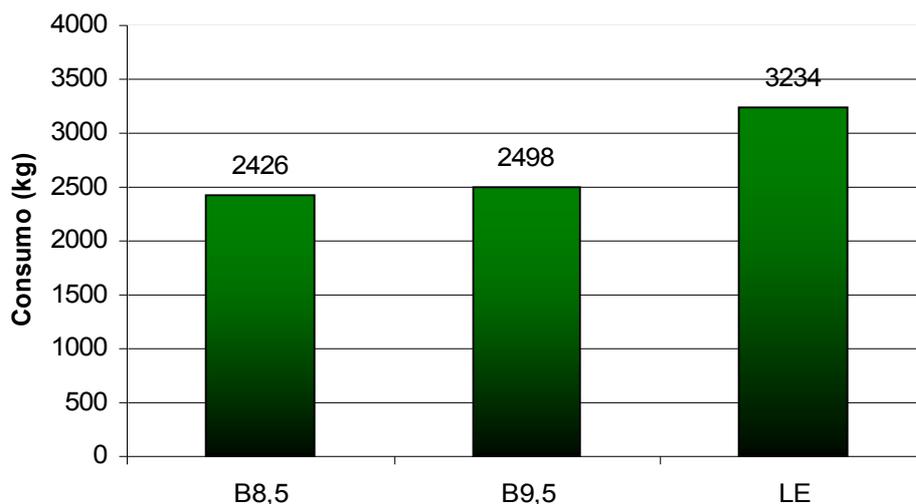


Figura 5.16 – Valores dos consumos médios dos combustíveis para queima de uma carga completa de blocos na zona de queima do forno.

Da Figura 5.16 tem-se que, para queimar a mesma quantidade de blocos, isto é, a carga completa da zona de queima do forno, em torno de 7.300 blocos, a LE apresentou o consumo mais expressivo e o B8,5 o menor. O consumo de LE foi superior aos de B8,5 e B9,5, cerca de 23% e 25%, respectivamente.

Como nas demais análises, aplicou-se o teste de Mann-Whitney (Wilcoxon), que apontou p-valor na fronteira de decisão da aceitação da hipótese. Sendo assim, procedeu-se a verificação do teste dois a dois, ou seja, inicialmente testando-se os consumos de LE e B8,5 e em seguida os consumos de LE e B9,5. Deste modo, para a primeira comprovação, o teste acusou p-valor de 0,0404, admitindo diferença entre os consumos de LE e B8,5. Aplicado-se o teste para os consumos de LE e B9,5, também concluiu-se que os valores não eram provenientes da mesma distribuição uniforme, e portanto, diferentes.

Um fato que influenciou nos resultados obtidos para o consumo dos combustíveis foi a impossibilidade de um controle mais rigoroso dos operadores do forno. Não foi possível trabalhar com um único operador, devido a fase de queima de blocos ser relativamente demorada. Embora o forno possuísse um controlador eletrônico de temperatura, o tempo de acrescentar uma nova carga de combustível nos queimadores foi variável, ficando a critério dos operadores.

A Figura 5.17 apresenta a combustão do B9,5 e da LE na queima dos blocos na indústria cerâmica estudo-de-caso.

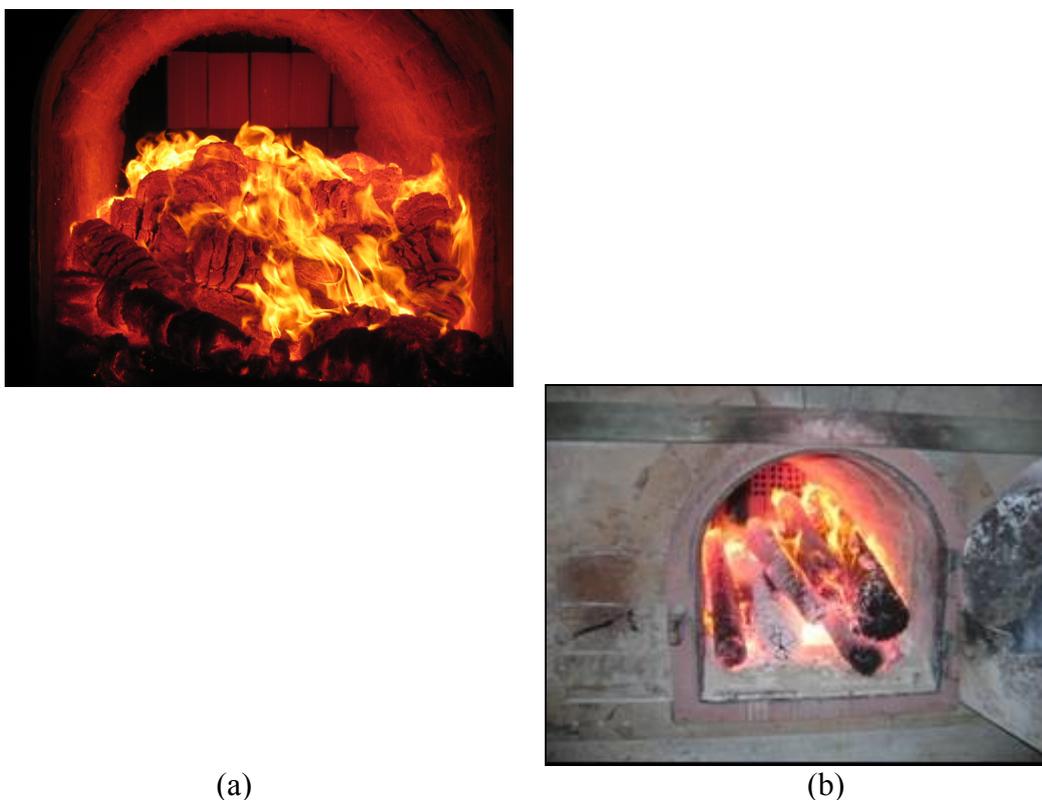


Figura 5.17 – Combustão do B9,5 e da LE na queima dos blocos na indústria cerâmica estudo-de-caso. a) combustão do B9,5 e; b) combustão da LE.

A Tabela 5.4 apresenta os consumos de B9,5; B8,5 e LE na fase de queima no forno analisado, para um milheiro de blocos.

Tabela 5.4 – Consumo de B9,5; B8,5 e LE na fase de queima dos blocos

FORNO CONTÍNUO TIPO TÚNEL			
CAPACIDADE DA ZONA DE QUEIMA (milheiro)	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL (kg/1000 blocos)		
	B9,5	B8,5	Lenha de eucalipto
7,3	342	332	443

A Tabela 5.5 apresenta dados das vagonetas utilizadas na queima dos blocos.

Tabela 5.5 – Dados das vagonetas usadas na queima dos blocos

ESPECIFICAÇÃO	TIPO DE VAGONETA	
	VAGONETA _{L=1,50 m}	VAGONETA _{L=1,60 m}
Capacidade (nº de blocos)	480	500

Tempo de entrada total no forno (h)	29 min + 12 s	31 min + 9 s
Tempo para atravessar a zona de preaquecimento	18 h + 30 min	18 h + 30 min
Tempo para atravessar a zona de queima	7 h + 28 min	7 h + 28 min

As Figuras F.1 a F.22 do Apêndice F, apresentam os comprimentos da vagonetas utilizadas na queima dos blocos e os respectivos tempo para cruzarem as zonas de preaquecimento e queima do forno, ao longo das queimas a partir de B9,5; B8,5 e LE. As Tabelas I.1 e I.8 do Apêndice I, também apresentam os registros das vagonetas ao longo do ciclo de queima dos blocos cerâmicos.

5.3.1.3 – Temperaturas na câmara de queima dos blocos

Foram realizadas leituras das temperaturas máximas e mínimas para cada carga de combustível inserida no forno. Para cada ação de alimentação de combustível nos seis queimadores, considerou-se uma carga de combustível do forno analisado.

Foi registrada a maior temperatura máxima média para a LE e a menor para o B9,5. A Figura 5.18 apresenta as temperaturas médias máxima e mínima por combustível.

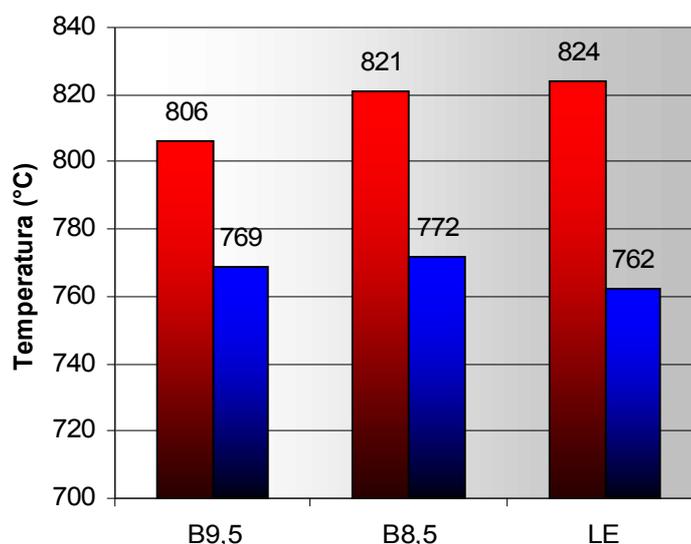


Figura 5.18 – Valores de temperaturas médias máximas e mínimas por combustível

As temperaturas máximas médias registradas na fase de queima dos blocos foram: 824°C, 821°C e 806°C, para LE; B8,5 e B9,5, respectivamente. As temperaturas mínimas médias para a mesma seqüência foram: 762°C, 772°C e 769°C.

As temperaturas máximas de queima obtidas no processo de queima dos blocos neste trabalho não atendem os limites recomendados para a queima de blocos cerâmicos, de 950°C, 1200°C e 1400°C, para argilas do grupo das ílíticas, caulínicas e montmoriloníticas, respectivamente. Conforme as análises mineralógicas apresentadas nas Figuras K.1 e K.2, no Apêndice K, as argilas dos blocos queimados com briquete e com lenha tinham como maior constituinte a caulinita, que exige no processo de queima temperatura mínima de 1200°C, bem superior das registradas neste trabalho.

A Figura 5.19 apresenta a evolução das temperaturas máximas e mínimas da fase de queima dos blocos a partir do B8,5 e LE, com o mesmo operador do forno.

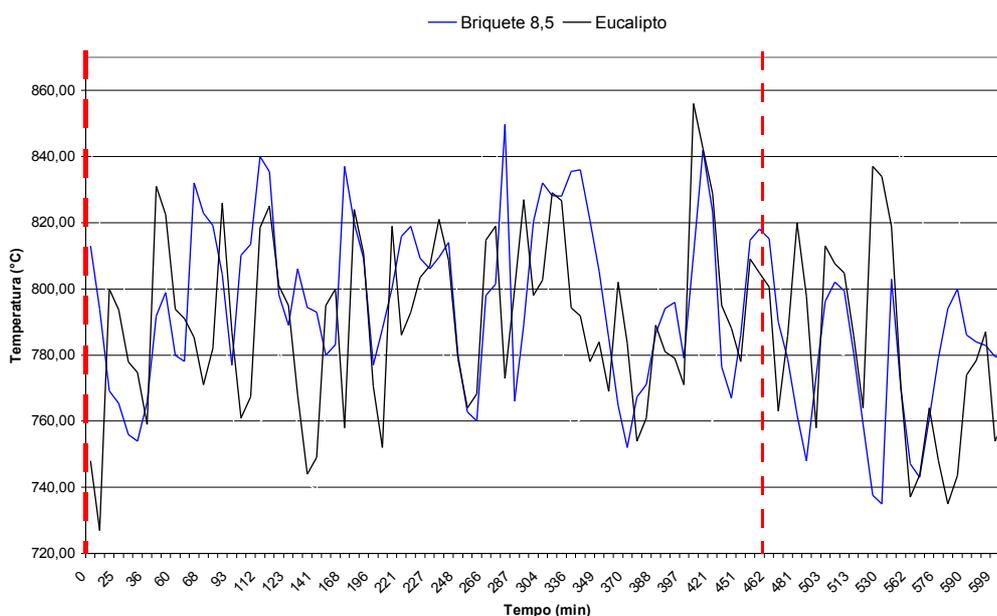


Figura 5.19 – Evolução da temperatura de queima (máxima e mínima) a partir da combustão do B8,5 e LE.

No intervalo entre as linhas tracejadas da Figura 5.19, monitorando a queima dos blocos com um operador do forno, foram registradas as temperaturas máximas e mínimas para as cargas de combustíveis do forno a partir do B8,5 e LE. A maioria das temperaturas máximas foram obtidas na queima dos blocos com o B8,5. Conforme pode ser observado pela Figura 5.20, que apresenta uma estimativa das diferenças das temperaturas máximas que ocorreram entre B8,5 e LE.

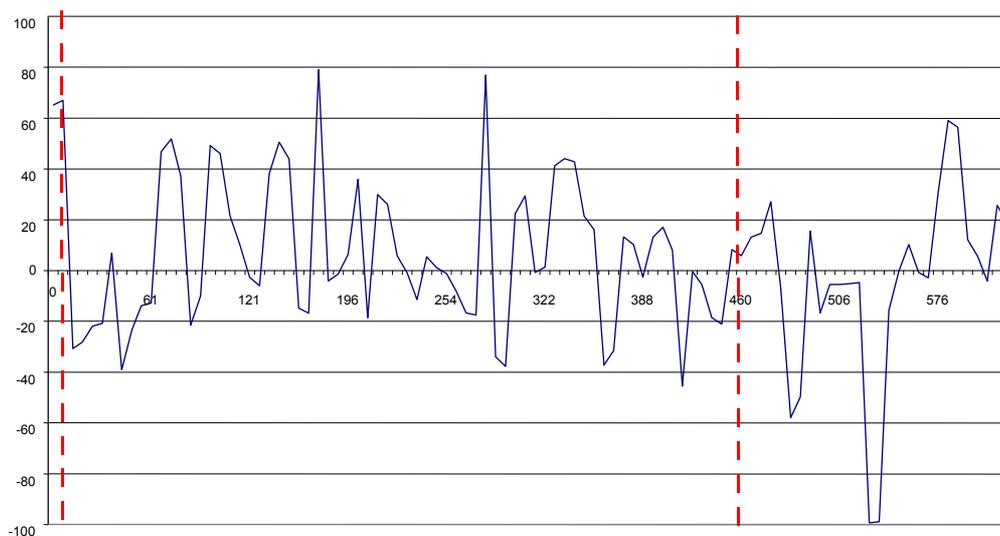


Figura 5.20 – Diferenças entre as temperaturas máximas da fase de queima dos blocos queimados a partir do B8,5 e LE.

Entre as linhas verticais tracejadas da Figura 5.21, está o período em que foi monitorado a queima dos blocos com um único operador do forno, quando foram registradas as temperaturas máximas da queima dos blocos com B8,5 e LE. As curvas acima do eixo que passam pelo ponto zero foram obtidas da diferença entre as temperaturas máximas da queima com B8,5 e LE, para o mesmo intervalo, observando-se valores maiores na queima a partir do B8,5. As médias das temperaturas para B8,5 e LE foram de, aproximadamente, 800°C e 793°C, respectivamente.

Outra comprovação de que a temperatura máxima na câmara de queima dos blocos foi superior com a utilização do B8,5, comparado à LE, foi o monitoramento do tempo de funcionamento das ventoinhas, conforme apresentado no subitem 5.3.1.4.

As Tabelas G.1 a G.9 do Apêndice G, apresentam as temperaturas máximas e mínimas na câmara de queima dos blocos, ao longo da fase de queima a partir de B9,5 e B8,5 e LE, após cada carga de combustível.

5.3.1.4 – Consumo da energia elétrica

O forno contínuo em estudo possui: um exaustor, um empurrador de vagoneta e duas ventoinhas, os quais funcionavam a partir de energia elétrica.

Como o combustível predominante, nas indústrias de cerâmica vermelha da região em estudo, é a lenha nativa, geralmente estas empresas utilizam, para diminuir o tamanho das toras de madeira, um equipamento denominado rachador de lenha (ou guilhotina), conforme apresentada na Figura 5.21.



(a) (b)
Figura 5.21 – Rachadores de lenha utilizados nas indústrias de cerâmica vermelha. a) rachador de eixo vertical e; b) rachador de eixo horizontal.

Durante a fase de queima dos blocos, o rachador de lenha de eixo horizontal e as ventoinhas funcionaram em tempo parcial e o exaustor funcionou em tempo integral. Quanto às ventoinhas, estas foram programadas para funcionarem até um determinado limite da temperatura da câmara de queima do forno, equivalente a 812°C.

A Figura 5.22 apresenta uma vista do empurrador de vagoneta utilizado na indústria cerâmica estudo-de-caso.

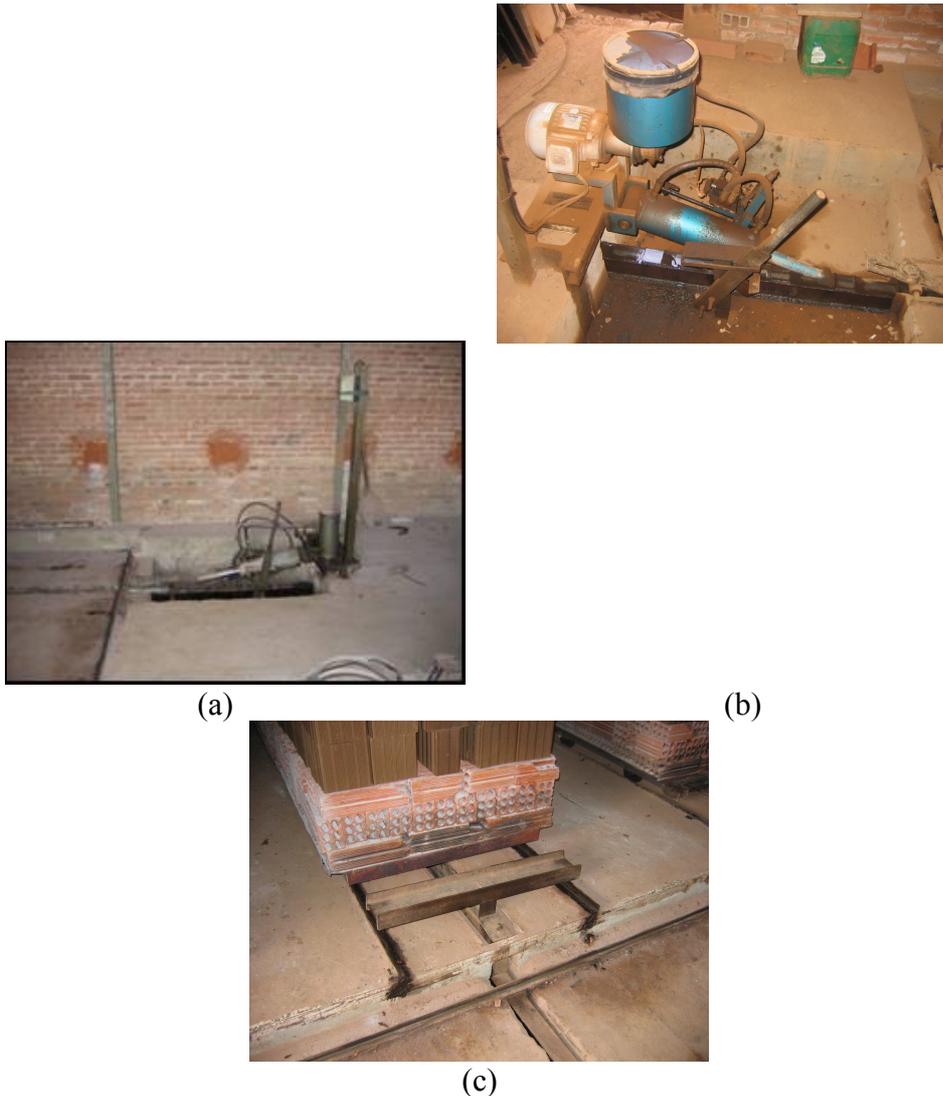


Figura 5.22 – Empurrador de vagonetas da indústria cerâmica estudo-de-caso: a) vista lateral; b) pistão hidráulico e; c) dispositivo empurrador. Os seis queimadores do forno analisado localizam-se nas laterais da zona de queima, totalizando três queimadores em cada lateral, com instalação de uma ventoinha para cada três queimadores, conforme Figura 5.23, a seguir.



(a).....(b)

Figura 5.23 – Sistema de alimentação de oxigênio nos queimadores: a) ventoinha com ramal de alimentação do oxigênio e; b) conjunto de queimadores e ventoinha.

A Tabela 5.6 apresenta o tempo de funcionamento dos equipamentos auxiliares empregados na fase de queima dos blocos.

Tabela 5.6 – Tempo de funcionamento dos equipamentos auxiliares empregados na fase de queima dos blocos

EQUIPAMENTO	POTÊNCIA (CV)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS PARA A QUEIMA DE UMA CARGA COMPLETA DA ZONA DE QUEIMA (h/7300 blocos)	
Empurrador de vagonetas (x 1)	2	Queima com B9,5	4 h + 36 min
		Queima com B8,5	4 h + 36 min
		Queima com LE	4 h + 36 min
Exaustor (x 1)	7	Queima com B9,5	14 h + 56 min
		Queima com B8,5	14 h + 56 min
		Queima com LE	14 h + 56 min
Ventoinha (x 2)	1	Queima com B9,5	11 h + 22 min
		Queima com B8,5	9 h + 19 min
		Queima com LE	9 h + 38 min
Rachador de lenha (x 1)	2	Queima com LE	4 h

Conforme a Tabela 5.6, o empurrador de vagoneta e o exaustor apresentaram tempos de funcionamento constantes, sendo, no caso do primeiro, justificado pela velocidade de

deslocamento das vagonetas ao atravessarem as zonas do forno e, do segundo, em função do seu funcionamento em tempo integral, durante toda a fase de queima. O rachador de lenha funcionou 2 horas no período da manhã e 2 horas no período da tarde. Conforme apresentado na Tabela 5.6, este equipamento só foi considerado na queima com LE. Opostamente, as ventoinhas apresentaram tempos de funcionamento diferentes, pois foram programadas para funcionarem até certo limite da temperatura da câmara de queima, sendo automaticamente desativadas quando a temperatura ultrapassava 812°C.

Da Tabela 5.6, os tempos de energia elétrica consumida foram 30h e 54min; 28h e 51min e 33h e 10min, na fase de queima dos blocos a partir do B9,5; do B8,5 e da LE, respectivamente. De acordo com esta análise o menor consumo foi com o B8,5 e o maior com a LE.

As Tabelas H.1 a H.9 do Apêndice H, apresentam os tempos de funcionamento das ventoinhas, ao longo do ciclo de queima dos blocos, a partir de B9,5; B8,5 e LE.

5.3.1.5 – Consumo de mão-de-obra

Ao contrário da lenha, que geralmente necessita ser dividida em tamanhos menores e transportada para próxima aos queimadores, o briquete ligno-celulósico ao chegar na indústria cerâmica pode ser diretamente aplicado.

A indústria cerâmica estudo-de-caso emprega três operários na fase de queima dos blocos, a saber: um rachador de lenha, um transportador de lenha e um operador do forno.

A Figura 5.24 apresenta as atividades que empregam mão-de-obra na fase de queima dos blocos a partir de lenha.



Figura 5.24 – Mão-de-obra empregada na queima dos blocos cerâmicos a partir de lenha.
a) rachador de lenha; b) carregador de lenha; e d) operador do forno.

A Tabela 5.7 apresenta o consumo de mão-de-obra empregado na fase de queima dos blocos.

Tabela 5.7 – Consumo de mão-de-obra empregada na queima dos blocos a partir da LE

MÃO-DE-OBRA	CONSUMO PARA QUEIMA DE UMA CARGA COMPLETA DA ZONA DE QUEIMA (h/7300 blocos)
Rachador de lenha	14 h + 56 min
Transportador de lenha	14 h + 56 min
Operador do forno	14 h + 56 min

A Figura 5.25, a seguir, apresenta uma vista do único operário usado na queima dos blocos a partir de briquetes ligno-celulósicos.



Figura 5.25 – Mão-de-obra (operador do forno) empregada na queima dos blocos a partir de briquetes

5.4 – ANÁLISE ENERGÉTICO-ECONÔMICA DA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS

A análise energético-econômica compreende a avaliação da fase de queima dos blocos, em função do consumo de energia (térmica, elétrica e mão-de-obra), quantificado no item 5.3 e também nos preços dos combustíveis, da energia elétrica e da mão-de-obra consumidos na fase de queima dos blocos a partir de B9,5; B8,5 e LE.

Para melhor entendimento desta análise, são apresentadas, a seguir, as análises energética e econômica da fase de queima dos blocos.

5.4.1 – Análise energética

A seguir, são apresentados os consumos de energia em kW e da mão-de-obra em hora.

5.4.1.3 – Participação da energia térmica

A Tabela 5.8, a seguir, apresenta os valores da energia térmica consumida para a queima de mil blocos.

Tabela 5.8 – Consumo de energia térmica para queima de mil blocos

COMBUSTÍVEL	CONSUMO DE ENERGIA TÉRMICA (MJ/1000 blocos)
B9,5	5542
B8,5	5504
LE	6728

Conforme a Tabela 5.8, para a queima de um milheiro de blocos cerâmicos com B9,5; B8,5 e LE, foram consumidos 5542 MJ, 5504 MJ e 6728 MJ, respectivamente.

O menor consumo de energia térmica foi apontado na queima dos blocos com o B8,5 e o mais expressivo com LE. Portanto, referente ao aspecto energético dos blocos, observa-se que o processo de queima com briquetes de resíduos ligno-celulósicos é uma alternativa viável, comparado à LE.

5.4.1.2 – Participação da energia elétrica

Para a estimativa do consumo da energia elétrica na fase de queima dos blocos, foram levantados dados dos equipamentos elétricos usados nesta fase, incluindo o seu tempo de funcionamento, em horas (item 5.3.1.4) e o consumo de energia elétrica destes equipamentos, em kW.

A Tabela 5.9 apresenta o consumo de energia elétrica e o consumo de energia elétrica total por equipamento utilizados na fase de queima dos blocos.

Tabela 5.9 – Consumo de energia elétrica por equipamentos na fase de queima dos blocos

CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS				
EQUIPAMENTO	POTÊNCIA DO MOTOR (CV)	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR EQUIPAMENTO (kWh)	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS (kWh/1000 blocos)	
Empurrador de vagoneta	2	1,47	B 9,5	0,93
			B 8,5	0,93
			LE	0,93
Exaustor	7	5,15	B 9,5	10,54
			B 8,5	10,54
			LE	10,54
Ventoinha (x 2)	1	0,75	B 9,5	2,34
			B 8,5	1,91
			LE	1,98
Rachador de lenha	2	1,47	LE	0,81
Consumo total na queima com B9,5 = 13,81 kWh/1000 blocos				
Consumo total na queima com B8,5 = 13,38 kWh/1000 blocos				
Consumo total na queima com LE = 14,26 kWh/1000 blocos				

As mesmas considerações apresentadas no subitem 5.3.1.5, referentes ao tempo de funcionamento dos equipamentos usados na queima dos blocos são ponderadas para o consumo total de energia elétrica apresentados na Tabela 5.9. O empurrador de vagonetas e o exaustor apresentaram tempo de funcionamento constante na queima a partir do B9,5; B8,5 e LE. Porém, as ventoinhas eram desativadas para temperatura superior a 812°C, ocasionando tempos de funcionamentos variados. O rachador de lenha foi empregado somente na queima com LE.

Da Tabela 5.9, observa-se que foram consumidos na queima dos blocos a partir do B9,5; do B8,5 e LE; 13,81 kWh; 13,38 kWh e 14,26 kWh, respectivamente. O menor consumo de energia elétrica foi obtido com B8,5 e o maior com LE.

5.4.1.3 – Participação da mão-de-obra

Conforme mencionado no subitem 5.3.1.5, foram empregados três operários na fase de queima dos blocos a partir de LE. Porém, na queima a partir do B9,5 e do B8,5 só foi empregado o operador do forno, uma vez que o briquete chega na indústria pronto para utilização.

A Tabela 5.10 apresenta o consumo de mão-de-obra para a queima de 1000 blocos cerâmicos.

Tabela 5.10 – Consumo de mão-de-obra para a queima de 1000 blocos

MÃO-DE-OBRA	CONSUMO PARA A QUEIMA DE 1000 BLOCOS (h)	
	B9,5 ou B8,5	LE
Rachador de lenha	–	2,04
Transportador de lenha	–	2,04
Operador do forno	2,04	2,04

5.4.2 – Análise econômica

Conforme apresentado a seguir, nesta análise são contabilizados os custos da energia térmica, da energia elétrica e da mão-de-obra empregados na fase de queima dos blocos.

5.4.2.1 – Participação da energia térmica

No período da realização deste trabalho, os preços de mercado de um quilograma de briquete e de lenha de eucalipto foram: R\$ 0,31 e R\$ 0,16, respectivamente. A Tabela 5.11 apresenta os custos da energia térmica para queimar 1000 blocos, a partir dos preços de mercado destes combustíveis.

Tabela 5.11 – Custos da energia térmica na fase de queima para 1000 blocos

COMBUSTÍVEL	CUSTO DA ENERGIA TÉRMICA, COM BASE NO VALOR DE MERCADO DO COMBUSTÍVEL (R\$)
B9,5	106,02
B8,5	102,92
LE	70,88

Observando-se a Tabela 5.11, o custo da energia térmica para a queima de mil blocos a partir do B9,5; do B8,5 e da LE foram: R\$ 106,02; R\$ 102,92 e R\$ 70,88, respectivamente. Para queimar um milheiro de blocos cerâmicos com LE o custo foi de, aproximadamente, 31% e 33% mais lucrativo comparativamente aos com B8,5 e B9,5, respectivamente. Este aumento dos custos da queima com briquetes tem como justificativa, o seu alto preço de

mercado na região em estudo. Porém, este valor pode ser reduzido, em função da sua maior disponibilidade e do contrato firmado entre as partes interessadas.

5.4.2.2 – Participação da energia elétrica

O custo da energia elétrica foi determinado com base no tempo de funcionamento dos equipamentos usados na queima dos blocos, conforme apresentado no item 5.3.1.4, e em função da tarifa do kWh cobrada pela Companhia de Energia Elétrica da região em estudo. A Tabela 5.12 apresenta estes custos.

Tabela 5.12 – Custo da energia elétrica dos equipamentos utilizados na queima dos blocos

EQUIPAMENTO AUXILIAR	CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA (R\$/1000 blocos)	
	Empurrador de vagoneta	B9,5
B8,5		0,42
LE		0,42
Exaustor	B9,5	4,74
	B8,5	4,74
	LE	4,74
Ventoinha (x 2)	B9,5	1,05
	B8,5	0,86
	LE	0,89
Rachador	LE	0,36
Custo total da queima de 1000 blocos com B9,5 = R\$ 6,21		
Custo total da queima de 1000 blocos com B8,5 = R\$ 6,02		
Custo total da queima de 1000 blocos com LE = R\$ 6,41		

Da Tabela 5.12, os custos totais da energia elétrica consumida pelos equipamentos na queima de um milheiro de blocos a partir do B9,5; B8,5 e LE, foram: R\$ 6,21; R\$ 6,02 e R\$ 6,41, respectivamente. O menor custo foi obtido com B8,5 e o maior com LE.

5.4.2.3 – Participação da mão-de-obra

O custo da mão-de-obra foi determinado pelo produto das horas de trabalho consumidas (item 5.4.1.3) e o preço da hora de trabalho de cada operário empregado na fase de queima dos blocos.

A Tabela 5.13 apresenta os preços, em hora, da mão-de-obra empregada na fase de queima dos blocos.

Tabela 5.13 – Preço da mão-de-obra empregada na fase de queima dos blocos

MÃO-DE-OBRA	PREÇO (incluindo leis sociais) (R\$/h.)
Operador do forno	2,70
Rachador de lenha	2,32
Transportador de lenha	2,32

A Tabela 5.14 apresenta o custo da mão-de-obra para a queima de 1000 blocos com os combustíveis analisados.

Tabela 5.14 – Custo da mão-de-obra na fase de queima dos blocos

MÃO-DE-OBRA	CUSTO (R\$/1000 blocos)		
	B9,5	B8,5	LE
Rachador de lenha	–	–	4,73
Transportador de lenha	–	–	4,73
Operador do forno	5,51	5,51	5,51
TOTAL =	5,51	5,51	14,97

Da Tabela 5.14, observa-se que o processo de queima dos blocos que apresentou maior custo com mão-de-obra foi a partir de LE. No entanto, a queima com B9,5 e B8,5 apresentaram valores equivalentes.

Dos custos incidentes na fase de queima dos blocos, obtiveram-se os custos totais para cada combustível investigado, a partir do somatório do custo da energia térmica, do custo da energia elétrica e do custo da mão de obra. A Tabela 5.15, a seguir, apresenta o custo total da fase de queima dos blocos.

Tabela 5.15 – Custos totais da fase de queima de 1000 blocos

ENERGIA CONSUMIDA NA FASE DE QUEIMA DOS BLOCOS
(R\$/1000 blocos)

COMBUSTÍVEL	ENERGIA TÉRMICA	ENERGIA ELÉTRICA	MÃO-DE- OBRA	TOTAIS
B9,5	106,02	6,21	5,51	117,74
B8,5	102,92	6,02	5,51	114,45
LE	70,88	6,41	14,97	92,26

Conforme a Tabela 5.15, os custos totais da queima de 1000 blocos, considerando-se os preços de mercado do B9,5; do B8,5 e da LE e os custos da energia elétrica e mão-de-obra, foram: R\$ 117,74; R\$ 114,45 e R\$ 92,26, respectivamente. Observa-se que o custo da queima dos blocos a partir da LE é, aproximadamente, 22% e 19% menor do que com B9,5 e B8,5, respectivamente.

As Tabelas I.1 a I.8, apresentam registros das jornadas de trabalho dos operadores do forno, ao longo da queima dos blocos cerâmicos, a partir de B9,5; B8,5 e LE.

5.5 – DESEMPENHO DOS BLOCOS QUEIMADOS COM BRIQUETE E LENHA DE EUCALIPTO

5.5.1 – Caracterização da argila

5.5.1.1 – Análise Granulométrica

A Figura 5.26 apresenta as curvas granulométricas das argilas utilizadas na fabricação dos blocos produzidos com briquete e com lenha de eucalipto, respectivamente.

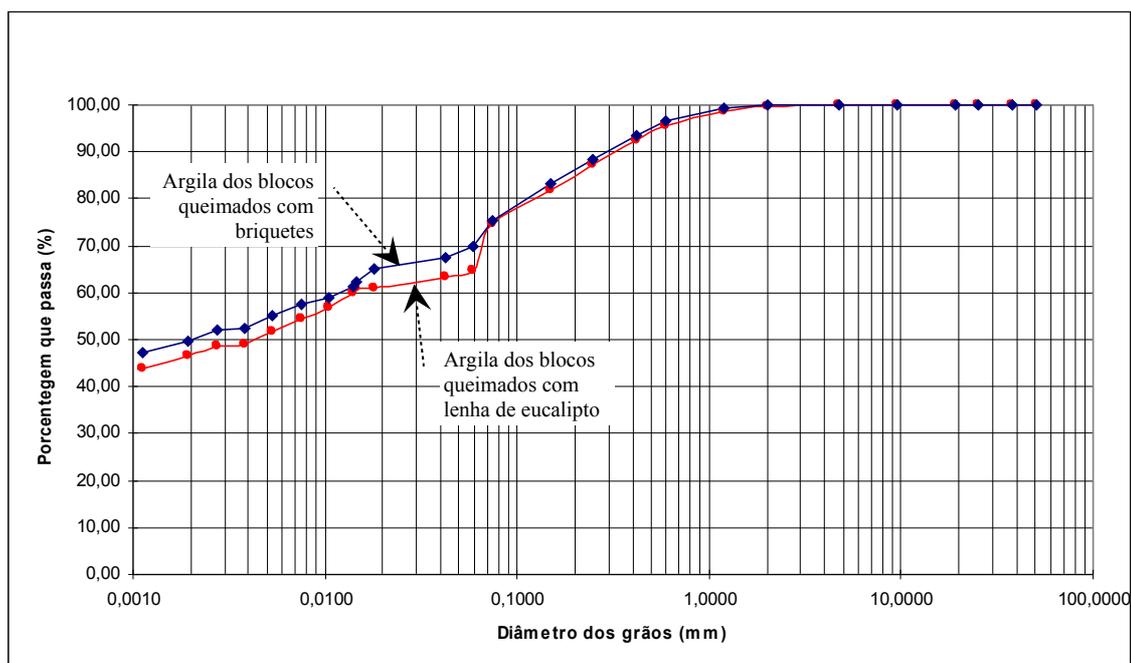


Figura 5.26 – Curvas granulométricas das argilas dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto.

Observando-se a Figura 5.26, bem como a Tabela J.1 do Apêndice J, percebe-se que as curvas granulométricas das argilas dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto são equivalentes. Isso foi confirmado pelo teste de Mann-Whitney (Wilcoxon), que registrou p-valor igual a 0,5.

5.5.1.2 – Índices de consistência (ou Limites de Atterberg)

A Tabela 5.16 apresenta os valores destes índices para as argilas analisadas.

Tabela 5.16 – Limites de liquidez (LL), de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP), das argilas analisadas

ARGILA DOS BLOCOS QUEIMADOS COM BRIQUETE		ARGILA DOS BLOCOS QUEIMADOS COM LENHA DE EUCALIPTO	
LL (%)	LP (%)	LL (%)	LP (%)
49	28	55	31
IP = 21		IP = 24	

Conforme mencionado na Seção 3, para índice de plasticidade entre 15% e 35%, as argilas podem ser classificadas como altamente plásticas. Desse modo, os valores apresentados na Tabela 5.16 indicaram que, tanto as argilas dos blocos queimados com briquetes, como as dos blocos queimados com lenha de eucalipto, são altamente plásticas.

Ainda, conforme mencionado na Seção 3, quanto maior o limite de liquidez, mais compressíveis são as argilas. Assim sendo, a argila dos blocos queimados com lenha de eucalipto apresentou limite de liquidez superior à dos blocos queimados com briquete. Portanto, com base nessa característica, os blocos queimados com lenha de eucalipto deviam ser menos porosos e apresentar menor índice de absorção de água, comparados aos queimados com briquete. Posteriormente, na apresentação dos resultados referentes a estas propriedades, esses fatos são novamente analisados.

Além disso, os índices de consistência indicam a influência das partículas finas no comportamento dos materiais argilosos. A razão entre o índice de plasticidade e a quantidade de argila presente, em peso, classifica um material argiloso quanto ao seu índice de atividade. Portanto, de acordo com os valores dos índices de consistência descritos na Tabela 5.16, as duas argilas dos blocos foram classificadas como argilas inativas.

5.5.1.3 – Composição mineralógica

- Identificação macroscópica das amostras

As duas argilas apresentaram coloração marrom escura, com granulometria que variou de areia média à argila. A argila do bloco queimado com briquete apresentou porções mais claras e alguns torrões com coloração esbranquiçada.

- Identificação por difração de raios-X

A Tabela 5.17 apresenta os minerais constituintes nas duas argilas investigadas.

Tabela 5.17 – Dados da análise mineralógica das argilas dos blocos examinados

AMOSTRAS	MINERAIS			
	Quartzo	Caulinita	Rutilo	Ilita
Argila dos blocos queimados com briquetes	M	m	m	tr
Argila dos blocos queimados com eucalipto	M	m	–	tr

M = constituinte maior; m = constituinte menor e tr = constituinte traço.

Conforme a Tabela 5.17, na argila dos blocos queimados com briquetes foram identificados: quartzo, como constituinte maior; caolinita e rutilo, como constituinte menor (m) e traços de ilita. Na argila dos blocos queimados com lenha de eucalipto foram identificados: quartzo, como constituinte maior; caolinita, como constituinte menor; e traços de ilita.

De acordo com a análise mineralógica das argilas examinadas, observou-se que apenas a argila dos blocos queimados com briquetes apresentou o rutilo como constituinte menor. Conforme mencionado na Seção 3, uma consequência da presença desse mineral em quantidade expressiva, provoca cor mais avermelhada nos blocos após a sua queima. Posteriormente, será apresentada a caracterização visual dos blocos produzidos a partir dessas argilas, onde será analisado este fato.

As Figuras K.1 e K.2 do Apêndice k, apresentam os difratogramas de raios-X das argilas dos blocos queimados a partir de briquetes e lenha de eucalipto, respectivamente.

5.5.2 – Desempenho dos blocos queimados a partir de briquetes e lenha de eucalipto: inspeção geral e por ensaios

A seguir, são apresentados os resultados da inspeção geral e por ensaios das amostras dos blocos cerâmicos objeto de estudo.

5.5.2.1 – Inspeção geral: caracterização visual dos blocos

Quanto à caracterização visual, tanto as amostras dos blocos queimados com briquetes, como a dos blocos queimados com lenha de eucalipto não atenderam a este requisito. As Tabelas de L.1 a L.3, bem como as Tabelas de L.4 a L.6 do Apêndice L, apresentam os resultados dos ensaios de caracterização dos blocos queimados com briquetes e lenha de eucalipto, respectivamente.

Sobre a cor dos blocos após a fase de queima, a presença de rutilo na argila dos blocos queimados com briquetes não acarretou nenhuma anormalidade, comparativamente aos blocos queimados com eucalipto. O que foi constatado foi que a maioria das vagonetas dos blocos queimados com lenha de eucalipto apresentaram, nas laterais, próximas dos

queimadores, blocos requeimados (ou supercozidos), por ação das chamas de fogo da queima da lenha de eucalipto, ficando geralmente escuros, onde não fazem boa pega com a argamassa de assentamento da alvenaria (ver Figura 5.27). Contrariamente, na queima dos blocos com briquetes não foi registrado nenhuma irregularidade deste gênero.



Figura 5.27 – Blocos cerâmicos requeimados na fase de queima a partir da lenha de eucalipto.

5.5.2.2 – Inspeção por ensaios: características geométricas, físicas e mecânica

- Características geométricas dos blocos

Quanto às características geométricas referentes às medidas das faces, espessura das paredes externas e dos septos, planeza das faces e desvio em relação ao esquadro, os resultados destes ensaios para as amostras dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto são apresentados nas Tabelas L.1 a L.3, bem como nas Tabelas L.4 a L.6 do Apêndice L.

Para as medidas das faces referentes a largura (L), altura (H) e comprimento (C), das amostras de blocos queimados com briquetes e lenha de eucalipto, apenas uma amostra queimada com briquete não atendeu o limite prescrito na ABNT NBR 15270-2005.

Quanto à espessura das paredes dos septos, tanto para os blocos queimados com briquetes, quanto com lenha de eucalipto, nenhuma amostra atendeu a este requisito.

Na análise da planeza das faces, tanto para os blocos queimados com briquete, quanto com lenha de eucalipto, as duas primeiras amostras não atenderam a este requisito, mas a terceira atendeu.

Sobre o desvio em relação ao esquadro, tanto dos blocos queimados com briquetes, como com lenha de eucalipto, nenhuma amostra atendeu a este requisito.

- Características físicas dos blocos

Índice de absorção de água dos blocos: Os resultados deste ensaio estão apresentados nas Tabelas L.7 e L.8 do Apêndice L. Os valores obtidos para as amostras dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto apresentaram valor médio de 19%. Pelo exposto, ambas as amostras atenderam ao limite prescrito na ABNT NBR15270:2005, que é entre 8 e 22%.

Índice de absorção inicial dos blocos: Os resultados deste ensaio estão apresentados nas Tabelas L.9 e L.10 do Apêndice L. O valor médio obtido, tanto para as amostras dos blocos queimados com briquete, quanto com lenha de eucalipto foi de 16 g/193,55 cm²/min. Deste modo, as amostras dos blocos atenderam as recomendações da ABNT NBR 15270:2005, que considera o limite ideal para blocos cerâmicos, inferior a 30 g/193,55 cm²/min.

Porosidade aparente dos blocos cerâmicos: as Tabelas L.11 e L.12 do Apêndice L, apresentam os valores obtidos para esta propriedade. Os valores médios obtidos com amostras dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto foram: 30% e 29%, respectivamente.

Os resultados obtidos neste ensaio atenderam os limites recomendados para blocos. No entanto, estão próximos do extremo superior. Considerando-se que um valor intermediário é o ideal, sugere-se a realização da dosagem da argila (adição de partículas de menor dimensão) e/ou aumento da temperatura de queima dos blocos. O resultado apresentado para menor porosidade, no caso do bloco queimado com lenha de eucalipto, pode justificarse, em parte, devido a sua granulometria (grãos de menor diâmetro).

Realizando-se o teste *Qui-Quadrado de Pearson* conclui-se que os resultados desta propriedade são equivalentes.

Retração linear de secagem e de queima dos blocos: Os valores obtidos para retração linear da secagem dos blocos são apresentados nas Tabelas L.13 e L.14 do Apêndice L. As médias correspondentes a largura (L), altura (H) e comprimento (C), são apresentadas na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Retração linear da secagem natural e artificial dos blocos

RETRAÇÃO LINEAR DE SECAGEM				
(%)				
MEDIDAS DAS FACES	BLOCOS QUEIMADOS COM BRIQUETE		BLOCOS QUEIMADOS COM LENHA DE EUCALIPTO	
	Secagem Natural	Secagem Artificial	Secagem Natural	Secagem Artificial
Largura (L)	6,46	0,51	6,71	0,24
Altura (H)	6,27	0,59	6,54	0,12
Comprimento (C)	4,44	0,84	5,44	0,12

Na Tabela 5.18 observa-se que na maioria das vezes, a largura do bloco foi a face que apresentou maior retração linear, corroborando o mencionado na Seção 3, onde se afirma que, quanto menor a dimensão da face, maior a retração linear.

Quanto à retração linear após a queima dos blocos, os valores obtidos também são apresentados nas Tabelas L.13 e L.14 do Apêndice L, de onde foram obtidas às dimensões médias da retração de queima dos blocos, apresentadas na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Retração linear da queima dos blocos

RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA		
(%)		
MEDIDAS DAS FACES	BLOCOS QUEIMADOS COM BRIQUETES	BLOCOS QUEIMADOS COM LENHA DE EUCALIPTO
Largura (L)	1,15	0,85
Altura (H)	1,24	0,84
Comprimento (C)	1,00	0,71

Conforme a Tabela 5.19, observou-se que os blocos queimados com briquetes apresentaram maior retração linear, comparados aos queimados com lenha de eucalipto. Apesar da argila dos blocos queimados com lenha de eucalipto ter apresentado índices de

consistência que permitem um maior empacotamento dos grãos, gerando como consequência maior índice de retração, isso não ocorreu, já que os índices apresentados neste caso foram menores.

Ainda, analisando a temperatura máxima de queima, tem-se a ocorrência de um patamar mais elevado de temperaturas na queima dos blocos a partir do briquete, conforme item 4.4.1.2, o que pode ter sido responsável pela sua maior retração.

Os valores obtidos para a retração linear total (de secagem e de queima) são apresentadas na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 – Retração linear total na fabricação dos blocos examinados

RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA (%)		
MEDIDAS DAS FACES	BLOCOS QUEIMADOS COM BRIQUETE	BLOCOS QUEIMADOS COM LENHA DE EUCALIPTO
Largura (L)	8,22	7,69
Altura (H)	8,09	7,54
Comprimento (C)	6,28	6,22

Conforme a Tabela 5.20, as retrações lineares totais dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto estão abaixo do valor mencionado na Seção 4, de até 10%.

- Característica mecânica dos blocos

Resistência a compressão: Os resultados deste ensaio estão apresentados nas Tabelas L.1 a L.6 do Apêndice L. Observou-se que apenas uma amostra dos blocos queimados com briquete atendeu a este requisito. No entanto, é necessário alertar que a resistência a compressão dos blocos cerâmicos não depende unicamente do processo de queima; ela é influenciada, também, pelas peculiaridades da argila e pelas etapas que antecedem a fase de queima.

Segundo Oliveira (2002), Sposto; Perini (2000), na região em estudo tem-se constatado produção e fornecimento de blocos cerâmicos de qualidade insatisfatória, principalmente no que se refere a resistência a compressão; isto gera problemas na alvenaria devido aos seu baixo desempenho em serviço, bem como, índice elevado de perdas.

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 – CONCLUSÕES

Neste estudo foram analisadas as características e as propriedades dos briquetes, comparativamente à lenha de eucalipto, para a queima de blocos cerâmicos. Desta análise tem-se como principais variáveis as temperaturas de queima, os consumos energéticos e de mão-de-obra e seus respectivos custos, bem como o desempenho dos blocos produzidos a partir destes combustíveis.

A seguir são apresentadas as conclusões deste trabalho, de acordo com as três fases adotadas no programa experimental.

6.1.1 - Fase 1: caracterização dos resíduos, dos briquetes ligno-celulósicos e da lenha de eucalipto

6.1.1.1 – Matérias-primas dos briquetes(resíduos ligno-celulósicos)

Quanto ao teor de umidade (TU), todos os resíduos apresentaram valores elevados, o que não é recomendado, pois exige maior tempo de secagem artificial, implicando em um maior consumo de energia na produção de briquetes.

Com relação à granulometria dos resíduos, a serragem de madeira produzida pela indústria de briquete (SM1) e a serragem de madeira das serrarias e indústrias de móveis (SM2) apresentaram diâmetros de 9,5 mm, enquanto a serragem de *pinus* (SM3) e o resíduo de semente de algodão (RA) apresentaram diâmetros de 2,4 mm. Ambos valores diferem do limite recomendado para briquetagem.

Sobre a quantidade de resíduos na região em estudo, esta é significativa. Apesar disto, somente uma pequena parte dessa quantidade é explorada. A conversão de resíduos ligno-celulósicos em energia contribui para reduzir os impactos ambientais originados pela sua

disposição em locais impróprios e para substituir a lenha escassa na maioria da região brasileiras.

6.1.1.2 – Briquetes ligno-celulósicos (B9,5 e B8,5) e lenha de eucalipto (LE)

Verificaram-se que os teores de umidade (TU) e de matéria volátil (MV) do B9,5; do B8,5 e da LE foram equivalentes. Os briquetes apresentaram TU dentro dos limites estabelecidos nas normas internacionais. Já a LE apresentou TU reduzido, quando comparado aos combustíveis lenhosos utilizados usualmente nas indústrias de cerâmica vermelha da região em estudo. Este fato é explicado pela necessidade de estabelecimento de um maior controle entre as variáveis consideradas neste trabalho (TU dos briquetes e da lenha empregada).

Com relação ao teor de cinza (CZ), para o caso dos briquetes, estes apresentaram valores elevados, acima do valor prescrito na norma austríaca ONORM M 7135:2000, ao contrário da LE, que apresentou um valor reduzido, atendendo a referida norma. Apesar disso, concluiu-se, como nas demais análises, que estes valores foram equivalentes.

Quanto ao teor de carbono fixo (CF), os briquetes apresentaram maiores índices comparados a LE, apresentando vantagem para o seu emprego, já que esta propriedade determina a sua eficiência na combustão.

Para a massa específica a granel e aparente, obtiveram-se maiores valores para o B8,5, seguido do B9,5 e da LE. Quanto maior a massa específica do combustível maior a quantidade de calor por unidade de volume, portanto, há vantagens dos briquetes sobre a LE empregada neste trabalho. O menor consumo de combustível foi alcançado com o B8,5, seguido do B9,5 e da LE, indicando a vantagem do briquete sobre a lenha estudada.

Quanto ao poder calorífico superior (PCS), uma vez que o teor de cinza (CZ) e o teor de matéria volátil (MV) foram equivalentes, com pequena variação do teor de carbono fixo (CF), não houve diferença significativa entre os combustíveis investigados. No entanto, observou-se uma diferença expressiva entre o poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico líquido (PCL) dos briquetes, comparados a lenha de eucalipto. Os valores de

PCL apresentados em ordem decrescente foram para o B8,5; B9,5 e LE, indicando a vantagem dos briquetes sobre a lenha analisada.

Referente a deformação específica dos briquetes, concluiu-se que as amostras do B9,5 e do B8,5, apresentaram índices de deformações variáveis ao longo de trinta dias após a sua fabricação, onde o mecanismo de briquetagem, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar influenciaram na origem dos índices de deformações desuniformes. O B9,5 foi o que mais se deformou. Para ambos, as maiores deformações ocorreram nos primeiros quinze minutos após a sua extrusão e nos dias de temperatura mínima e de baixa umidade relativa do ar.

6.1.2 – Fase 2: Análise da utilização do briquete na fase de queima dos blocos cerâmicos, caracterização das argilas e dos blocos.

6.1.2.1 – Consumo de combustíveis e temperaturas de queima dos blocos cerâmicos

Quanto ao consumo do B9,5 e do B8,5 na queima dos blocos, os valores obtidos variaram quando comparado a LE. Isso justifica-se, principalmente, em função de diferentes características entre estes combustíveis, bem como devido à queima de uma carga completa de blocos da zona de queima do forno ser demorada, não sendo possível conduzir esta análise com o mesmo operador do forno. Pelo exposto, o consumo de LE foi superior aos do B9,5 e do B8,5. Entretanto, quanto aos dois últimos, os consumos foram equivalentes.

Quanto à temperatura na câmara de queima dos blocos, o seu maior valor médio foi alcançado a partir da queima da LE. Opostamente, este combustível registrou a menor temperatura média mínima. Todavia, todos os combustíveis analisados apresentaram variações de temperatura, onde as temperaturas médias máximas obtidas não atenderam o limite recomendado anteriormente neste trabalho de 1200°C.

Considerando-se um intervalo constante da fase de queima dos blocos, a partir do B8,5 e da LE, e utilizando-se o mesmo operador do forno, observaram-se temperaturas máximas com maior tempo de queda para LE. Pelo exposto, a queima dos blocos com LE necessitou de mais carga de combustível, conseqüentemente, maior consumo.

6.1.2.2 – Avaliação de desempenho dos blocos cerâmicos

Quanto à avaliação do desempenho dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto, considerando-se as propriedades de resistência à compressão, índice de absorção de água e índice de absorção inicial, os resultados obtidos não apresentaram variações significativas. Entretanto, no ensaio de retração linear de secagem e de queima ficou evidente que os blocos queimados com briquetes se retraíram mais, na direção da largura (L) e altura (H), do que os blocos queimados com lenha de eucalipto. Esse fato justifica-se pelas temperaturas maiores e mais uniformes da queima dos blocos com briquete, causando uma maior união das partículas da argila. Portanto, a aplicação do briquete na queima dos blocos contribuiu para melhorar o desempenho dos blocos.

Quanto à caracterização das argilas, da análise granulométrica, têm-se que estas não apresentaram diferenças nos tamanhos das partículas. Entretanto, ambos materiais utilizados possuíam porcentagens de argila, areia média e silte, inferiores aos limites recomendados na Seção 4.

Sobre o índice de plasticidade, as argilas dos blocos queimados com briquetes e com lenha de eucalipto são altamente plásticas, contribuindo no processo de conformação por extrusão. Os limites de liquidez e de plasticidade da argila dos blocos queimados com briquete foram menores que da argila dos blocos queimados com lenha de eucalipto. Quanto menor estes limites, menor, também, é o seu índice de plasticidade e desempenho inferior do bloco. A argila dos blocos queimados com lenha de eucalipto tinha potencial para produzir blocos de melhor característica que a argila dos blocos queimados com briquete, mas isso não ocorreu com as amostras dos blocos investigados.

Quanto à composição mineralógica, observou-se que ambas argilas, dos blocos queimados com briquete e com lenha de eucalipto, apresentaram alto teor de quartzo e baixos teores de caulinita e illita, observando-se a ausência do rutilo no caso da argila dos blocos queimados com lenha de eucalipto. Não houve alteração de cor dos blocos, como era esperado, pela presença do rutilo.

Quanto às características geométricas dos blocos analisados, o único requisito que atendeu a ABNT NBR 15270:2005 foi às medidas das faces.

Para as características físicas, em relação à absorção de água, concluiu-se que não há diferença entre as amostras de blocos queimados com briquetes ou com lenha de eucalipto. Todas satisfizeram as especificações da norma ABNT NBR 15270:2005. Isso reforça o atendimento de que este atributo não depende, exclusivamente, de um único fator, por exemplo, do combustível utilizado na queima, mas também de outros, tal como o tamanho das partículas da matéria-prima do bloco.

No que diz respeito a porosidade, concluiu-se que os blocos mais porosos foram os queimados com briquetes. Observa-se, porém, que esta propriedade não deve ser atribuída unicamente ao combustível utilizado na queima do bloco, sendo influenciada pelas peculiaridades da matéria-prima do bloco. Conforme o índice de plasticidade, a argila usada nos blocos queimados com lenha de eucalipto era mais apropriada que a dos blocos queimados com briquetes.

As retrações lineares de secagem para ambos os blocos, queimados com briquetes e com lenha de eucalipto, foram equivalentes, tendo em vista que foram proporcionadas as mesmas condições de secagem. Ao contrário, as retrações lineares da queima dos blocos queimados com briquete foram maiores que a dos blocos queimados com lenha de eucalipto. Isso se justifica em função das temperaturas máximas de queima serem mais uniformes na queima a partir do briquete.

Quanto à resistência à compressão dos blocos, têm-se que somente uma amostra queimada com briquete atendeu a ABNT NBR 15270:2005. Observa-se que irregularidades, tais como espessuras das paredes externas e dos septos, também contribuem para baixos valores de resistência à compressão dos blocos cerâmicos. Além disso, outras anomalias tais como trincas profundas e deformações nas paredes dos blocos, contribuíram para a sua baixa resistência à compressão.

6.1.3 – Fase 3: análise energético-econômica da utilização dos briquetes na queima dos blocos cerâmicos.

6.1.3.1 – Análise energética

Com relação à análise energética da queima dos blocos, o maior consumo registrado ocorreu com a LE e o menor com o B8,5.

O aquecimento do planeta provocado pelo efeito estufa e as conseqüentes mudanças climáticas ocorrem, em parte, em razão da queima dos combustíveis de biomassa (a combustão ineficiente de biomassa é a principal fonte de emissão de CO₂). Esta emissão pode ser em parte contida com a redução do consumo de combustível. Pelo exposto, o uso do B8,5 é mais benéfico.

6.1.3.2 – Análise econômica

Considerando-se os preços de mercado, a queima dos blocos mais econômica foi com a LE e a mais onerosa foi com o B9,5. No entanto, devido a escassez de lenha na região em estudo, geralmente as indústrias de cerâmica vermelha consomem lenha recém-cortada com elevado TU. Isso é mais complexo ainda no período das chuvas, pois o seu armazenamento é realizado no pátio das indústrias cerâmicas, ao ar livre, contribuindo no aumento de seu TU, e conseqüentemente, na redução de seu conteúdo energético. Assim sendo, há um consumo superior de lenha, que pode alcançar valor superior ao da queima dos blocos a partir do briquete, induzindo com isto, também, um maior custo.

Finalmente, conclui-se que o briquete pode ser um combustível alternativo, devendo-se considerar, porém, duas premissas: o seu custo e a distância para o ponto de consumo.

Uma das possibilidades da sociedade usufruir dos benefícios do briquete ligno-celulósico como fonte de energia para as indústrias da região em estudo é a criação de subsídios oficiais que reduzam os custos de produção, a partir de medidas governamentais que reduzam os impostos, incentivando a produção e uso deste energético. Ainda, ações em desenvolvimento regional, emprego direto e indireto podem ser criados pela implantação

de novas indústrias de briquetes. Esta alternativa, além de proporcionar um destino correto dos resíduos, reduz o volume de madeira extraída da natureza.

E por fim, a redução do custo do briquete pode ser alcançada com o aumento da sua produção, pois a maior oferta pode reduzir o preço de mercado.

6.2 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A aplicação de briquetes ligno-celulósicos como combustível industrial em substituição à lenha nas indústrias de cerâmica vermelha da região em estudo, abre a possibilidade de se investigar, futuramente, os fatores condicionantes do processamento e aproveitamento de briquetes. No momento este tema é importante por não existir na região considerada outras fontes alternativas de energia, tais como o gás natural utilizado em outros locais brasileiros.

Para complementar o presente trabalho, sugere-se estudar:

- A fase de queima de blocos cerâmicos a partir de briquetes ligno-celulósicos nos outros tipos de fornos empregados na região em estudo;
- A fase de queima dos blocos a partir de briquetes ligno-celulósicos, tendo como referencial comparativo o combustível mais empregado na região considerada, a lenha nativa;
- O desenvolvimento de estudo semelhante ao desenvolvido nesta tese, utilizando temperaturas máximas mais elevadas e uniformes de queima, bem como um único operador do forno;
- O monitoramento da zona de queima do forno contínuo tipo túnel, por meio de vários termopares localizados em pontos distintos da câmara de queima;
- A influência da adição de outros resíduos de colheitas agrícolas locais sobre as propriedades de briquetes;
- As emissões de poluentes na queima de blocos a partir de briquetes ligno-celulósicos;
- Análise energético-econômica completa da produção de briquetes e de sua utilização nas indústrias cerâmicas da região em estudo e;
- Subsídios para a criação de procedimentos padronizados no Brasil para os combustíveis de biomassa densificados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Cerâmica no Brasil. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/asp/abc_21.asp>. Acesso em: 14 maio 2005.
- ACIOLI, J. L. **Fontes de energia**. Brasília: Editora Universitária de Brasília. 1994. 138p.
- ALEXANDRE, J. et al. Análise das alterações das propriedades mecânicas de produtos cerâmicos em função do tempo de queima. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45., 2001, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABC, 2001. CD-ROM.
- AMBONI, N. **O caso CECRISA S.A.: uma aprendizagem que deu certo**. 1997. 215 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- ARESTA, M. et al. Potential of cofiring with biomass in Italy. **Energy Convers**, v. 38, p. 557-562, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM 2016-25: Test method for the moisture content of wood. 1974.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D 5142: Standard test method for proximate analysis of the analysis sample of coal and cok by instrumental procedures, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7993**: Madeira - Determinação da umidade por secagem em estufa reduzida a serragem. Rio de Janeiro, 1983. 2 p.
- _____ **NBR 8112**: Carvão vegetal - Análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 5 p.
- _____ **NBR 8633**: Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- _____ **NBR 15270**: Componentes cerâmicos - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e Requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.
- _____ **NBR 15270**: Componentes cerâmicos - Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação - Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2005. 27 p.
- _____ **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.
- _____ **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.
- _____ **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- _____ **NBR 6922**: Determinação da densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981. 3 p.

- _____

NBR MB-2887: Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática. Rio de Janeiro, 1988. 3 p.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 705 p.
- BELLE, J. F. V. et al. Three level procurement of forest residues for power plant. **Biomass and Bioenergy**, n. 24, p. 401-409, 2003.
- BERMANN C. **Energia no Brasil: para que? Para quem? Crise e alternativas para um país sustentável**. São Paulo: Editora Livraria da Física: FASE, 2001. 139 p.
- BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional 2006: Ano base 2005**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2006. 192 p.
- BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Proposta de utilização energética de florestas e resíduos agrícolas**. Brasília. 1984. 166 p.
- BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation**. La Calade : Édisud, 1985. 180 p.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustível. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COMO RECURSOS FLORSTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1982. p 101-137.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações fundamentais**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. v. 1. 498 p.
- CARDOSO, A. P. **Tecnologia da cerâmica vermelha do Norte do Paraná aplicada na produção de componente para alvenaria estrutural**. 1995. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- CUCHET, E. et al. Performance of a logging residue bundler in the temperate forests of France, **Biomasa and Bioenergy**, v. 27, p. 31-39, 2004.
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **DIN 51719**: Testing of solid fuels - compressed untreated wood, requirements and testing. Berlin, Germany. 1996.
- DUALIBI FILHO, J.; CARVALHO, O. O. Os números da vermelha. **Revista Mundo Cerâmico**, São Paulo, n. 83, p. 34-38, set. 2002.
- FERREIRA, A. B. H. **Dicionário da Língua Portuguesa**. 5. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2001.
- FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 2001, 550 p.

- FONSECA, J. F. et al. **Manual para a produção de cerâmica vermelha**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina/SEBRAE-SC, 1994. 81 p.
- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Teoria da carbonização da madeira. Belo Horizonte, 1980.
- GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Tradução de André Koch. 2ª ed. São Paulo: USP, 2003. 226 p.
- GOMIDE, R. **Estequiometria industrial**. 2. ed. São Paulo: R. Gomide, 1979, 423 p.
- GOMES, C. F. **Argilas o que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988. 457 p.
- GIRARD P.; ROUSSET P. L'intérêt des techniques de combustion pour la valorization thermique de la biomasse et des déchets, avec ou sans cogénération, **Liaison Energie**, Francophonie IEPF, n. 48 et 49, p. 28-33, 2000.
- GIRARD P.; ROUSSET P.; VERGNET A. M. Transformation énergétique du bois. **Le rôle de l'eau**. Le Flamboyant, n. 41, p. 42-44, 1997.
- GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. Biomass briquetting: technology and practices. FAO, April, 1996. Disponível em: <<http://www.rwedp.org>>. Acesso em 18 abril 2005.
- GUANDALINI G.; SILVA C. A dupla conquista. **VEJA**, São Paulo: Editora Abril. Edição 1941, ano 39, n 4, fev. 2006.
- GUIMARÃES, G. D. **Análise energética na construção de habitações**. 1985. 228 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.
- HELLER, M. C. et al. Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass. **Renewable Energy**, n. 29, p. 1023-1042, 2004.
- HILLRING, B. Price trends in the swedish wood-fuel market. **Biomass and Bioenergy**, v. 12, n. 1, p. 41-51, 1997.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Senso 2003. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 08 agosto 2005.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. INMETRO Analisa produtos cerâmicos. **Revista Cerâmica Estrutural**, n. 17, p. 3-9, 2000.
- IOSHIMOTO, E.; THOMAZ, E. Materiais cerâmicos para construção civil. São Paulo: USP, 1990. 102 p.
- JOHANSSON, L. S. et al. Particle emissions from biomass combustion in small combustors, **Biomass and bioenergy**, n. 25, p. 435-446, 2003.

- JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. **Coleção Habitare, Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre, 2003. v. 4, p. 9-71.
- KAZMIERCZAK, C. S. et al. Resíduos de contrafortes termoplásticos provenientes da indústria coureiro-calçadista. **Coleção Habitare, Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre, 2003. v. 4, p. 125-175.
- KERSTEN, I. et al. Urban and rural fuelwood situation in the tropical rain-forest area of South-West Nigéria. **Energy**, v. 23, n. 10, p. 887-898, 1998.
- KIPPER. Histórico. Disponível em: <<http://www/kipper.com.br>>. Acesso em: 05 out. 2005.
- LANGHANZ, C. L. Análise do setor industrial de Cerâmica Vermelha no RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 35., 1991, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABC, 1991. p. 819-825.
- LEITE, A. D. **A energia do Brasil**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997. 499 p.
- LI, Y.; LIU, H. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, p. 177-186, 2000.
- LUDWIG, J. et al. Domestic combustion of biomass fuels in developing countries: a major source of atmospheric pollutants. In: JOURNAL OF ATMOSPHERIC CHEMISTRY, n. 44, p. 23-37. 2003.
- MACEDO, R. S. **Estudo das matérias-primas e tijolos cerâmicos furados produzidos no Estado da Paraíba**. 1997. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1997.
- MANFREDINE C.; SATTTLER, M. A. O consumo de energia no setor de cerâmica vermelha no RS: Aspectos qualitativos e quantitativos. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1.; ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10.; 2004, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2004. CD-ROM.
- MATTOS, D. M. **Desenvolvimento de componentes para edificação: Blocos cerâmicos de vedação**. 1988. 182 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.
- MEDEIROS, E. N. M. **Sistema de gestão da qualidade na indústria cerâmica vermelha. Estudo de caso de uma indústria que abastece o mercado de Brasília**. 2006. 190 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- MELLO, M. G. **Biomassa, energia dos trópicos em minas gerais**. Belo Horizonte: LabMídia/FAFICH, 2001. 272 p.

- MITIDIERI FILHO, C. V; CAVALHEIRO, W. Desenvolvimento de sistema construtivo em painéis cerâmicos. In: Tecnologia de Edificações. Projeto de divulgação tecnológica Lix da Cunha. PINI, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Divisão de Edificações, São Paulo, p. 175-178. 1988.
- NAGEL, J. Biomass in energy supply, especially in the state of Brandenburg, Germany. **Ecological Engineering**, v. 16, p. 103-110, 2000.
- NDIEMA, C. K. W. et al. Densification characteristics of rice straw. In: JOURNAL OF THE INSTITUTE OF ENERGY, v. 75, p. 11-13, 2002.
- NELVA, J. **Fontes alternativas de energia: conservação de energia, gás natural, biomassa – carvão vegetal, álcool etílico e xisto**. 2., ed. Rio de Janeiro: Maity. 1987, 187 p.
- NEVES, C. M. M. Componentes habitacionais de argamassa celulósica e espuma de poliuretano. **Coleção Habitare, Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre, 2003. v. 4, p. 177-214.
- NORTON, F. H. **Introdução à tecnologia cerâmica**. Tradução de Jefferson Vieira de Souza. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. 324 p.
- OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, p. 653-669, 2004.
- OBERMEIER, H. F; VIEIRA, V. N. Construção com tijolos e blocos estruturais na Alemanha e no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 42., 1998, Poços de Caldas, **Anais...** Poços de Caldas: ABC, 1998. v 1, p. 262-270.
- OLIVEIRA, K. R. B. **Avaliação dos blocos cerâmicos produzidos para a região metropolitana de Goiana - GO**. 2002. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.
- OLIVEIRA et al. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. Série de publicações técnicas da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC: **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982, v. 1, p. 61-73.
- OMER, A. M. Biomass energy potential and future prospect in Sudan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 9, p. 1-27, 2005.
- ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSMINISTERIUM. **ÖNORM M 7135**: Compressed wood or compressed bark in natural state - pellets and briquettes, requirements and test specifications. Vienna, Austria, 2000.
- PATIL, K. N. et al. Case study of spreri natural draft gasifier installation at a ceramic industry. **Biomass and Bioenergy**, n. 22, p. 497-504, 2002.
- PENIDO, E. e COSTA, S. S. **Oficina: cerâmica**. Rio de Janeiro: Ed. Senac Nacional, 1999. 120 p.

- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 11. ed. São Paulo: Globo, 1998. 435 p.
- PIANCA, B. J. **Manual do construtor**. 9. ed. Porto Alegre: Globo. 1977. v 1. 169 p.
- PRACIDELLI, S. **Cerâmica vermelha**. São Paulo: Escola SENAI Armando de Arruda Pereira. 1989. 300 p.
- QUIRINO, W. F. e BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. Brasília: Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. 1991. 16 p.
- QUIRINO, W. F. O caminho sustentável para a produção de ferro gussa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL PARA A INDÚSTRIA DE BASE FLORESTAL, DE GERAÇÃO DE ENERGIA E DE MINERAÇÃO. 6., 2003, São Paulo. **Anais...**, São Paulo: 2003. CD-ROM.
- QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, 2002. 31 p.
- RESENDE, M. A. P. **A indústria cerâmica: estudo de caso no Município de Tambaú-SP**. 1998. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Campinas, 1998.
- RIBEIRO, M. J. et. al. Aspectos fundamentais sobre a extrusão de massas de cerâmicas vermelhas. **Cerâmica Industrial**, n. 8, p. 37-42, jan./fev. 2003.
- RIBEIRO et al. Estudo das eflorações nos tijolos de cerâmica vermelha ou estrutural produzidos no estado da Paraíba. **Cerâmica**, n. 42, p 343-344, jul/ago. 1996.
- ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos na construção. **Coleção Habitare, Utilização de resíduos na construção habitacional**, Porto Alegre, 2003. v . 4, p. 73-93.
- ROMAN, H. R. **Determinação das características físicas e análise estatística da capacidade resistente de tijolos cerâmicos maciços**, 1983. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.
- ROUSSET, P. **Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité PAR haute température: De la micro-particule au bois massif**. 2004. 187 f. Tese (Doutorado) - L'école National du Génie Rural, des Eaux et des Forêt, 2004.
- ROUSSET, P. Selection of a micro-particle wood pyrolysis model for use in a macroscopic transport model. *Tuner I Ann. For. Sci.* 63, 2006. p. 213-229.
- RUSSOMANO, V. H. **Introdução à administração de energia na indústria**. São Paulo: Pioneira, 1987. 262 p.
- SANTOS, I. S. S.; SILVA, N. I. W. **Manual de cerâmica vermelha**. Porto Alegre: SEBRAE/RS, 1995. 56 p.

- SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha**. 2001. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- SCHUURMANS-STEHMANN, A. M. Environmental life cycle analysis of construction products with and without recycling. In: GOUMANS, J. J. 1994.
- SOARES, J. M. D. et al. Avaliação das dimensões dos produtos de cerâmica vermelha produzidos em Santa Maria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 46., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABC. CD-ROM.
- SOUZA, R. B. Redução do ciclo de queima e do consumo de energia na queima de cerâmica vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 35., 1991, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte: ABC, 1991. v. 2, p. 842-849.
- SOUZA SANTOS, P. **Tecnologia de argilas, aplicação às argilas brasileiras**. São Paulo: Edgard Blucher, 1975. v. 1, 340 p.
- SOUZA J. V. **Estudo tecnológico de algumas argilas e caulins do recôncavo do Estado da Bahia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1973. 142 p.
- SINGH, R. N. Equilibrium moisture content of biomass briquettes. **Biomass and bioenergy**, n. 26, p. 251-253, 2004.
- SILVA, N. C. et al. Qualidade dos produtos de cerâmica vermelha na região de São Carlos, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 44., 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABC, 2000. p. 16301-16311.
- SIMO, A.; SIWE, S. S. Availability and conversion to energy potentials of wood-based industry residues in Cameroon. **Renewable Energy**, n. 19, p. 213-218, 2000.
- SPOSTO, R. M. et al. Management and technology for quality and sustainability of masonry components in Brasilia's market. In: CIB W107 CONSTRUCTION IN DEVELOPING COUNTRIES INTERNATIONAL SYMPOSIUM - CONSTRUCTION IN DEVELOPING ECONOMIES: NEW ISSUES AND CHALLENGES, Santiago, Chile, 2006. CD- ROM.
- SPOSTO, R. M.; PERINI, A. S. Caracterização e avaliação da qualidade dos blocos cerâmicos furados para alvenaria de vedação fornecidos para o Distrito Federal - DF. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. **Anais eletrônico...** Salvador: ANTAC, 2000. p. 940-947.
- SCHWEIZERISCHE NORMEN-VEREINIGUNG. **SN 166000**: Testing of solid fuel – compressed untreated wood, requirements and testing. Winterthur, Switzerland: 2001.
- SWEDISH STANDARDS INSTITUTION. **SS 187120**: Biofuels and peat - fuel pellets - classification. Stockholm, Sweden, 1998.
- TABARÉS, J. L. M. et al. Feasibility study of energy use for densificated lignocellulosic material (briquettes). **Fuel**, n. 79, p. 1229-1237, 2000.

- TAVARES, E. C. S. et al. Caracterização de produtos cerâmicos do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 46., 2002, São Paulo. Anais eletrônico... São Paulo: ABC, 2002.
- TOMAZETTI, R. R. **Análise da produção de cerâmica vermelha da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul.** 2003. 190 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- VALE, A. T. **Caracterização da biomassa lenhosa de um cerrado sensu stricto da região de Brasília para o uso energético.** 2000. 111 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.
- VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais.** Tradução de Luiz. P. C. Ferão. São Paulo: Edgard Blucher, 1970. 427p.
- VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciências e tecnologia dos materiais.** Tradução de Edson Monteiro. Rio de Janeiro: Elsevier, 1984. 566p.
- VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos.** Tradução de Cid Silveira e Shiroyuki Oniki. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. 318p.
- VARELA, M. et al. Environmental and socioeconomic aspects in the strategic analysis of a biomass power plant integration. **Biomass and Bioenergy**, n. 17, p. 405-413, 1999.
- VARGAS, M. **Introdução a mecânica dos solos.** São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 1977. 509 p.
- VERÇOZA, E. J. **Materiais de construção.** v. 1. 3. ed. Porto Alegre: Sagra. 1987. 153 p.
- VIEIRA, C. M. F. et al.. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot. **Cerâmica Industrial**, n. 8, p. 42-46, jan./fev. 2003,
- ZANDONADI, A. R.; IOSHIMOTO, E. Cerâmica vermelha. Curso internacional de treinamento em grupo em tecnologia cerâmica. São Paulo: IPT/JICA, 1991. 20 p.
- WAMUKONYA, L.; JENKINS, B. Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya. **Biomass and Bioenergy**, v. 8, n. 3, p. 175-179, 1995.
- WEBER et al. Cerâmica artesanal – um novo desafio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45., 2001, Florianópolis. **Anais eletrônico...** Florianópolis: ABC, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS DOS RESÍDUOS (MATÉRIAS-PRIMAS) DOS BRIQUETES

Tabela A.1 – Resultado da análise granulométrica da serragem da indústria de briquete

ABERTURA (mm)	MATERIAL RETIDO (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
12,5	0,8	0,32	0
9,5	5,3	2,12	2
6,3	27,6	11,04	13
4,8	32,9	13,16	27
2,4	74,1	29,64	56
1,2	73,0	29,20	85
0,6	22,0	8,80	94
0,3	8,9	3,56	98
0,15	3,3	1,32	99
0,075	1,7	0,68	100
Fundo	0,4	0,16	100
Totais	250,0	100	

Tabela A.2 – Resultado da análise granulométrica da serragem das serrarias

ABERTURA (mm)	MATERIAL RETIDO (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
12,5	2,9	1,45	1
9,5	3,1	1,55	3
6,3	12	6,00	9
4,8	11,4	5,70	15
2,4	29,5	14,75	29
1,2	51,5	25,75	55
0,6	31,7	15,85	71
0,3	24,3	12,15	83
0,15	17,9	8,95	92
0,075	8,3	4,15	96
Fundo	7,4	3,70	100
Totais	200	100	

Tabela A.3 – Resultado da análise granulométrica da serragem de pinus das indústrias de móveis

ABERTURA (mm)	MATERIAL RETIDO (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
12,5	0	0,00	0
9,5	0,7	0,25	0
6,3	5	1,79	2
4,8	0,8	0,29	2
2,4	7,6	2,71	5
1,2	134	47,86	53
0,6	116,4	41,57	94
0,3	15,5	5,54	100
0,15	0	0,00	100
0,075	0	0,00	100
Fundo		0,00	100
Totais	280	100	

Tabela A.4 – Resultado da análise granulométrica da casca de semente de algodão

ABERTURA (mm)	MATERIAL RETIDO (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
12,5	0	0,00	0
9,5	0	0,00	0
6,3	0	0,00	0
4,8	0,7	0,28	0
2,4	7,2	2,88	3
1,2	152,3	60,92	64
0,6	83,2	33,28	97
0,3	6,6	2,64	100
0,15	0	0,00	100
0,075	0	0,00	100
Fundo		0,00	100
Totais	250	100	

APÊNDICE B – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS (MATÉRIAS-PRIMAS) DOS BRIQUETES

Tabela B.1 – Resultado do ensaio de teor de umidade dos resíduos (matérias-primas) dos briquetes

AMOSTRA	MASSA RECIPIENTE	MASSA RECIPIENTE + AMOSTRA	MASSA AMOSTRA ÚMIDA	MASSA AMOSTRA SECA + RECP.	MASSA AMOSTRA SECA	T.U.	MÉDIA
1	1.1	4,94	55,11	50,17	37,93	32,99	28,63
	1.2	4,91	51,44	46,53	40,54	35,63	
	1.3	4,95	49,02	44,07	36,58	31,63	
2	2.1	4,94	35,55	30,61	29,92	24,98	19,74
	2.2	4,97	45,12	40,15	36,70	31,73	
	2.3	4,95	44,76	39,81	36,85	31,90	
3	3.1	4,96	62,44	57,48	33,01	28,05	51,31
	3.2	4,94	75,17	70,23	39,28	34,34	
	3.3	4,98	66,74	61,76	34,86	29,88	
4	4.1	4,96	50,83	45,87	28,78	23,82	49,34
	4.2	4,94	49,34	44,40	27,17	22,23	
	4.3	4,94	45,76	40,82	25,34	20,40	

Tabela B.2 – Resultado do ensaio de massa específica a granel dos resíduos (matérias-primas) dos briquetes

AMOSTRA	MASSA RECIPIENTE + AMOSTRA (kg)	MASSA AMOSTRA (kg)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)	MÉDIAS
1	1.1	10,54	3,16	228,18
	1.2	10,54	3,16	
	1.3	10,65	3,27	
2	2.1	9,96	2,58	184,49
3	3.1	12,00	4,62	274,83
	3.2	10,98	3,60	
	3.3	11,08	3,70	
	3.4	10,86	3,47	
4	4.1	12,54	5,16	359,04
	4.2	12,34	4,95	
	4.3	12,34	4,96	

LEGENDA:

- 1 - Serragem produzida na indústria de briquetes
- 2 - Serragem de madeira (serrarias)
- 3 - Serragem de pinus (indústria de móveis)
- 4 - Resíduo da casca de semente de algodão

APÊNDICE C – RESULTADOS DA ANÁLISE IMEDIATA DOS BRIQUETES E DA LENHA DE EUCALIPTO

Tabela C.1 – Resultado do ensaio de teor de umidade do B9,5

AMOSTRA	MASSA DA AMOSTRA ÚMIDA (g)	MASSA DA AMOSTRA SECA (g)	TEOR DE UMIDADE (%)
B9,5-1	140,11	126,17	9,95
B9,5-2	172,38	154,87	10,16
B9,5-3	46,85	42,33	9,65
B9,5-4	116,97	105,02	10,22
B9,5-5	95,21	85,28	10,43
Média =			10,08

Tabela C.2 – Resultado do ensaio de teor de umidade do B8,5

AMOSTRA	MASSA DA AMOSTRA ÚMIDA (g)	MASSA DA AMOSTRA SECA (g)	TEOR DE UMIDADE (%)
B8,5-1	104,57	95,73	8,45
B8,5-2	151,96	138,09	9,13
B8,5-3	151,60	137,53	9,28
B8,5-4	126,72	115,24	9,06
B8,5-5	174,20	158,11	9,24
Média =			9,03

Tabela C.3 – Resultado do ensaio de teor de umidade da lenha de eucalipto

AMOSTRA	MASSA DA AMOSTRA ÚMIDA (g)	MASSA DA AMOSTRA SECA (g)	TEOR DE UMIDADE (%)
E-1	193,95	172,32	11,15
E-2	200,19	177,86	11,15
E-3	198,45	174,41	12,11
E-4	47,93	42,81	10,68
E-5	486,86	395,07	18,85
E-6	275,38	241,88	12,17
E-7	53,09	45,34	14,60
E-8	39,95	36,19	9,41
E-9	27,10	24,69	8,89
Média =			12,11

Tabela C.4 – Resultado do ensaio de teor de cinza do B9,5

AMOSTRA	MASSA DO CADINHO (g)	MASSA INICIAL DA AMOSTRA (g)	MASSA CADINHO + RESÍDUO (g)	TEOR DE CINZA (%)
B9,5-1	33,8161	1,0003	33,8362	2,01
B9,5-3	37,1480	1,0007	37,1650	1,70
Média =				1,85

Tabela C.5 – Resultado do ensaio de teor de cinza do B8,5

AMOSTRA	MASSA DO CADINHO (g)	MASSA INICIAL DA AMOSTRA (g)	MASSA CADINHO + RESÍDUO (g)	TEOR DE CINZA (%)
B8,5-2	43,8769	1,0001	43,8892	1,23
B8,5-3	47,2349	1,0003	47,2477	1,28
Média =				1,25

Tabela C.6 – Resultado do ensaio de teor de cinza da lenha de eucalipto

AMOSTRA	MASSA DO CADINHO (g)	MASSA INICIAL DA AMOSTRA (g)	MASSA CADINHO + RESÍDUO (g)	TEOR DE CINZA (%)
E-1	31,1780	1,0014	31,1784	0,04
E-3	31,5411	1,0011	31,5416	0,05
Média =				0,04

Tabela C.7 – Resultado do ensaio de teor de matérias voláteis do B9,5

AMOSTRA	MASSA DO CADINHO (g)	MASSA AMOSTRA SECA (g)	MASSA CADINHO + RESÍDUO (g)	TEOR DE VOLÁTEIS (%)
B9,5-1	49,5889	1,0009	49,7979	79,12
B9,5-3	42,3105	1,0025	42,5086	80,24
Média =				79,68

Tabela C.8 – Resultado do ensaio de teor de matérias voláteis do B8,5

AMOSTRA	MASSA DO CADINHO (g)	MASSA AMOSTRA SECA (g)	MASSA CADINHO + RESÍDUO (g)	TEOR DE VOLÁTEIS (%)
B8,5-1	45,9185	1,0016	46,1008	81,80
B8,5-3	47,0958	1,0006	47,2904	80,55
Média =				81,18

Tabela C.9 – Resultado do ensaio de teor de matérias voláteis da lenha de eucalipto

AMOSTRA	MASSA DO CADINHO (g)	MASSA AMOSTRA SECA (g)	MASSA CADINHO + RESÍDUO (g)	TEOR DE VOLÁTEIS (%)
E-1	47,8168	1,0051	47,9683	84,93
E-3	46,4816	1,0020	46,6279	85,40
Média =				85,16

APÊNDICE D – MEDIDAS DOS COMPRIMENTOS LONGITUDINAIS DOS BRIQUETES AO LONGO DO ENSAIO DE EXPANSÃO

Tabela D.1 – Medidas dos comprimentos longitudinais do B9,5 ao longo do ensaio de expansão

Corpos-de-Prova	E		X	P	A	N	S	Ã	O				
	1 min	2 min	3 min	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	720 min	1440 min	10080 min	21600 min
1	37,4	37,7	37,8	38,0	38,2	38,4	38,2	38,2	38,1	38,0	38,0	37,9	37,9
2	38,6	38,8	38,9	39,0	39,1	39,2	39,3	39,1	39,1	39,0	38,8	38,7	38,7
3	42,1	42,3	42,4	42,6	42,7	42,8	42,8	42,7	42,6	42,6	42,4	42,3	42,3
4	38,5	39,2	39,5	39,6	40,2	40,3	40,4	40,4	40,3	40,3	40,2	40,0	39,9
5	38,5	38,6	38,8	38,9	39,0	39,1	39,0	38,9	38,9	38,9	38,8	38,8	38,7
6	35,9	36,1	36,2	36,2	36,4	36,5	36,4	36,3	36,3	36,4	36,1	36,4	36,0
7	38,1	38,2	38,3	38,5	38,6	38,6	38,5	38,5	38,3	38,3	38,1	38,1	38,1
8	39,0	39,2	39,3	39,5	39,7	39,7	39,7	39,6	39,5	39,6	39,7	39,4	39,5
9	40,7	41,7	41,6	42,0	42,5	42,8	42,8	42,7	42,6	42,5	42,1	42,0	41,8
10	41,3	41,6	41,8	42,2	42,5	42,6	42,7	42,5	42,4	42,4	42,1	41,9	41,8

Tabela D.2 – Medidas dos comprimentos longitudinais do B8,5 ao longo do ensaio de expansão

Corpos-de-Prova	E		X	P	A	N	S	Ã	O				
	1 min	2 min	3 min	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min	120 min	720 min	1440 min	10080 min	21600 min
1	37,3	37,5	37,6	37,8	37,9	38,0	38,0	37,9	37,9	37,8	37,7	37,5	37,5
2	39,8	40,0	40,1	40,2	40,3	40,4	40,4	40,3	40,1	40,1	40,0	40,0	40,0
3	25,1	25,2	25,3	25,4	25,5	25,5	25,5	25,4	25,4	25,4	25,3	25,2	25,2
4	37,5	37,7	37,8	37,9	38,1	38,2	38,2	38,1	38,0	37,9	37,8	37,8	37,7
5	32,1	32,3	32,5	32,6	32,8	32,9	33,2	33,2	33,1	33,0	32,7	32,6	32,5
6	36,5	36,7	36,9	37,0	37,2	37,2	37,2	37,2	37,1	37,0	36,9	36,9	36,8
7	27,5	27,6	27,7	27,8	27,8	27,9	27,8	27,8	27,8	27,6	27,7	27,7	27,7
8	37,3	37,6	37,9	38,1	38,3	38,4	38,4	38,4	38,3	38,3	38,0	38,0	37,9
9	35,4	35,7	35,9	36,2	36,7	36,8	36,8	36,8	36,8	36,7	36,6	36,6	36,5
10	34,8	34,9	35,1	35,2	35,3	35,3	35,2	35,1	35,0	35,0	34,9	34,9	34,9

APÊNDICE E – VALORES DA TEMPERATURA AMBIENTE E DA UMIDADE RELATIVA DO AR EM BRASÍLIA, NO PERÍODO DO ENSAIO DE EXPANSÃO LONGITUDINAL DOS BRIQUETES

Tabela E.1 – Temperatura ambiente no período do ensaio (°C)

IDADE	DATA	9:00 AM	15:00 PM	21:00 PM	Média
Fabricação	7/7/06	17,5	25,0	17,6	20,0
1 dia	8/7/06	19,0	25,9	19,9	21,6
2 dias	9/7/06	21,1	27,4	21,3	23,3
3 dias	10/7/06	21,7	26,2	21,4	23,1
4 dias	11/7/06	19,1	25,4	19,5	21,3
5 dias	12/7/06	17,3	23,8	18,6	19,9
6 dias	13/7/06	16,3	21,9	17,9	18,7
7 dias	14/7/06	15,7	22,1	16,8	18,2
8 dias	15/7/06	15,7	20,2	16,9	17,6
9 dias	16/7/06	15,8	21,2	17,4	18,1
10 dias	17/7/06	16,5	22,6	18,7	19,3
11 dias	18/7/06	17,2	22,8	19,0	19,7
12 dias	19/7/06	18,0	23,8	17,4	19,7
13 dias	20/7/06	19,3	25,6	19,4	21,4
14 dias	21/7/06	20,1	25,4	20,4	22,0
15 dias	22/7/06	19,4	26,5	19,4	21,8
16 dias	23/7/06	18,5	25,2	19,1	20,9
17 dias	24/7/06	20,1	26,3	20,8	22,4
18 dias	25/7/06	19,2	26,3	20,8	22,1
19 dias	26/7/06	21,4	26,6	20,3	22,8
20 dias	27/7/06	21,8	27,4	21,3	23,5
21 dias	28/7/06	22,6	27,2	21,8	23,9
22 dias	29/7/06	24,6	28,7	21,2	24,8
23 dias	30/7/06	20,9	28,2	23,3	24,1
24 dias	31/7/06	20,2	27,0	19,8	22,3
25 dias	1/8/06	20,5	26,4	20,8	22,6
26 dias	2/8/06	19,7	26,2	22,1	22,7
27 dias	3/8/06	20,5	26,9	22,1	23,2
28 dias	4/8/06	21,6	26,0	22,0	23,2
29 dias	5/8/06	21,2	26,1	21,2	22,8
30 dias	6/8/06	20,0	25,3	20,9	22,1

Tabela E.2 – Umidade relativa do ar no período do ensaio (%)

DATA	9:00 AM	15:00 PM	21:00 PM	Média
7/7/06	65	34	59	53
8/7/06	66	39	61	55
9/7/06	58	34	55	49
10/7/06	55	33	41	43
11/7/06	52	37	51	47
12/7/06	61	38	59	53
13/7/06	85	52	67	68
14/7/06	73	30	50	51
15/7/06	67	38	53	53
16/7/06	72	45	59	59
17/7/06	77	47	63	62
18/7/06	71	35	57	54
19/7/06	58	36	67	54
20/7/06	51	30	48	43
21/7/06	40	25	38	34
22/7/06	40	20	38	33
23/7/06	38	22	38	33
24/7/06	31	22	45	33
25/7/06	49	36	54	46
26/7/06	44	34	54	44
27/7/06	40	29	51	40
28/7/06	44	30	52	42
29/7/06	37	29	58	41
30/7/06	62	33	50	48
31/7/06	76	45	77	66
1/8/06	69	42	64	58
2/8/06	75	43	63	60
3/8/06	64	33	52	50
4/8/06	55	35	50	47
5/8/06	51	30	47	43
6/8/06	60	35	47	47

APÊNDICE F – RASTREAMENTO DAS VAGONETAS AO LONGO DAS ZONAS DE PEAQUECIMENTO E DE QUEIMA DO FORNO,
 NA QUEIMA DOS BLOCOS CERÂMICOS A PARTIR DOS BRIQUETES

Nº da Vagoneta =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Comprimento Vag=	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,60	1,50	1,60	1,60
Comp. Acumulado=	1,50	3,00	4,60	6,20	7,70	9,20	10,80	12,30	13,80	15,40	17,00	18,50	20,10	21,60	23,20	24,70	26,30	27,90

Tempo consumido individualmente =	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:31:09
Início:																		
17:21:21	17:50:33	18:19:45	18:50:54	19:22:03	19:51:15	20:20:27	20:51:36	21:20:48	21:50:00	22:21:09	22:52:18	23:21:30	23:52:39	00:21:51	00:53:00	01:22:12	01:53:21	02:24:30
Dia:	12/06/2006																	

Figura F.1 – Rastreamento das vagonetas na zona de preaquecimento do forno, na queima dos blocos a partir dos briquetes

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
																				1,50 m
o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	0,20	
29,40	30,90	32,40	33,90	35,50	37,00	38,50	40,00	41,50	43,10	44,60	46,10	47,70	49,20	50,80	52,30	53,80	55,30	56,80	57,00	

00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:03:54
02:53:42	03:22:54	03:52:06	04:21:18	04:52:27	05:21:39	05:50:51	06:20:03	06:49:15	07:20:24	07:49:36	08:18:48	08:49:57	09:19:09	09:50:18	10:19:30	10:48:42	11:17:54	11:47:06	11:51:00

13/6/2006

Figura F.2 – Continuação do rastreamento das vagonetas na zona de preaquecimento do forno, na queima dos blocos a partir dos briquetes

Nº da Vagoneta =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
															1,60 m
	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Comprimento Vag=	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,40
Comp. Acumulado=	1,50	3,00	4,60	6,20	7,70	9,20	10,80	12,30	13,80	15,40	17,00	18,50	20,10	21,60	23,00
Quantidade blocos=	480	480	500	500	480	480	500	480	480	500	500	480	500	480	448
	= 7288 Blocos														

Tempo consumido individualmente =	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:27:15	TOTAL
Início:																
11:51:00	12:20:12	12:49:24	13:20:33	13:51:42	14:20:54	14:50:06	15:21:15	15:50:27	16:19:39	16:50:48	17:21:57	17:51:09	18:22:18	18:51:30	19:18:45	
13/6/2006	13/6/2006															

Vagoneta de 1,50 m.	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,50
	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:29:12

Vagoneta de 1,60 m.	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,10	1,60
	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:01:57	00:31:09

Quando entra só 1,40 m.	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,15	1,40
	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:02:55	00:27:15

Figura F.3 – Rastreamento das vagonetas da primeira queima dos blocos a partir do B9,5

Nº da Vagoneta =	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	1,60 m															1,50 m
	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Comprimento Vag=	0,20	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	1,40
Comp. Acumulado=	0,20	1,70	3,30	4,90	6,40	7,90	9,40	10,90	12,50	14,00	15,50	17,00	18,50	20,10	21,60	23,00
Quantidade blocos=	64	480	500	500	480	480	480	480	500	480	480	480	480	500	480	448
	= 7312 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:03:54	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:27:15	TOTAL
Início:																	
19:18:45	19:22:39	19:51:51	20:23:00	20:54:09	21:23:21	21:52:33	22:21:45	22:50:57	23:22:06	23:51:18	00:20:30	00:49:42	01:18:54	01:50:03	02:19:15	02:46:30	
13/6/2006																14/6/2006	

Quando só entra 0,20 m	0,20	0,20
	00:03:54	00:03:54

Figura F.4 – Rastreamento das vagonetas na segunda parte da primeira queima dos blocos a partir do B9,5

Nº da Vagoneta =	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
	1,50 m															1,50 m
Comprimento Vag=	0,10	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	1,60	1,50	1,60	1,40
Comp. Acumulado=	0,10	1,70	3,20	4,80	6,30	7,80	9,30	10,80	12,30	13,80	15,40	16,90	18,50	20,00	21,60	23,00
Quantidade blocos=	32	500	480	500	480	480	480	480	480	480	500	480	500	480	500	448
	= 7300 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:01:57	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:27:15	TOTAL
Início:	02:46:30	02:48:27	03:19:36	03:48:48	04:19:57	04:49:09	05:18:21	05:47:33	06:16:45	06:45:57	07:15:09	07:46:18	08:15:30	08:46:39	09:15:51	09:47:00	10:14:15
	14/6/2006															14/6/2006	

Quando entra só	0,10	0,10 m
0,10 m		
	00:01:57	00:01:57

Figura F.5 – Rastreamento das vagonetas da segunda queima dos blocos a partir do B9,5.

Nº da Vagoneta =	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
	1,50 m																1,50 m
Comprimento Vag=	0,10	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	0,20
Comp. Acumulado=	0,10	1,60	3,20	4,70	6,20	7,70	9,20	10,70	12,20	13,70	15,30	16,80	18,30	19,80	21,30	22,80	23,00
Quantidade blocos=	32	480	500	480	480	480	480	480	480	480	500	480	480	480	480	480	64
	= 7336 Blocos																

Tempo consumido individualmente =	00:01:57	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	TOTAL 07:27:45
Início:																	
10:14:15	10:16:12	10:45:24	11:16:33	11:45:45	12:14:57	12:44:09	13:13:21	13:42:33	14:11:45	14:40:57	15:12:06	15:41:18	16:10:30	16:39:42	17:08:54	17:38:06	17:42:00
14/6/2006																	14/6/2006

Quando entra só	0,30	0,30 m
	0,30 m	
	00:05:50	00:05:50

Figura F.6 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da segunda queima dos blocos a partir do B9,5.

Nº da Vagoneta =	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
	1,50 m															1,60 m
Comprimento Vag=	1,30	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	0,40
Comp. Acumulado=	1,30	2,80	4,30	5,80	7,30	8,90	10,50	12,00	13,50	15,00	16,50	18,00	19,50	21,00	22,60	23,00
Quantidade blocos=	416	480	480	480	480	500	500	480	480	480	480	480	480	480	500	128
	= 7324 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:25:18	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:07:48	TOTAL
Início:																	
17:42:00	18:07:18	18:36:30	19:05:42	19:34:54	20:04:06	20:35:15	21:06:24	21:35:36	22:04:48	22:34:00	23:03:12	23:32:24	00:01:36	00:30:48	01:01:57	01:09:45	
14/6/2006																15/6/2006	

Quando entra só 0,50 m.	0,25	0,25	0,50 m
	00:04:52	00:04:52	

Quando entra só 1,20 m	0,25	0,25	0,25	0,25	0,20	1,20 m
	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:03:54	

Figura F.7 – Rastreamento das vagonetas da terceira queima dos blocos a partir do B9,5

Nº da Vagoneta =	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
	1,60 m															1,60 m
Comprimento Vag=	1,20	1,60	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	0,20
Comp. Acumulado=	1,20	2,80	4,40	6,00	7,50	9,10	10,60	12,20	13,70	15,20	16,80	18,30	19,80	21,30	22,80	23,00
Quantidade blocos=	384	500	500	500	480	500	480	500	480	480	500	480	480	480	480	64
	= 7288 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:23:22	00:31:09	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:03:54	TOTAL
Início:																	
01:09:44	01:33:06	02:04:15	02:35:24	03:06:33	03:35:45	04:06:54	04:36:06	05:07:15	05:36:27	06:05:39	06:36:48	07:06:00	07:35:12	08:04:24	08:33:36	08:37:30	
15/6/2006																15/6/2006	

Quando entra só	0,25	0,25	0,25	0,25	0,10	1,10 m
1,10 m						
	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:01:57	00:21:25

Figura F.8 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da terceira queima dos blocos a partir do B9,5

Nº da Vagoneta =	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106
	1,60 m															1,50 m
Comprimento Vag=	1,40	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	1,50	0,30
Comp. Acumulado=	1,40	2,90	4,40	5,90	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50	15,00	16,60	18,20	19,70	21,20	22,70	23,00
Quantidade blocos=	448	480	480	480	500	480	480	480	480	480	500	500	480	480	480	96
	= 7324 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:27:15	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:05:50	TOTAL
Início:																	
08:37:30	9:04:45	9:33:57	10:03:09	10:32:21	11:03:30	11:32:42	12:01:54	12:31:06	13:00:18	13:29:30	14:00:39	14:31:48	15:01:00	15:30:12	15:59:24	16:05:14	
15/6/2006																	

Quando entra só 0,40 m.	0,25	0,15	0,40 m
	00:04:52	00:02:55	00:07:47

Quando entra só 1,30 m	0,25	0,25	0,25	0,25	0,30	1,30 m
	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:05:50	00:25:18

Figura F.9 – Rastreamento das vagonetas da primeira queima dos blocos a partir do B8,5

Nº da Vagoneta =	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
	1,50 m														1,60 m
Comprimento Vag=	1,20	1,50	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,60
Comp. Acumulado=	1,20	2,70	4,30	5,90	7,40	9,00	10,50	12,10	13,70	15,20	16,80	18,30	19,80	21,40	23,00
Quantidade blocos=	384	480	500	500	480	500	480	500	500	480	500	480	480	500	500
	= 7264 Blocos														

Tempo consumido individualmente =	00:23:22	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	TOTAL
Início:																
16:05:14	16:28:36	16:57:48	17:28:57	18:00:06	18:29:18	19:00:27	19:29:39	20:00:48	20:31:57	21:01:09	21:32:18	22:01:30	22:30:42	23:01:51	23:33:00	
15/6/2006															15/6/2006	

Figura F.10 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da primeira queima dos blocos a partir do B8,5

Nº da Vagoneta =	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
															1,50 m
	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Comprimento Vag=	1,50	1,50	1,60	1,50	1,60	1,50	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,60	1,40
Comp. Acumulado=	1,50	3,00	4,60	6,10	7,70	9,20	10,80	12,30	13,90	15,40	16,90	18,50	20,00	21,60	23,00
Quantidade blocos=	480	480	500	480	500	480	500	480	500	480	480	500	480	500	448

= 7288 Blocos

																TOTAL
Tempo consumido individualmente =	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:27:15	
Início:																
23:33:00	00:02:12	00:31:24	01:02:33	01:31:45	02:02:54	02:32:06	03:03:15	03:32:27	04:03:36	04:32:48	05:02:00	05:33:09	06:02:21	06:33:30	07:00:45	
15/6/2006																16/6/2006

Figura F.11 – Rastreamento das vagonetas da segunda queima dos blocos a partir do B8,5

Nº da Vagoneta =	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
Comprimento Vag=	0,10	1,60	1,60	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,10
Comp. Acumulado=	0,10	1,70	3,30	4,80	6,40	8,00	9,50	11,00	12,60	14,20	15,70	17,30	18,80	20,30	21,90	23,00
Quantidade blocos=	32	500	500	480	500	500	480	480	500	500	480	500	480	480	500	352
	= 7264 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:01:57	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:21:25	TOTAL
Início:																	
07:00:45	07:02:42	07:33:51	08:05:00	08:34:12	09:05:21	09:36:30	10:05:42	10:34:54	11:06:03	11:37:12	12:06:24	12:37:33	13:06:45	13:35:57	14:07:06	14:28:31	
16/6/2006																16/6/2006	

Figura F.12 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da segunda queima dos blocos a partir do B8,5

Nº da Vagoneta =	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
	1,50 m															1,50 m
Comprimento Vag=	0,10	1,60	1,60	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,10
Comp. Acumulado=	0,10	1,70	3,30	4,80	6,40	8,00	9,50	11,00	12,60	14,20	15,70	17,30	18,80	20,30	21,90	23,00
Quantidade blocos=	32	500	500	480	500	500	480	480	500	500	480	500	480	480	500	352
																= 7264 Blocos

Tempo consumido individualmente =	00:01:57	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:21:25	TOTAL
Início:																	
07:00:45	07:02:42	07:33:51	08:05:00	08:34:12	09:05:21	09:36:30	10:05:42	10:34:54	11:06:03	11:37:12	12:06:24	12:37:33	13:06:45	13:35:57	14:07:06	14:28:31	
16/6/2006																	16/6/2006

Figura F.13 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da segunda queima dos blocos a partir do B8,5

Nº da Vagoneta =	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165
	1,50 m															1,60 m
Comprimento Vag=	0,40	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,20
Comp. Acumulado=	0,40	1,90	3,50	5,00	6,50	8,00	9,50	11,10	12,70	14,20	15,70	17,30	18,80	20,30	21,80	23,00
Quantidade blocos=	128	480	500	480	480	480	480	500	500	480	480	500	480	480	480	384
	= 7312 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:07:48	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:23:22	TOTAL
Início:																	
14:28:31	14:36:19	15:05:31	15:36:40	16:05:52	16:35:04	17:04:16	17:33:28	18:04:37	18:35:46	19:04:58	19:34:10	20:05:19	20:34:31	21:03:43	21:32:55	21:56:17	
16/6/2006																	16/6/2006

Figura F.14 – Rastreamento das vagonetas da terceira queima dos blocos a partir do B8,5

Nº da Vagoneta =	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
	1,60 m															1,50 m
Comprimento Vag=	0,40	1,50	1,50	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,60	1,00
Comp. Acumulado=	0,40	1,90	3,40	5,00	6,50	8,10	9,60	11,10	12,70	14,20	15,80	17,30	18,80	20,40	22,00	23,00
Quantidade blocos=	128	480	480	500	480	500	480	480	500	480	500	480	480	500	500	320
	= 7288 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:07:48	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:19:28	TOTAL
Início:																	
21:56:17	22:04:05	22:33:17	23:02:29	23:33:38	00:02:50	00:33:59	01:03:11	01:32:23	02:03:32	02:32:44	03:03:53	03:33:05	04:02:17	04:33:26	05:04:35	05:24:03	
16/6/2006																17/6/2006	

Figura F.15 – Rastreamento das vagonetas da segunda parte da terceira queima dos blocos a partir do B8,5

Nº da Vagoneta =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Comp. Vag=	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	
Comp. Acumulado=	1,50	3,10	4,60	6,10	7,60	9,10	10,60	12,20	13,80	15,40	16,90	18,40	20,00	21,50	23,10	24,70	26,20	27,70	

Tempo consumido individualmente =	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12
Início:																		
17:21:21	17:52:30	18:23:39	18:52:51	19:22:03	19:51:15	20:20:27	20:49:39	21:20:48	21:51:57	22:23:06	22:52:18	23:21:30	23:52:39	23:14:54	23:46:03	00:17:12	00:46:24	01:15:36
Dia:	27/06/2006																	

Figura F.16 – Rastreamento das vagonetas na zona de preaquecimento da queima dos blocos a partir da LE

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
																				1,50 m
○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1,60	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	0,10	
29,30	30,80	32,30	33,80	35,40	37,00	38,60	40,10	41,70	43,20	44,70	46,20	47,70	49,20	50,70	52,20	53,70	55,30	56,90	57,00	

00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:01:57
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

01:46:45	02:15:57	02:45:09	03:14:21	03:45:30	04:16:39	04:47:48	05:17:00	05:48:09	06:17:21	06:46:33	07:15:45	07:44:57	08:14:09	08:43:21	09:12:33	09:41:45	10:12:54	10:44:03	10:46:00
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

28/6/2006

Figura F.17 – Continuação dos rastreamento das vagonetas na zona de preaquecimento da queima dos blocos a partir da LE

Nº da Vagoneta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
															1,60
Comprimento Vag=	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50
Comp. Acumulado =	1,50	3,10	4,60	6,10	7,60	9,10	10,60	12,20	13,80	15,40	16,90	18,40	20,00	21,50	23,00
Quantidade blocos =	480	500	480	480	480	480	480	500	500	500	480	480	500	480	480
	= 7300 Blocos														

Tempo consumido individualmente	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	TOTAL
Início:																
10:46:00	11:15:12	11:46:21	12:15:33	12:44:45	13:13:57	13:43:09	14:12:21	14:43:30	15:14:39	15:45:48	16:15:00	16:44:12	17:15:21	17:44:33	18:13:45	07:27:45
28/6/2006															28/6/2006	

Figura F.18 – Rastreamento das vagonetas da primeira queima dos blocos a partir da LE

Nº da Vagoneta	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	1,60															1,50
Comprimento Vag. =	0,10	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,30
Comp. Acumulado =	0,10	1,70	3,20	4,70	6,30	7,80	9,30	10,80	12,40	14,00	15,60	17,10	18,70	20,20	21,70	23,00
Quantidade Blocos=	32	500	480	480	500	480	480	480	500	500	500	480	500	480	480	416
	= 7288 Blocos															

Tempo consumido individualmente	00:01:57	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:25:18	TOTAL
Início:																	
18:13:45	18:15:42	18:46:51	19:16:03	19:45:15	20:16:24	20:45:36	21:14:48	21:44:00	22:15:09	22:46:18	23:17:27	23:46:39	00:17:48	00:47:00	01:16:12	01:41:30	
28/6/2006																29/6/2006	

Figura F.19 – Rastreamento das vagonetas na segunda parte da primeira queima dos blocos a partir da LE

Nº da Vagoneta =	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
	1,50															1,60
Comprimento Vag.=	0,20	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Comp. Acumulado=	0,20	1,70	3,20	4,70	6,20	7,70	9,30	10,90	12,40	13,90	15,50	17,00	18,50	20,00	21,50	23,00
Quantidade Blocos =	64	480	480	480	480	480	500	500	480	480	500	480	480	480	480	480
	= 7324 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:03:54	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	TOTAL
Início:	01:41:30	01:45:24	02:14:36	02:43:48	03:13:00	03:42:12	04:11:24	04:42:33	05:13:42	05:42:54	06:12:06	06:43:15	07:12:27	07:41:39	08:10:51	08:40:03	09:09:15
	29/6/2006																29/6/2006

Figura F.20 – Rastreamento das vagonetas da segunda queima dos blocos a partir da LE

Nº da Vagoneta =	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Comprimento Vag.=	0,10	1,60	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,40
Comp. Acumulado=	0,10	1,70	3,20	4,70	6,20	7,80	9,30	10,80	12,40	14,00	15,50	17,10	18,60	20,10	21,60	23,00
Quantidade Blocos=	32	500	480	480	480	500	480	480	500	500	480	500	480	480	480	448
	= 7300 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:01:57	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:27:15	TOTAL
Início:																	
09:09:15	9:11:12	9:42:21	10:11:33	10:40:45	11:09:57	11:41:06	12:10:18	12:39:30	13:10:39	13:41:48	14:11:00	14:42:09	15:11:21	15:40:33	16:09:45	16:37:00	
29/6/2006																	29/6/2006

Quando entra só 0,40 m.	0,25	0,15	0,40 m
	00:04:52	00:02:55	00:07:47

Quando entra só 1,30 m.	0,25	0,25	0,25	0,25	0,30	1,30 m
	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:04:52	00:05:50	00:25:18

Figura F.21 – Rastreamento das vagonetas na segunda parte da segunda queima dos blocos a partir da LE

Nº da Vagoneta =	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
	1,60 m															
Comprimento Vag.=	0,20	1,50	1,50	1,60	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50
Comp. Acumulado=	0,20	1,70	3,20	4,80	6,30	7,80	9,30	10,80	12,30	13,80	15,30	16,80	18,30	19,90	21,50	23,00
Quantidade Blocos=	64	480	480	500	480	480	480	480	480	480	480	480	480	500	500	480
	= 7324 Blocos															

Tempo consumido individualmente =	00:03:54	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:29:12	TOTAL
Início:																	
16:37:00	16:40:54	17:10:06	17:39:18	18:10:27	18:39:39	19:08:51	19:38:03	20:07:15	20:36:27	21:05:39	21:34:51	22:04:03	22:33:15	23:04:24	23:35:33	00:04:45	
29/6/2006																30/6/2006	

Figura F.22 – Rastreamento das vagonetas da terceira queima dos blocos a partir da LE

Nº da Vagoneta =	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
																1,50 m
	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Comprimento Vag=	1,50	1,50	1,50	1,60	1,50	1,60	1,60	1,60	1,50	0,10						
Comp. Acumulado=	1,50	3,00	4,50	6,10	7,60	9,20	10,80	12,40	13,90	15,40	16,90	18,40	19,90	21,40	22,90	23,00
Quantidade Blocos=	480	480	480	500	480	500	500	500	480	480	480	480	480	480	480	32
																= 7312 Blocos

Tempo consumido individualmente =	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:31:09	00:29:12	00:31:09	00:31:09	00:31:09	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:29:12	00:01:57	TOTAL
Início:																	
00:04:45	00:33:57	01:03:09	01:32:21	02:03:30	02:32:42	03:03:51	03:35:00	04:06:09	04:35:21	05:04:33	05:33:45	06:02:57	06:32:09	07:01:21	07:30:33	07:32:30	
30/6/2006																	30/6/2006

Figura F.23 – Rastreamento das vagonetas na segunda parte da terceira queima dos blocos a partir da LE

APÊNDICE G – TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS NA CÂMARA DE QUEIMA DOS BLOCOS A PARTIR DE B9,5; B8,5 e LE,
APÓS CADA CARGA DESSES COMBUSTÍVEIS

Tabela G.1 – Temperaturas máximas e mínimas na primeira queima dos blocos a partir do B9,5

CARGA	TEMPERATURA MÁXIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÁXs.	TEMPERATURA MÍNIMA	INTERVALO ENTRE MÍNs.	INTERVALO ENTRE MÁX e MÍNs.	HORA	OBSERVAÇÃO	
8ª	808			760				Início no plantão de Valdivino às 11:51 h. em 13/06/2006	
9ª	796			747					
10ª	817			743					
11ª	826			805					
12ª	823			802					
13ª	825	14:00		779					Última carga Valdivino
1ª	823	14:00		777					
2ª	812			782					
3ª	783			762					
4ª	778			747					
5ª	773			738					
6ª	790			764					
7ª	801			768					
8ª	778			728					
9ª	736			729					
10ª	774			748					
11ª	817			788					
12ª	798			789					
13ª	815	22:00		780				Última carga Daniel	
1ª	813	22:00		789					1ª carga Claudionor
2ª	786			768					
3ª	806			768					
4ª	809			770					
5ª	777			758					
6ª	798			761					
7ª	776			750					
8ª	767			763				Conclusão no plantão de Claudionor às 02:47 h. em 14/06/2006	
9ª	781			753					

Temperatura Média Máxima = 796

Temperatura Máxima Registrada = 826

Temperatura Média Mínima = 765

Temperatura Mínima Registrada = 728

Tabela G.2 – Temperaturas máximas e mínimas na segunda queima dos blocos a partir do B9,5

CARGA	TEMPERATURA MÁXIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÁXs.	TEMPERATURA MÍNIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÍNs.	INTERVALO ENTRE MÁX e MÍN	OBSERVAÇÃO
10 ^a	795	02:47		752				Início no plantão de Claudionor às 02:47 h. em 14/06/2006
11 ^a	782			732				
12 ^a	767			759				
13 ^a	794	06:00		780				Última carga Claudionor
1 ^a	811	06:00		773				1 ^a carga Weslei
2 ^a	809			716				
3 ^a	730			714				
4 ^a	782			779				
5 ^a	809			758				
6 ^a	830			826				
7 ^a	860			798				
8 ^a	804			760				
9 ^a	844			789				
10 ^a	842			762				
11 ^a	844	12:47		784	13:12		00:25	Última carga Weslei
12 ^a	812	13:17	00:30	797	13:48	00:36	00:31	
13 ^a	812	13:57	00:40	741	14:31	00:43	00:34	
1 ^a	781	14:48	00:51	739	15:08	00:37	00:20	1 ^a carga Valdivino
2 ^a	810	15:35	00:47	779	15:48	00:40	00:13	
3 ^a	815	16:10	00:35	772	16:33	00:45	00:23	Conclusão no plantão de Valdivino às 17:43 h. em 14/06/2006
4 ^a	853	16:55	00:45	767	17:34	01:01	00:39	
5 ^a	825	17:48	00:53	758	18:23	00:49	00:35	

Temperatura Média Máxima = 810

Temperatura Média Mínima = 765

Temperatura Máxima Registrada = 860

Temperatura Mínima Registrada = 714

Tabela G.3 – Temperaturas máximas e mínimas na terceira queima dos blocos a partir do B9,5

CARGA	TEMPERATURA MÁXIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÁXs.	TEMPERATURA MÍNIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÍNs.	INTERVALO ENTRE MÁX e MÍN.	OBSERVAÇÃO
6ª	812	18:44	00:56	763	19:07	00:44	00:23	Início no plantão de Valdivino, às 17:43 h. em 14/06/2006
7ª	812	19:19	00:35	759	19:48	00:41	00:29	
8ª	810	20:08	00:49	770	20:29	00:41	00:21	
9ª	809	20:42	00:34	780	21:13	00:44	00:31	
10ª	812	21:20	00:38	805	21:36	00:23	00:16	
1ª	844	21:58	00:38	804	22:23	00:47	00:25	Última carga Valdivino
2ª	836	22:40	00:42	809	23:03	00:40	00:23	
3ª	831	23:15	00:35	784	23:42	00:39	00:27	
4ª	814	23:50	00:35	798	00:08	00:26	00:18	
5ª	831	00:23	00:33	765	00:58	00:50	00:35	
6ª	816	01:45	01:22	787	02:03	01:05	00:18	
7ª	810	02:16	00:31	775	02:45	00:42	00:29	
8ª	819	02:59	00:43	763	03:24	00:39	00:25	
9ª	810	03:47	00:48	777	04:12	00:48	00:25	
10ª	824	04:26	00:39	795	04:45	00:33	00:19	
11ª	813	04:52	00:26	766	05:23	00:38	00:31	
12ª	810	05:40	00:48	762	06:13	00:50	00:33	
1ª	788	06:33	00:53	778	06:43	00:30	00:10	1ª carga Daniel
2ª	814	06:55	00:22	763	07:19	00:36	00:24	
3ª	772	07:32	00:37	766	07:45	00:26	00:13	
4ª	797	07:54	00:22	752	08:27	00:42	00:33	
5ª	806	08:46	00:52	753	09:06	00:39	00:20	
								Última carga Daniel
								1ª carga Claudionor
								Conclusão no plantão de Claudionor às 08:39 h. em 15/06/2006

Temperatura Média Máxima = 813

Temperatura Média Mínima = 776

Temperatura Máxima Registrada = 844

Temperatura Mínima Registrada = 752

Tabela G.4 – Temperaturas máximas e mínimas na primeira queima dos blocos a partir do B8,5

CARGA	TEMPERATURA MÁXIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÁXs.	TEMPERATURA MÍNIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÍNs.	INTERVALO ENTRE MÁX e MÍN	OBSERVAÇÃO	
6ª	756	09:16		747	09:29		00:13	Início no plantão Claudionor às 08:39 h. em 15/06/2006	
7ª	821	09:45	00:29	747	10:17	00:48	00:32		
8ª	781	10:39	00:54	760	11:00	00:43	00:21		
9ª	804	11:15	00:36	744	11:41	00:41	00:26		
10ª	776	12:04	00:49	766	12:08	00:27	00:04		
11ª	812	12:12	00:08	780	12:40	00:32	00:28		
12ª	812	12:47	00:35	756	13:21	00:41	00:34		
13ª	807	13:30	00:43	780	13:50	00:29	00:20		Última carga Claudionor
1ª	804	14:00	00:30	752	14:32	00:42	00:32		1ª carga Wesley
2ª	792	14:52	00:52	769	15:05	00:33	00:13		
3ª	843	15:16	00:24	782	15:42	00:37	00:26		
4ª	811	15:48	00:32	784	16:11	00:29	00:23		
5ª	856	16:15	00:27	798	16:47	00:36	00:32		
6ª	842	17:02	00:47	741	17:34	00:47	00:32		
8ª	800	17:43	00:41	748	18:24	00:50	00:41		
9ª	793	18:40	00:57	743	19:12	00:48	00:32		
10ª	772	19:40	01:00	742	19:50	00:38	00:10		
11ª	833	20:04	00:24	776	20:33	00:43	00:29		
12ª	823	20:58	00:54	812	21:03	00:30	00:05		
13ª	849	21:12	00:14	812	21:46	00:43	00:34	Última carga Wesley	
14ª	848	22:00	00:48	783	22:33	00:47	00:33	1ª carga Valdivino	
1ª	814	22:44	00:44	794	23:17	00:44	00:33		
2ª	830	23:29	00:45	753	00:20	01:03	00:51		

Temperatura Média Máxima = 812

Temperatura Média Mínima = 768

Temperatura Máxima Registrada = 856

Temperatura Mínima Registrada = 741

Tabela G.5 – Temperaturas máximas e mínimas na segunda queima dos blocos a partir do B8,5

CARGA	TEMPERATURA MÁXIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÁXs.	TEMPERATURA MÍNIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÍNs.	INTERVALO ENTRE MÁX e MÍN	OBSERVAÇÃO	
3ª	895	00:43		783	01:25		00:42	Início no plantão Valdivino às 23:35 h. em 15/06/2006	
4ª	852	01:52	01:09	784	02:19	00:54	00:27		
5ª	904	02:45	00:53	774	03:37	01:18	00:52		
6ª	856	04:00	01:15	766	04:38	01:01	00:38		
7ª	884	05:08	01:08	761	05:49	01:11	00:41		
8ª	858	06:08	01:00	763	06:43	00:54	00:35		Última carga Valdivino
1ª	813	06:50	00:42	754	07:21	00:38	00:31		1ª carga Daniel
2ª	799	07:40	00:50	780	07:50	00:29	00:10		
3ª	832	07:53	00:13	777	08:23	00:33	00:30		
4ª	840	08:42	00:49	789	08:53	00:30	00:11		
5ª	806	09:02	00:20	780	09:20	00:27	00:18		
6ª	837	09:38	00:36	777	10:06	00:46	00:28		
7ª	819	10:33	00:55	806	10:37	00:31	00:04		
8ª	814	10:46	00:13	760	11:05	00:28	00:19		
9ª	798	11:16	00:30	766	11:37	00:32	00:21		
10ª	832	11:54	00:38	828	12:12	00:35	00:18		
11ª	836	12:27	00:33	752	13:00	00:48	00:33		
12ª	796	13:23	00:56	779	13:27	00:27	00:04		
13ª	842	13:43	00:20	767	14:15	00:48	00:32	Última carga Daniel	
1ª	818	14:31	00:48	748	14:56	00:41	00:25	Conclusão no plantão Claudionor às 14:31 h. em 16/06/2006	

Temperatura Média Máxima = 837

Temperatura Média Mínima = 775

Temperatura Máxima Registrada = 904

Temperatura Mínima Registrada = 748

Tabela G.6 – Temperaturas máximas e mínimas na terceira queima dos blocos a partir do B8,5

CARGA	TEMPERATURA MÁXIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÁXs.	TEMPERATURA MÍNIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÍNs.	INTERVALO ENTRE MÁX e MÍN	OBSERVAÇÃO	
1ª	802	15:15		735	15:40		00:25	continuação Didi	
2ª	803	15:45	00:30	743	16:14	00:34	00:29		
3ª	800	16:33	00:48	784	16:41	00:27	00:08		
4ª	779	16:50	00:17	743	17:06	00:25	00:16		
5ª	789	17:20	00:30	755	17:38	00:32	00:18		
6ª	770	17:45	00:25	744	18:03	00:25	00:18		
7ª	796	18:18	00:33	753	18:35	00:32	00:17		
8ª	788	18:47	00:29	738	19:05	00:30	00:18		
9ª	809	19:50	01:03	727	20:22	01:17	00:32		
10ª	748	20:32	00:42	726	20:53	00:31	00:21		
11ª	780	21:05	00:33	766	21:18	00:25	00:13		
12ª	802	21:42	00:37	769	21:54	00:36	00:12		
13ª	839	22:05	00:23	771	22:37	00:43	00:32		Última carga Didi
14ª	835	22:55	00:50	800	23:13	00:36	00:18	1ª carga Weslei	
15ª	817	23:20	00:25	781	23:38	00:25	00:18		
16ª	792	23:58	00:38	777	00:05	00:27	00:07		
17ª	835	00:25	00:27	826	00:42	00:37	00:17		
18ª	882	01:06	00:41	870	01:44	01:02	00:38		
19ª	866	02:10	01:04	802	02:34	00:50	00:24		
20ª	867	02:50	00:40	766	03:32	00:58	00:42		
21ª	817	04:00	01:10	800	04:10	00:38	00:10		
22ª	824	04:24	00:24	818	04:44	00:34	00:20		
23ª	863	05:08	00:44	794	05:35	00:51	00:27		Fim trabalho experimental

Temperatura Média Máxima = 813

Temperatura Máxima Registrada = 882

Temperatura Média Mínima = 773

Temperatura Mínima Registrada = 726

Tabela G.7 – Temperaturas máximas e mínimas na primeira queima dos blocos a partir da LE

CARGA	TEMPERATURA MÁXIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÁXs.	TEMPERATURA MÍNIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÍNs.	INTERVALO ENTRE MÁX e MÍN	OBSERVAÇÃO
11 ^a	877	11:16	-	809	11:53	-	00:37	Início no plantão de Daniel, à 10:46 h. de 28/06/2006
12 ^a	842	12:06	00:50	811	12:27	00:34	00:21	
13 ^a	823	12:45	00:39	769	13:07	00:40	00:22	
14 ^a	840	13:23	00:38	760	14:00	00:53	00:37	
1 ^a	802	14:10	00:47	750	14:28	00:28	00:18	Última carga Claudionor 1 ^a carga Claudionor
2 ^a	806	14:45	00:35	760	15:07	00:39	00:22	
3 ^a	824	15:24	00:39	792	15:47	00:40	00:23	
4 ^a	811	15:57	00:33	758	16:13	00:26	00:16	
5 ^a	812	16:22	00:25	766	17:03	00:50	00:41	
6 ^a	799	17:09	00:47	746	17:30	00:27	00:21	
8 ^a	780	17:41	00:32	776	17:42	00:12	00:01	
9 ^a	814	17:45	00:04	739	18:11	00:29	00:26	
10 ^a	798	18:21	00:36	751	18:43	00:32	00:22	
11 ^a	792	18:52	00:31	731	19:13	00:30	00:21	
12 ^a	799	19:22	00:30	734	20:00	00:47	00:38	
13 ^a	798	20:12	00:50	774	20:35	00:35	00:23	
14 ^a	817	20:43	00:31	736	21:12	00:37	00:29	
15 ^a	817	21:22	00:39	806	21:42	00:30	00:20	
16 ^a	858	21:51	00:29	736	22:43	01:01	00:52	
1 ^a	847	22:56	01:05	748	23:36	00:53	00:40	
2 ^a	840	23:46	00:50	772	00:39	01:03	00:53	
3 ^a	790	00:52	01:06	700	01:35	00:56	00:43	
4 ^a	834	01:49	00:57	750	02:15	00:40	00:26	
								Conclusão no plantão de Wesley às 01:42 h. de 29/06/2006

Temperatura Média Máxima = 818

Temperatura Média Mínima = 760

Temperatura Máxima Registrada = 877

Temperatura Mínima Registrada = 700

Tabela G.8 – Temperaturas máximas e mínimas na segunda queima dos blocos a partir da LE

CARGA	TEMPERATURA MÁXIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÁXs.	TEMPERATURA MÍNIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÍNs.	INTERVALO ENTRE MÁX e MÍN	OBSERVAÇÃO
5ª	888	02:33	00:44	762	03:15	01:00	00:42	Início no plantão de Wesley, à 01:42 h. de 29/06/2006
6ª	877	03:35	01:02	829	04:30	01:15	00:55	
7ª	864	04:45	01:10	826	04:49	00:19	00:04	
8ª	863	04:58	00:13	807	05:44	00:55	00:46	
9ª	859	05:50	00:52	787	06:33	00:49	00:43	Última carga Wesley
1ª	859	06:43	00:53	775	07:10	00:37	00:27	1ª carga Valdivino
2ª	858	07:29	00:46	771	07:38	00:28	00:09	
3ª	846	07:50	00:21	771	08:26	00:48	00:36	
4ª	845	08:48	00:58	770	09:22	00:56	00:34	
5ª	841	09:40	00:52	764	10:20	00:58	00:40	
6ª	839	10:40	01:00	761	11:00	00:40	00:20	
7ª	834	11:10	00:30	761	11:37	00:37	00:27	
8ª	831	11:55	00:45	759	12:35	00:58	00:40	
9ª	829	12:47	00:52	758	13:27	00:52	00:40	
10ª	826	13:33	00:46	755	14:13	00:46	00:39	Última carga Valdivino
1ª	825	14:07	00:33	753	14:17	00:04	00:10	1ª carga Daniel
2ª	823	14:30	00:23	744	14:43	00:26	00:13	
3ª	804	14:54	00:24	732	15:15	00:32	00:21	
4ª	800	15:25	00:31	727	15:50	00:35	00:25	
5ª	800	16:00	00:35	723	16:27	00:37	00:27	
6ª	748	16:38	00:38	719	16:55	00:28	00:17	Conclusão no plantão de Daniel, às 16:38 h. de 29/06/2006

Temperatura Média Máxima = 836

Temperatura Média Mínima = 764

Temperatura Máxima Registrada = 888

Temperatura Mínima Registrada = 719

Tabela G.9 – Temperaturas máximas e mínimas na terceira queima dos blocos a partir da LE

CARGA	TEMPERATURA MÁXIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÁXS.	TEMPERATURA MÍNIMA	HORA	INTERVALO ENTRE MÍNs.	INTERVALO ENTRE MÁX e MÍN	OBSERVAÇÃO	
5ª	824	17:03	00:25	752	17:30	00:35	00:27	Início no plantão de Daniel, às 16:38 h. de 29/06/2006	
6ª	819	17:38	00:35	786	17:48	00:18	00:10		
7ª	821	17:58	00:20	764	18:21	00:33	00:23		
8ª	819	18:34	00:36	773	18:48	00:27	00:14		
9ª	827	19:00	00:26	798	19:08	00:20	00:08		
10ª	829	19:28	00:28	778	19:50	00:42	00:22		
11ª	784	19:56	00:28	769	20:04	00:14	00:08		
12ª	802	20:12	00:16	754	20:25	00:21	00:13		
13ª	789	20:35	00:23	771	20:44	00:19	00:09		
14ª	856	20:52	00:17	778	21:38	00:54	00:46		
15ª	809	21:47	00:55	763	21:58	00:20	00:11		Última carga de Daniel
1ª	820	22:08	00:21	758	22:22	00:24	00:14		1ª carga de Claudionor
2ª	813	22:30	00:22	764	22:48	00:26	00:18		
3ª	837	22:56	00:26	737	23:29	00:41	00:33		
4ª	764	23:37	00:41	735	23:48	00:19	00:11		
5ª	774	23:57	00:20	754	0:06	00:18	00:09		
6ª	814	00:16	00:19	755	0:37	00:31	00:21		
7ª	806	00:44	00:28	725	1:14	00:37	00:30		
8ª	768	01:25	00:41	744	1:38	00:24	00:13		
9ª	819	01:46	00:21	745	2:14	00:36	00:28		
10ª	791	02:25	00:39	736	2:46	00:32	00:21		
11ª	786	02:53	00:28	733	3:09	00:23	00:16		
12ª	808	03:19	00:26	740	3:38	00:29	00:19		
13ª	840	03:49	00:30	753	4:18	00:40	00:29		
14ª	850	04:29	00:40	778	4:49	00:31	00:20		
15ª	861	04:59	00:30	774	5:36	00:47	00:37		
16ª	841	05:53	00:54	789	6:11	00:35	00:18	Última carga de Claudionor	
1ª	810	06:20	00:27	774	6:38	00:27	00:18	1ª carga de Wesley	
2ª	894	06:53	00:33	819	7:27	00:49	00:34		
3ª	892	07:39	00:46	796	8:05	00:38	00:26		

Temperatura Média Máxima = 819

Temperatura Máxima Registrada = 894

Temperatura Média Mínima = 763

Temperatura Mínima Registrada = 725

APÊNDICE H – TEMPO DE FUNCIONAMENTO DAS VENTOINHAS

Tabela H.1 – Tempo de funcionamento das ventoinhas na primeira queima a partir do B95

DIA	INÍCIO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	FIM DE FUNCIONAMENTO (HORA)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO (HORA)
Início	11:51	13:04	01:13
11:51	13:13	14:00	00:47
13/6/2006	14:17	14:23	00:06
	14:39	14:48	00:09
	15:00	15:07	00:07
	15:26	15:45	00:19
	16:03	16:29	00:26
	16:34	20:46	04:12
Fim	20:54	21:31	00:37
02:47	21:45	22:23	00:38
14/6/2006	22:35	2:47	04:12

TOTAL = 12:46

Tabela H.2 – Tempo de funcionamento das ventoinhas na segunda queima a partir do B95

DIA	INÍCIO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	FIM DE FUNCIONAMENTO (HORA)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO (HORA)
Início	2:47	5:04	02:17
02:47	5:18	5:40	00:22
14/6/2006	5:53	7:53	02:00
	7:59	8:24	00:25
	9:08	10:49	01:41
	11:20	11:40	00:20
	12:12	12:36	00:24
	13:01	13:20	00:19
	13:22	13:55	00:33
Fim	13:58	16:00	02:02
17:43	16:13	16:43	00:30
14/6/2006	17:16	17:40	00:24

TOTAL = 11:17

Tabela H.3 – Tempo de funcionamento das ventoinhas na terceira queima a partir do B95

DIA	INÍCIO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	FIM DE FUNCIONAMENTO (HORA)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO (HORA)
Início	17:56	19:18	01:22
17:43	19:24	19:27	00:03
14/6/2006	19:29	20:07	00:38
	20:12	20:42	00:30
	20:46	20:48	00:02
	20:47	21:16	00:29
	21:23	21:37	00:14
	22:20	22:26	00:06
	23:01	23:05	00:04
	23:24	23:47	00:23
	23:58	0:09	00:11
	0:38	1:40	01:02
	1:52	2:13	00:21
	2:29	2:51	00:22
	3:08	3:44	00:36
3:59	4:21	00:22	
	4:36	4:47	00:11
Fim	5:05	5:41	00:36
08:39	5:54	6:50	00:56
15/6/2006	7:03	8:39	01:36

TOTAL = 10:04

Tabela H.4 – Tempo de funcionamento das ventoinhas na primeira queima a partir do B85

DIA	INÍCIO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	FIM DE FUNCIONAMENTO (HORA)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO (HORA)
Início	08:39	09:35	00:56
15/6/2006	09:58	12:11	02:13
	12:15	12:17	00:02
	12:22	12:47	00:25
	12:49	15:15	02:26
	15:27	15:48	00:21
	15:50	16:12	00:22
	16:41	16:50	00:09
	17:15	19:58	02:43
	20:22	20:40	00:18
	21:43	22:00	00:17
Fim	22:22	22:43	00:21
23:35	22:58	23:04	00:06
	23:08	23:19	00:11
15/6/2006			

TOTAL = 10:50

Tabela H.5 – Tempo de funcionamento das ventoinhas na segunda queima a partir do B85

DIA	INÍCIO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	FIM DE FUNCIONAMENTO (HORA)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	
Início	23:45	0:30	00:45	
15/6/2006	1:14	1:35	00:21	
	2:10	2:22	00:12	
	3:16	3:48	00:32	
	4:18	4:54	00:36	
	5:27	6:00	00:33	
	6:26	6:48	00:22	
	6:53	7:56	01:03	
	8:14	8:36	00:22	
	8:50	9:16	00:26	
	9:22	9:43	00:21	
16/6/2006	9:51	10:24	00:33	
	10:30	10:36	00:06	
	10:48	11:48	01:00	
	Fim	12:03	12:12	00:09
	14:31	12:39	13:32	00:53
		13:57	14:24	00:27

TOTAL = 07:21

Tabela H.6 – Tempo de funcionamento das ventoinhas na terceira queima a partir do B85

DIA	INÍCIO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	FIM DE FUNCIONAMENTO (HORA)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	
Início	14:36	19:45	05:09	
16/6/2006	19:56	21:55	01:59	
	22:23	22:43	00:20	
	23:06	23:12	00:06	
	23:23	0:10	00:47	
	0:41	0:44	00:03	
	1:22	1:49	00:27	
	2:34	2:38	00:04	
	Fim	3:15	3:50	00:35
	05:27	4:06	4:20	00:14
		4:42	4:45	00:03
17/6/2006				

TOTAL = 09:47

Tabela H.7 – Tempo de funcionamento das ventoinhas na primeira queima a partir da LE

DIA	INÍCIO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	FIM DE FUNCIONAMENTO (HORA)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO (HORA)
Início	10:53	11:01	00:08
10:46	11:44	11:54	00:10
28/6/2006	12:19	12:28	00:09
	12:32	12:34	00:02
	12:48	13:13	00:25
	13:30	15:20	01:50
	15:32	15:48	00:16
	16:25	16:28	00:03
	16:32	17:45	01:13
	17:50	20:38	02:48
	20:46	21:16	00:30
	21:35	21:37	00:02
	21:39	21:43	00:04
Fim	22:09	22:47	00:38
01:42	23:10	23:43	00:33
29/6/2006	23:55	01:42	01:47

TOTAL = 10:38

Tabela H.8 – Tempo de funcionamento das ventoinhas na segunda queima a partir da LE

DIA	INÍCIO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	FIM DE FUNCIONAMENTO (HORA)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO (HORA)
Início	1:58	2:25	00:27
01:42	2:27	2:28	00:01
29/6/2006	2:54	3:20	00:26
	4:06	4:38	00:32
	5:18	5:39	00:21
	6:06	7:25	01:19
	7:36	7:42	00:06
	8:08	8:28	00:20
	9:01	9:25	00:24
	9:54	10:27	00:33
	10:48	11:03	00:15
	11:18	11:47	00:29
	12:15	12:40	00:25
	13:12	13:45	00:33
	Fim	14:45	15:48
16:38	16:02	16:20	00:18
29/6/2006	16:32	16:38	00:06

TOTAL = 07:14

Tabela H.9 – Tempo de funcionamento das ventoinhas na terceira queima a partir da LE

DIA	INÍCIO DE FUNCIONAMENTO (HORA)	FIM DE FUNCIONAMENTO (HORA)	TEMPO DE FUNCIONAMENTO (HORA)
29/6/2006	Início 16:38	16:53	00:15
	17:06	17:58	00:52
	18:07	18:34	00:27
	18:42	18:55	00:13
	19:03	19:31	00:28
	19:38	19:55	00:17
	20:08	20:20	00:12
	20:38	21:48	01:10
	22:08	22:37	00:29
	22:46	23:00	00:14
	23:14	23:27	00:13
	23:33	23:51	00:18
	0:05	1:12	01:07
	1:19	2:43	01:24
	2:53	4:43	01:50
30/6/2006	4:57	5:23	00:26
	Fim 07:34	5:52	00:12
	6:13	6:39	00:26
	7:04	7:34	00:30

TOTAL = 11:03

APÊNCICE I – REGISTRO DOS OPERADORES DO FORNO AO LONGO DA QUEIMA DOS BLOCOS A PARTIR DE B9,5; B8,5 e LE

Tabela I.1 – Registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir de briquetes

DIA	HORA	OPERADOR DO FORNO	VAGONETA			OBSERVAÇÃO
			SEQUÊNCIA	IDENTIFICAÇÃO	COMPRIMENTO (m)	
12/6/2006	17:21 h	Claudionor	7ª vagoneta	V1	1,5	
			8ª	V2	1,5	
			9ª	V3	1,6	
			10	V4	1,6	
			11	V5	1,5	
			12	V6	1,5	
			13	V7	1,6	
			14	V8	1,5	
			15	V9	1,5	
			16	V10	1,6	
12/6/2006	22:00 h	Weslei	1ª vagoneta	V11	1,6	
			2ª	V12	1,5	
			3ª	V13	1,6	
			4ª	V14	1,5	
			5ª	V15	1,6	
			6ª	V16	1,5	
			7ª	V17	1,6	
			8ª	V18	1,6	
			9ª	V19	1,5	
			10	V20	1,5	
13/6/2006	06:00 h	Valdivino	1ª vagoneta	V27	1,5	
			2ª	V28	1,6	
			3ª	V29	1,5	
			4ª	V30	1,5	
			5ª	V31	1,6	
			6ª	V32	1,5	
			7ª	V33	1,6	
			8ª	V34	1,5	
			9ª	V35	1,5	
			10	V36	1,5	
	11	V37	1,5			
	12	V38	1,5			
	13	V39	1,5			
	14	V40	1,6			
	15	V41	1,5			
	16	V42	1,6			

Tabela I.2 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir dos briquetes

DIA	HORA	OPERADOR DO FORNO	VAGONETA			OBSERVAÇÃO
			SEQUÊNCIA	IDENTIFICAÇÃO	COMPRIMENTO (m)	
13/6/2006	14:00 h	Daniel	1ª vagoneta	V43	1,5	Forno completo
			2ª	V44	1,6	
			3ª	V45	1,5	
			4ª	V46	1,5	
			5ª	V47	1,6	
			6ª	V48	1,5	
			7ª	V49	1,5	
			8ª	V50	1,5	
			9ª	V51	1,5	
			10	V52	1,5	
			11	V53	1,5	
			12	V54	1,5	
			13	V55	1,6	
			14	V56	1,5	
			15	V57	1,5	
			16	V58	1,5	
13/6/2006	22:00 h	Claudionor	1ª vagoneta	V59	1,5	
			2ª	V60	1,5	
			3ª	V61	1,5	
			4ª	V62	1,5	
			5ª	V63	1,5	
			6ª	V64	1,5	
			7ª	V65	1,5	
			8ª	V66	1,6	
			9ª	V67	1,6	
			10	V68	1,5	
			11	V69	1,5	
			12	V70	1,5	
			13	V71	1,5	
			14	V72	1,5	
			15	V73	1,5	
			16	V74	1,5	
14/6/2006	06:00 h	Weslei	1ª vagoneta	V75	1,6	
			2ª	V76	1,6	
			3ª	V77	1,6	
			4ª	V78	1,6	
			5ª	V79	1,6	
			6ª	V80	1,5	
			7ª	V81	1,6	
			8ª	V82	1,5	
			9ª	V83	1,6	
			10	V84	1,5	
			11	V85	1,5	
			12	V86	1,6	
			13	V87	1,5	
			14	V88	1,5	
			15	V89	1,5	
			16	V90	1,5	

Tabela I.3 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir dos briquetes

DIA	HORA	OPERADOR DO FORNO	VAGONETA			OBSERVAÇÃO
			SEQUÊNCIA	IDENTIFICAÇÃO	COMPRIMENTO (m)	
14/6/2006	14:00 h	Valdivino	1ª vagoneta	V91	1,6	
			2ª	V92	1,5	
			3ª	V93	1,5	
			4ª	V94	1,5	
			5ª	V95	1,6	
			6ª	V96	1,5	
			7ª	V97	1,5	
			8ª	V98	1,5	
			9ª	V99	1,5	
			10	V100	1,5	
			11	V101	1,6	
			12	V102	1,6	
			13	V103	1,5	
			14	V104	1,5	
			15	V105	1,5	
			16	V106	1,5	
14/6/2006	22:00 h	Daniel	1ª vagoneta	V107	1,5	
			2ª	V108	1,6	
			3ª	V109	1,6	
			4ª	V110	1,5	
			5ª	V111	1,6	
			6ª	V112	1,5	
			7ª	V113	1,6	
			8ª	V114	1,6	
			9ª	V115	1,5	
			10	V116	1,6	
			11	V117	1,5	
			12	V118	1,5	
			13	V119	1,6	
			14	V120	1,6	
			15	V121	1,5	
			16	V122	1,5	
15/6/2006	06:00 h	Claudionor	1ª vagoneta	V123	1,6	
			2ª	V124	1,5	
			3ª	V125	1,6	
			4ª	V126	1,5	
			5ª	V127	1,6	
			6ª	V128	1,5	
			7ª	V129	1,6	
			8ª	V130	1,5	
			9ª	V131	1,5	
			10	V132	1,6	
			11	V133	1,5	
			12	V134	1,6	
			13	V135	1,5	
			14	V136	1,6	
			15	V137	1,6	
			16	V138	1,5	

Tabela I.4 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir dos briquetes

DIA	HORA	OPERADOR DO FORNO	VAGONETA			OBSERVAÇÃO
			SEQUÊNCIA	IDENTIFICAÇÃO	COMPRIMENTO (m)	
15/6/2006	14:00 h	Weslei	1ª vagoneta	V139	1,6	
			2ª	V140	1,6	
			3ª	V141	1,5	
			4ª	V142	1,5	
			5ª	V143	1,6	
			6ª	V144	1,6	
			7ª	V145	1,5	
			8ª	V146	1,6	
			9ª	V147	1,5	
			10	V148	1,5	
			11	V149	1,6	
			12	V150	1,5	
			13	V151	1,5	
			14	V152	1,6	
			15	V153	1,5	
			16	V154	1,5	
15/6/2006	22:00 h	Valdivino	1ª vagoneta	V155	1,5	
			2ª	V156	1,5	
			3ª	V157	1,6	
			4ª	V158	1,6	
			5ª	V159	1,5	
			6ª	V160	1,5	
			7ª	V161	1,6	
			8ª	V162	1,5	
			9ª	V163	1,5	
			10	V164	1,5	
			11	V165	1,6	
			12	V166	1,5	
			13	V167	1,5	
			14	V168	1,6	
			15	V169	1,5	
			16	V170	1,6	
16/6/2006	06:00 h	Daniel	1ª vagoneta	V171	1,5	
			2ª	V172	1,5	
			3ª	V173	1,6	
			4ª	V174	1,5	
			5ª	V175	1,6	
			6ª	V176	1,5	
			7ª	V177	1,5	
			8ª	V178	1,6	
			9ª	V179	1,6	
			10	V180	1,5	
			11	V181	1,5	
			12	V182	1,5	
			13	V183	1,5	
			14	V184	1,5	
			15	V185	1,5	
			16	V186	1,5	

Tabela I.5 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir dos briquetes

DIA	HORA	OPERADOR DO FORNO	VAGONETA			OBSERVAÇÃO
			SEQUÊNCIA	IDENTIFICAÇÃO	COMPRIMENTO (m)	
16/6/2006	14:00 h	Claudionor	1ª vagoneta	V187	1,5	
			2ª	V188	1,5	
			3ª	V189	1,6	
			4ª	V190	1,5	
			5ª	V191	1,6	
			6ª	V192	1,5	
			7ª	V193	1,5	
			8ª	V194	1,5	
			9ª	V195	1,6	
			10	V196	1,5	
			11	V197	1,5	
			12	V198	1,5	
			13	V199	1,5	
			14	V200	1,5	
			15	V201	1,5	
			16	V202	1,6	
16/6/2006	22:00 h	Weslei	1ª vagoneta	V203	1,5	
			2ª	V204	1,5	
			3ª	V205	1,5	
			4ª	V206	1,5	
			5ª	V207	1,5	
			6ª	V208	1,5	
			7ª	V209	1,6	
			8ª	V210	1,5	
			9ª	V211	1,5	
			10	V212	1,6	
			11	V213	1,5	
			12	V214	1,5	
			13	V215	1,5	
			14	V216	1,6	
17/6/2006	05:27 h		15	V217	1,6	

Tabela I.6 – Registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir da LE

DIA	HORA	OPERADOR DO FORNO	VAGONETA			OBSERVAÇÃO
			SEQUÊNCIA	IDENTIFICAÇÃO	COMPRIMENTO (m)	
28/6/2006	10:46	Claudionor	13ª vagoneta	V1	1,50	
			14ª	V2	1,60	
28/6/2006	14:00	Weslei	1ª vagoneta	V3	1,50	
			2ª	V4	1,50	
			3ª	V5	1,50	
			4ª	V6	1,50	
			5ª	V7	1,50	
			6ª	V8	1,60	
			7ª	V9	1,60	
			8ª	V10	1,60	
			9ª	V11	1,50	
			10ª	V12	1,50	
			11ª	V13	1,60	
			12ª	V14	1,50	
			13ª	V15	1,60	
			14ª	V16	1,60	
28/6/2006	22:00	Valdivino	1ª vagoneta	V17	1,50	
			2ª	V18	1,50	
			3ª	V19	1,60	
			4ª	V20	1,50	
			5ª	V21	1,50	
			6ª	V22	1,50	
			7ª	V23	1,60	
			8ª	V24	1,60	
			9ª	V25	1,60	
			10ª	V26	1,50	
			11ª	V27	1,60	
			12ª	V28	1,50	
			13ª	V29	1,50	
			14ª	V30	1,50	
29/6/2006	06:00	Daniel	1ª vagoneta	V31	1,50	
			2ª	V32	1,50	
			3ª	V33	1,50	
			4ª	V34	1,50	
			5ª	V35	1,50	
			6ª	V36	1,60	
			7ª	V37	1,60	
			8ª	V38	1,50	
			9ª	V39	1,50	
			10ª	V40	1,60	
			11ª	V41	1,50	
			12ª	V42	1,50	
			13ª	V43	1,50	
			14ª	V44	1,50	

Tabela I.7 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir da LE

DIA	HORA	OPERADOR DO FORNO	VAGONETA			OBSERVAÇÃO			
			SEQUÊNCIA	IDENTIFICAÇÃO	COMPRIMENTO (m)				
29/6/2006	14:00 h	Claudionor	1ª vagoneta	V45	1,60				
			2ª	V46	1,60				
			3ª	V47	1,50				
			4ª	V48	1,50				
			5ª	V49	1,50				
			6ª	V50	1,60				
			7ª	V51	1,50				
			8ª	V52	1,50				
			9ª	V53	1,60				
			10ª	V54	1,60				
			11ª	V55	1,50				
			12ª	V56	1,60				
			13ª	V57	1,50				
			14ª	V58	1,50				
			15ª	V59	1,50				
				22:00			16ª	V60	1,60
29/6/2006	22:00	Wesley	1ª vagoneta	V61	1,50				
			2ª	V62	1,50				
			3ª	V63	1,60				
			4ª	V64	1,50				
			5ª	V65	1,50				
			6ª	V66	1,50				
			7ª	V67	1,50				
			8ª	V68	1,50				
			9ª	V69	1,50				
			10ª	V70	1,50				
			11ª	V71	1,50				
			12ª	V72	1,50				
			13ª	V73	1,60				
			14ª	V74	1,60				
			15ª	V75	1,50				
							16ª	V76	1,50
30/6/2006	06:00	Valdivino	1ª vagoneta	V77	1,50				
30/6/2006	06:00		2ª	V78	1,50				
			3ª	V79	1,60				
			4ª	V80	1,50				
			5ª	V81	1,60				
			6ª	V82	1,60				
			7ª	V83	1,60				
			8ª	V84	1,50				
			9ª	V85	1,50				
			10ª	V86	1,50				
			11ª	V87	1,50				
			12ª	V88	1,50				
			13ª	V89	1,50				
			14ª	V90	1,50				
			30/6/2006	14:00			15ª	V91	1,50

Tabela I.8 – Continuação do registro dos operadores do forno ao longo da queima dos blocos a partir da LE

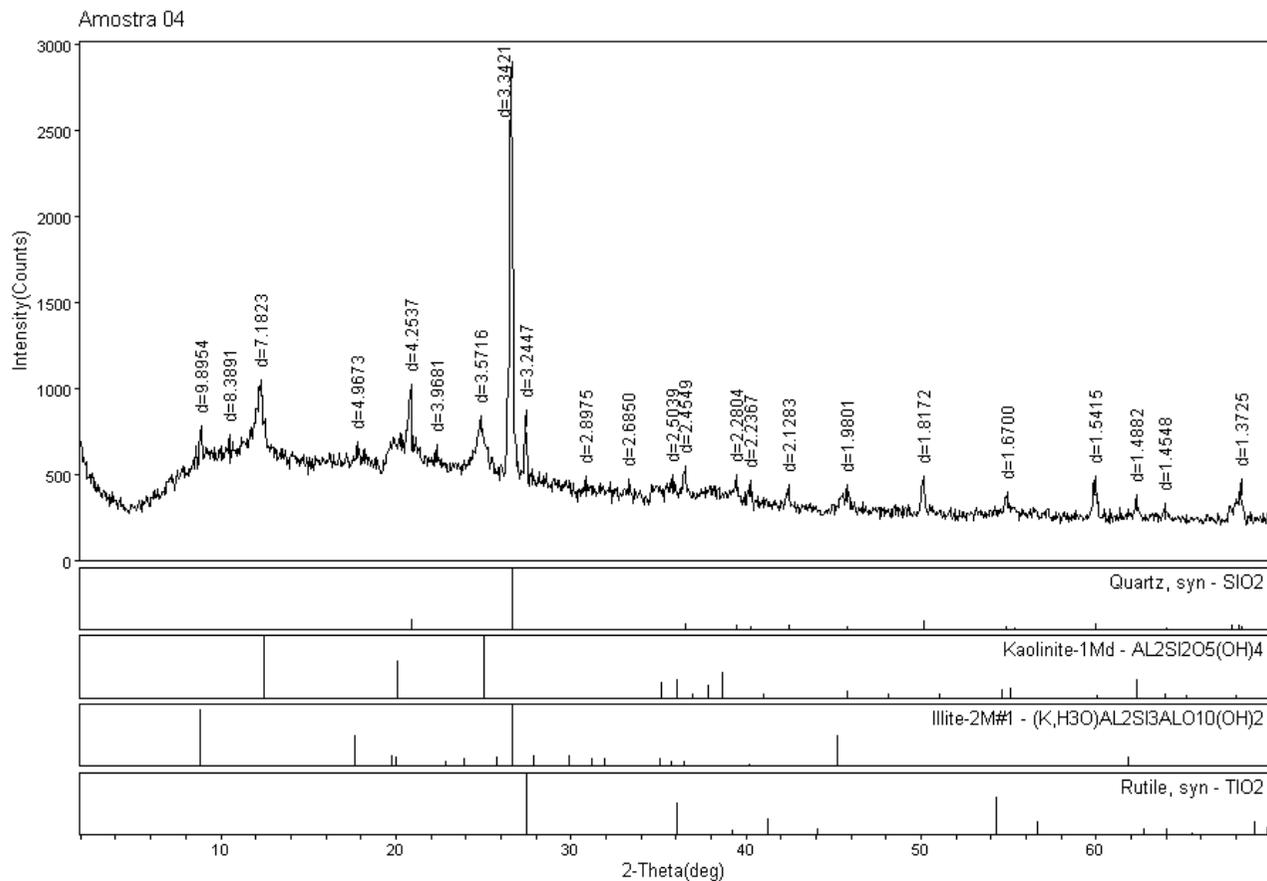
DIA	HORA	OPERADOR DO FORNO	VAGONETA			OBSERVAÇÃO
			SEQUÊNCIA	IDENTIFICAÇÃO	COMPRIMENTO (m)	
30/6/2006	14:00	Daniel	1ª vagoneta	V92	1,50	
			2ª	V93	1,60	
			3ª	V94	1,50	
			4ª	V95	1,50	
			5ª	V96	1,50	
			6ª	V97	1,50	
			7ª	V98	1,60	
			8ª	V99	1,50	
			9ª	V100	1,50	
			10ª	V101	1,60	
			11ª	V102	1,60	
			12ª	V103	1,60	
				22:00		
30/6/2006	22:00	Claudionor	1ª vagoneta	V105	1,60	
			2ª	V106	1,50	
			3ª	V107	1,60	
			4ª	V108	1,60	
			5ª	V109	1,50	
			6ª	V110	1,60	
			7ª	V111	1,60	
			8ª	V112	1,50	
			9ª	V113	1,50	
			10ª	V114	1,60	
			11ª	V115	1,50	
			12ª	V116	1,50	
			13ª	V117	1,50	
			14ª	V118	1,50	
			15ª	V119	1,50	
30/6/2006	06:00		16ª	V120	1,50	
30/6/2006	06:00	Wesley	1ª vagoneta	V121	1,50	
			2ª	V122	1,50	
			3ª	V123	1,50	
30/6/2006	07:34		4ª	V124	1,60	

APÊNDICE J – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS ARGILAS DOS BLOCOS QUEIMADOS A PARTIR DE BRIQUETES E DA LENHA DE EUCALIPTO

Tabela J.1 – Distribuições granulométricas das argilas dos blocos (%)

FRAÇÃO (mm)	ARGILA DOS BLOCOS QUEIMADOS COM B9,5 e B8,5		ARGILA DOS BLOCOS QUEIMADOS COM LE	
	Com Defloculante	Sem Defloculante	Com Defloculante	Sem Defloculante
Pedregulho Fino (2,0 < d < 6,0)	0,1	0,1	0,4	0,4
Areia Grossa (0,60 < d < 2,0)	3,2	2,2	4,2	7,4
Areia Média (0,20 < d < 0,6)	10,8	15,1	10,7	20,4
Areia Fina (0,06 < d < 0,20)	15,6	57,2	20,3	39,2
Silte (0,002 < d < 0,06)	20,4	20,8	17,9	28,3
Argila (d < 0,002 mm)	49,8	4,5	46,6	4,4

APÊNDICE K – DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS ARGILAS DOS BLOCOS QUEIMADOS A PARTIR DE BRIQUETES E LENHA DE EUCALIPTO



Laboratório de DRX - IG/UnB

<dt\servicos\dirceu>

Figura K.1 – Difração de raio-X da argila dos blocos queimados a partir de B9,5 e B8,5.

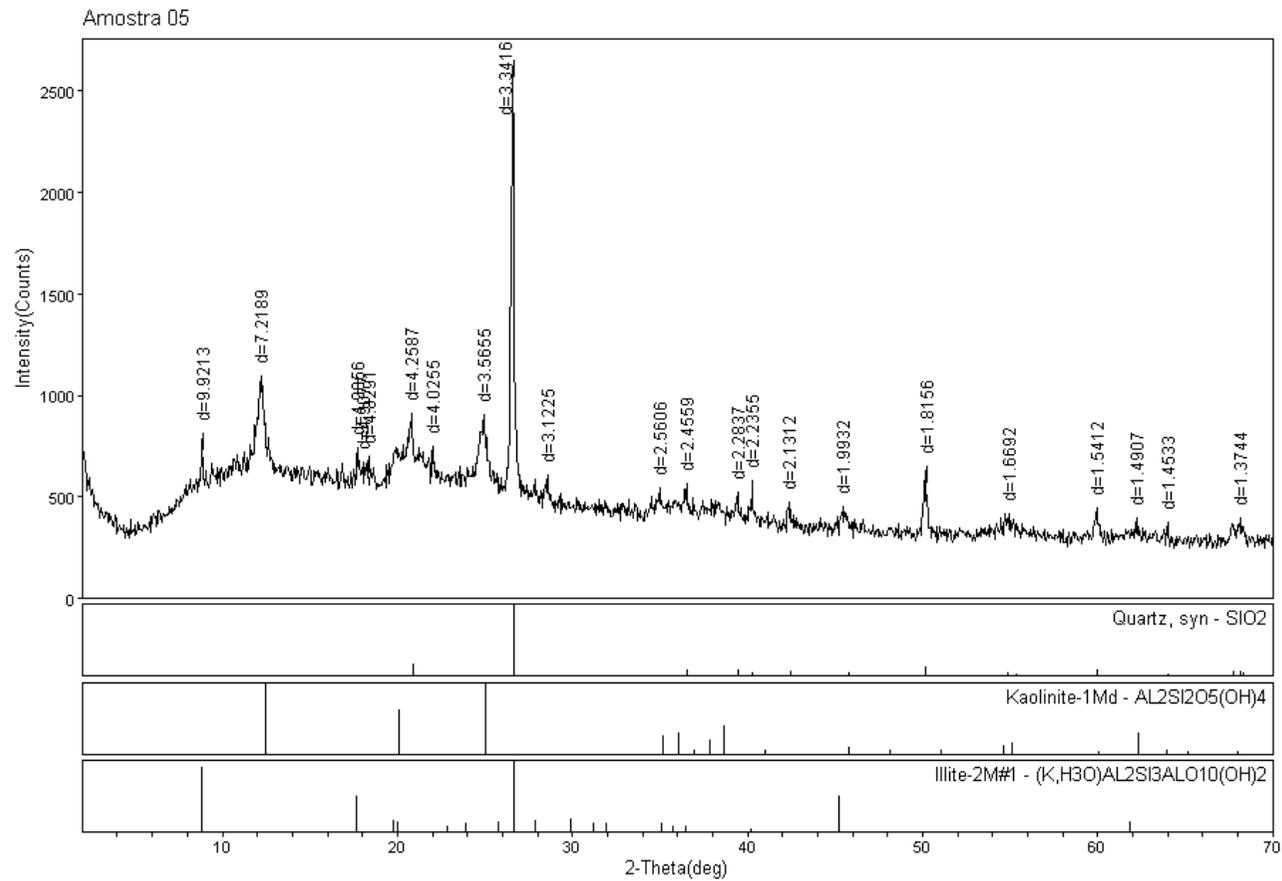


Figura K.2 – Difração de raio-X da argila dos blocos queimados a partir da LE.

TABELA L – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS QUEIMADOS A PARTIR DOS BRIQUETES E DA LENHA DE EUCALIPTO

Tabela L.1 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir dos briquetes: Amostra I

INSPECÃO GERAL		INSPECÃO POR ENSAIOS								
Identificação	Caracterização visual	Medidas das faces (mm)			Espessura das paredes externas (mm)	Espessura dos septos (mm)	Planeza das faces (mm)	Desvio em relação ao esquadro (mm)	Resistência à compressão (MPa)	PROPRIEDADES
		L	H	C						
Sim	DC	92	193	193	7	7	3	6	1,7	1
Sim	FS, DC, RB, DS	91	192	191	6	7	2	5	2,0	2
Sim	FS, RB, QB	92	193	193	6	6	3	4	2,2	3
Sim	RB, TP	92	191	192	6	7	4	6	2,8	4
Não	DS, RB	91	195	190	6	5	4	5	1,9	5
Não		93	195	191	6	6	3	5	0,6	6
Sim	DC	90	194	193	6	6	2	4	2,3	7
Sim		91	193	192	6	7	4	4	2,0	8
Sim	DC, FS, RB, DS	93	194	193	7	6	2	6	1,8	9
Sim	FS, RB, DS	92	194	192	7	7	2	5	2,0	10
Sim	RB, FS	91	193	192	6	6	3	5	1,6	11
Não	DS, RB	93	195	192	6	5	4	3	2,0	12
Não	TP, DS	93	195	190	6	5	3	5	1,7	13
Média =		92	194	192					1,9	
Desvio Padrão =		0,99	1,26	1,07					0,50	
Coeficiente de Variação =		1,07	0,65	0,56					26,29	

CARACTERIZAÇÃO VISUAL = Fissura Superficial (FS), Deformação Parede Externa (DE), Deformação Septo (DS), Empenado (EP), Rebarba (RB), Desuniformidade de Cor (DC), Descantado (DC), Não Queimado (NQ), Trinca Profunda (TP), Furo Parede (FP), Quebrado (QB), Requeimado (RQ).

Tabela L.2 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir dos briquetes: Amostra II

INSPEÇÃO GERAL		INSPEÇÃO POR ENSAIOS								
Identificação	Caracterização visual	Medidas das faces (mm)			Espessura das paredes externas (mm)	Espessura dos septos (mm)	Planeza das faces (mm)	Desvio em relação ao esquadro (mm)	Resistência à compressão (MPa)	PROPRIEDADES
		L	H	C						
Sim	QB, DS, FS, RB, TP	92	193	194	6	7	3	4	2,0	1
Sim	DE, TP, RB, DS, DC	91	193	193	5	7	1	3	0,9	2
Sim	QB, TP, RB, FP, FS, DS, DE	92	193	194	7	7	3	5	0,8	3
Não	RB, TP, DS	91	194	190	5	5	4	4	1,7	4
Sim	DC, DS, RB, TP	92	193	193	6	7	4	4	2,4	5
Sim	RB, DE, FS	91	194	191	6	7	2	3	1,4	6
Sim	QB, DE, DS, FS, RB	92	193	193	6	7	3	3	2,0	7
Sim	DS, RB, FS	91	192	192	5	7	3	3	1,1	8
Sim	RB, DS, FS, DC	91	193	193	6	6	2	4	1,4	9
Não	RB, DS	93	194	190	6	5	3	6	1,4	10
Sim	TP, DS, RB	93	196	192	6	5	4	4	0,6	11
Sim	RB, DS, DE, TP	92	195	190	6	5	3	4	1,3	12
Sim	DS, RB	92	195	191	5	5	4	3	2,0	13
Média =		92	194	192					1,5	
Desvio Padrão =		0,82	1,12	1,38					0,54	
Coeficiente de Variação =		0,89	0,58	0,72					36,80	

CARACTERIZAÇÃO VISUAL = Fissura Superficial (FS), Deformação Parede Externa (DE), Deformação Septo (DS), Empenado (EP), Rebarba (RB), Desuniformidade de Cor (DC), Descantado (DC), Não Queimado (NQ), Trinca Profunda (TP), Furo Parede (FP), Quebrado (QB), Requeimado (RQ).

Tabela L.3 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir dos briquetes: Amostra III

INSPEÇÃO GERAL		INSPEÇÃO POR ENSAIOS								
Identificação	Caracterização visual	Medidas das faces (mm)			Espessura das paredes externas (mm)	Espessura dos septos (mm)	Planeza das faces (mm)	Desvio em relação ao esquadro (mm)	Resistência à compressão (MPa)	PROPRIEDADES
		L	H	C						
Sim	FS, DS, DC, RB	92	194	187	6	6	3	6	1,5	1
Sim	FS, DC, RB, DS, TP	91	192	187	5	6	1	2	1,5	2
Sim	FS, RB, DC, DS	91	193	187	6	6	3	3	1,7	3
Sim	FS, DS, DC, RB	91	192	188	5	6	2	3	1,5	4
Sim	FS, DS, DC, RB	91	192	185	5	6	3	3	1,5	5
Sim	FS, DS, DC, RB	92	192	189	5	6	1	3	1,2	6
Sim	FS, DS, DC, RB	92	193	184	5	6	2	2	1,5	7
Sim	FS, DS, DC, RB	91	193	187	5	6	1	3	1,4	8
Sim	FS, DS, DC, RB	92	192	188	5	6	2	3	1,5	9
Sim	FS, DS, DC, RB	92	193	193	6	7	3	5	2,3	10
Sim	FS, RB	91	192	193	5	7	2	3	1,3	11
Não	FS, DS, RB, DE	92	196	190	5	5	4	8	2,0	12
Sim	FS, DS, RB	92	193	192	7	6	3	4	2,0	13
Média =		92	193	188					1,6	
Desvio Padrão =		0,45	1,21	2,91					0,31	
Coeficiente de Variação =		0,49	0,62	1,55					19,42	

CARACTERIZAÇÃO VISUAL = Fissura Superficial (FS), Deformação Parede Externa (DE), Deformação Septo (DS), Empenado (EP), Rebarba (RB), Desuniformidade de Cor (DC), Descantado (DC), Não Queimado (NQ), Trinca Profunda (TP), Furo Parede (FP), Quebrado (QB), Requeimado (RQ).

Tabela L.4 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto: Amostra I

INSPEÇÃO GERAL		INSPEÇÃO POR ENSAIOS								
Identificação	Caracterização visual	Medida das faces (mm)			Espessura das paredes externas (mm)	Espessura dos septos (mm)	Planeza das faces (mm)	Desvio em relação ao esquadro (mm)	Resistência à compressão (MPa)	REQUISITO
		L	H	C						
Sim	FS, RB, DS, DE	92	194	191	6	5	4	4	1,5	1
Sim	FS, RB, DS, QB	90	192	193	5	5	2	5	1,0	2
Sim	FS, RB, DS	91	193	188	5	6	3	3	1,0	3
Sim	FS, RB, DS, QB	91	193	188	5	5	3	3	0,9	4
Sim	FS, RB, DS	90	193	193	5	5	3	4	1,2	5
Sim	FS, DC, DE, RB, FP	92	193	190	6	5	3	3	1,5	6
Sim	FS, DC, RB, DS	91	193	189	5	6	2	4	1,6	7
Sim	FS, DS, RB, FP	91	192	193	5	6	2	5	1,0	8
Sim	DS, DC, RB, TP	92	195	191	7	5	4	3	1,4	9
Sim	DS, RB, QB	91	193	192	5	5	1	7	0,7	10
Sim	FS, DS, RB	90	191	191	5	5	2	6	1,7	11
Sim	DS, RB	92	191	191	5	6	4	4	1,8	12
Sim	DS, RB	91	192	192	5	5	4	4	1,5	13
Média =		91	193	191					1,3	
Desvio Padrão =		0,76	1,09	1,64					0,35	
Coeficiente de Variação =		0,83	0,56	0,86					26,71	

CARACTERIZAÇÃO VISUAL = Fissura Superficial (FS), Deformação Parede Externa (DE), Deformação Septo (DS), Empenado (EP), Rebarba (RB), Desuniformidade de Cor (DC), Descantado (DC), Não Queimado (NQ), Trinca Profunda (TP), Furo Parede (FP), Quebrado (QB), Requeimado (RQ).

Tabela L.5 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto: Amostra II

INSPEÇÃO GERAL		INSPEÇÃO POR ENSAIOS								
Identificação	Caracterização visual	Medidas das faces (mm)			Espessura das paredes externas (mm)	Espessura dos septos (mm)	Planeza das faces (mm)	Desvio em relação ao esquadro (mm)	Resistência à compressão (MPa)	PROPRIEDADES
		L	H	C						
Sim	FS, RB, DS	90	190	191	5	5	2	5	1,6	1
Sim	FS, RB, DS, DE	90	191	191	4	5	2	6	1,3	2
Sim	FS, RB, DS, DE	90	192	191	5	6	2	10	1,5	3
Sim	FS, RB, DS, TP	91	193	193	5	6	2	6	0,9	4
Sim	FS, RB, DS, FP	90	191	191	5	6	5	6	1,8	5
Sim	FS, DC, DS, DE, FP	90	191	190	5	5	3	5	1,2	6
Sim	RB, DS	90	194	187	5	5	3	5	0,9	7
Sim	FS, RB, DS, TP	91	193	189	5	5	3	3	1,2	8
Sim	FS, RB, DS, TP	91	192	189	5	6	3	5	1,5	9
Sim	FS, RB, DS, TP	90	192	188	5	6	2	6	1,9	10
Sim	RB, DS, DE	91	194	190	5	6	3	3	1,2	11
Sim	RB, FS, DS	90	191	191	5	6	2	4	1,3	12
Sim	RB, FS, DS	90	191	191	5	6	2	4	1,5	13
Média =		90	192	190					1,4	
Desvio Padrão =		0,53	1,20	1,60					0,30	
Coeficiente de Variação =		0,59	0,62	0,84					22,19	

CARACTERIZAÇÃO VISUAL = Fissura Superficial (FS), Deformação Parede Externa (DE), Deformação Septo (DS), Empenado (EP), Rebarba (RB), Desuniformidade de Cor (DC), Descanteado (DC), Não Queimado (NQ), Trinca Profunda (TP), Furo Parede (FP), Quebrado (QB), Requeimado (RQ).

Tabela L.6 – Resultados da caracterização dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto: Amostra III

INSPEÇÃO GERAL		INSPEÇÃO POR ENSAIOS								
Identificação	Caracterização visual	Medidas das faces (mm)			Espessura das paredes externas (mm)	Espessura dos septos (mm)	Planeza das faces (mm)	Desvio em relação ao esquadro (mm)	Resistência à compressão (MPa)	PROPRIEDADES
		L	H	C						
Sim	FS, RB, DS	91	193	187	5	6	3	3	1,6	1
Não	FS, RB, DS, TP, RQ	92	194	190	5	5	4	6	2,0	2
Sim	FS, RB, DS, DC	92	194	193	5	6	4	7	1,5	3
Sim	RB, DS	92	194	190	6	5	3	6	1,0	4
Não	RB, DS	92	195	190	5	5	2	6	2,3	5
Não	RB, DS	91	194	190	6	5	3	6	1,7	6
Não	RB, DS	90	193	189	5	5	3	6	0,6	7
Não	RB, DS, TP	92	194	189	5	5	2	4	0,7	8
Não	RB, DS	93	196	190	5	5	3	7	1,9	9
Não	RB, DS	92	195	191	6	5	2	4	1,3	10
Sim	FS, RB, DS, TP	92	193	194	6	7	3	4	2,6	11
Sim	RB, TP, DC	91	193	194	5	7	3	5	1,4	12
Sim	FS, DS, TP	93	194	195	6	7	2	4	2,1	13
Média =		92	194	191					1,6	
Desvio Padrão =		0,73	0,78	2,35					0,60	
Coeficiente de Variação =		0,80	0,40	1,23					37,63	

CARACTERIZAÇÃO VISUAL = Fissura Superficial (FS), Deformação Parede Externa (DE), Deformação Septo (DS), Empenado (EP), Rebarba (RB), Desuniformidade de Cor (DC), Descanteado (DC), Não Queimado (NQ), Trinca Profunda (TP), Furo Parede (FP), Quebrado (QB), Requeimado (RQ).

Tabela L.7 – Resultados do ensaio de índice de absorção de água dos blocos queimados a partir dos briquetes

AMOSTRA I		AMOSTRA II		AMOSTRA III	
CORPO-DE-PROVA	AA (%)	CORPO-DE-PROVA	AA (%)	CORPO-DE-PROVA	AA (%)
2	19	1	18	5	20
6	19	3	18	7	21
8	19	5	20	8	20
9	18	7	20	9	20
10	19	10	19	10	19
11	19	13	19	12	19
Média =	19		19		20
MÉDIA GERAL = 19					
Desvio Padrão =	0,52		0,72		0,70
Coefficiente de Variação =	2,74		3,81		3,53

Tabela L.8 – Resultados do ensaio de índice de absorção de água dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto

AMOSTRA I		AMOSTRA II		AMOSTRA III	
CORPO-DE-PROVA	AA (%)	CORPO-DE-PROVA	AA (%)	CORPO-DE-PROVA	AA (%)
3	19	1	19	2	18
4	20	6	19	5	18
6	21	7	19	6	19
9	20	8	19	8	19
10	16	10	18	12	19
12	18	13	18	13	19
Média =	19		19		19
MÉDIA GERAL = 19					
Desvio Padrão =	1,61		0,47		0,34
Coefficiente de Variação =	8,46		2,48		1,81

Tabela L.9 – Resultados do ensaio de índice de absorção inicial dos blocos queimados a partir dos briquetes

AMOSTRA I		AMOSTRA II		AMOSTRA III	
CORPO-DE-PROVA	AAI (g/193,55cm ²)/min	CORPO-DE-PROVA	AAI (g/193,55cm ²)/min	CORPO-DE-PROVA	AAI (g/193,55cm ²)/min
2	16	1	11	5	28
6	10	3	8	7	29
8	17	5	14	8	22
9	9	7	21	9	26
10	12	10	11	11	12
11	22	13	11	13	11
Média =	14		13		21
MÉDIA GERAL = 16					
Desvio Padrão =	4,93		4,50		7,99
Coefficiente de Variação =	34,37		35,54		37,46

Tabela L.10 – Resultado do ensaio de índice de absorção inicial dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto

AMOSTRA I		AMOSTRA II		AMOSTRA III	
CORPO-DE-PROVA	AAI (g/193,55cm ²)/min	CORPO-DE-PROVA	AAI (g/193,55cm ²)/min	CORPO-DE-PROVA	AAI (g/193,55cm ²)/min
3	16	1	12	2	17
4	26	6	16	5	11
6	23	7	13	6	21
9	12	8	22	8	13
10	10	10	19	12	10
12	18	13	13	13	10
Média =	18		16		14
MÉDIA GERAL = 16					
Desvio Padrão =	6,19		3,97		4,46
Coefficiente de Variação =	35,36		25,08		32,61

Tabela L.11 – Resultados do ensaio de porosidade aparente dos blocos queimados a partir dos briquetes

AMOSTRA I		AMOSTRA II		AMOSTRA III	
CORPO-DE-PROVA	POROSIDADE (%)	CORPO-DE-PROVA	POROSIDADE (%)	CORPO-DE-PROVA	POROSIDADE (%)
8	30	6	28	1	32
9	26	12	31	2	33
10	27	13	30	4	31
12	31	-	-	5	30
-	-	-	-	6	30
-	-	-	-	7	29
-	-	-	-	9	29
-	-	-	-	11	36
Média = 28		30		31	
MÉDIA GERAL = 30					
Desvio Padrão = 2,37		1,14		2,32	
Coeficiente de Variação = 8,41		3,85		7,43	

Tabela L.12 – Resultados do ensaio de porosidade aparente dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto

AMOSTRA I		AMOSTRA II		AMOSTRA III	
CORPO-DE-PROVA	POROSIDADE (%)	CORPO-DE-PROVA	POROSIDADE (%)	CORPO-DE-PROVA	POROSIDADE (%)
9	29	4	33	3,00	28
10	25	7	28	8,00	32
12	29	9	32	11,00	29
-	-	10	28	-	-
-	-	13	30	-	-
Média = 27		30		30	
MÉDIA GERAL = 29					
Desvio Padrão = 2,39		2,33		1,88	
Coeficiente de Variação = 8,72		7,74		6,35	

Tabela L.13 – Resultados da retração linear de secagem natural, secagem artificial e após a queima dos blocos queimados a partir dos briquetes.

CORPO-DE-PROVA	LARGURA (L)			ALTURA (H)			COMPRIMENTO (C)		
	Secagem Natural	Secagem Artificial	Queima	Secagem Natural	Secagem Artificial	Queima	Secagem Natural	Secagem Artificial	Queima
2	7,54	0,00	1,63	7,16	0,00	1,80	4,98	0,26	1,05
3	7,04	0,27	0,81	6,46	0,64	1,16	4,41	0,90	0,91
4	6,57	0,54	1,09	6,47	0,38	1,16	4,73	0,39	1,18
5	6,06	0,54	1,62	6,44	0,51	1,03	4,98	0,26	1,05
6	7,07	0,00	1,09	6,70	0,00	1,03	5,22	0,00	1,31
7	5,24	0,55	1,67	5,74	1,02	1,28	4,46	1,55	0,79
8	5,05	2,13	1,36	4,78	2,01	1,41	1,50	3,43	1,18
9	6,57	0,00	0,54	6,47	0,26	1,28	5,21	0,00	1,05
10	7,04	0,54	0,54	6,22	0,51	1,03	4,47	0,78	0,52
Média	6,46	0,51	1,15	6,27	0,59	1,24	4,44	0,84	1,00
	Soma =	8,12		Soma =	8,11		Soma =	6,29	
Desvio Padrão	0,86	0,66	0,45	0,67	0,62	0,25	1,15	1,09	0,24
Coefficiente de Variação	13,25	129,64	39,28	10,73	104,53	19,94	25,82	129,60	23,63

Tabela L.14 – Resultados da retração linear de secagem natural, artificial e após a queima dos blocos queimados a partir da lenha de eucalipto.

CORPO-DE-PROVA	LARGURA (L)			ALTURA (H)			COMPRIMENTO (C)		
	Secagem Natural	Secagem Artificial	Queima	Secagem Natural	Secagem Artificial	Queima	Secagem Natural	Secagem Artificial	Queima
1	6,09	0,00	0,54	6,49	0,77	0,78	5,06	0,27	0,53
2	6,60	0,54	0,55	6,55	0,00	0,78	5,56	0,27	0,54
3	6,60	0,54	0,55	6,52	0,52	0,78	5,30	0,27	0,80
4	6,12	0,00	1,09	6,31	0,00	1,04	5,05	0,00	0,80
5	7,14	0,00	0,55	6,80	0,00	0,78	6,31	0,00	0,54
6	6,57	0,54	1,09	6,30	0,00	0,78	5,00	0,53	0,79
7	7,07	0,00	1,09	6,76	0,26	0,78	5,63	0,00	0,81
8	7,07	0,00	1,09	6,51	0,26	1,03	5,29	0,00	1,06
9	6,60	0,54	0,55	6,55	0,00	0,52	5,28	0,00	0,53
10	6,60	0,00	1,09	6,52	0,00	1,03	5,56	0,00	0,53
Média	6,71	0,24	0,85	6,54	0,12	0,84	5,44	0,12	0,71
	Soma =	7,80		Soma =	7,49		Soma =	6,27	
Desvio Padrão	0,33	0,28	0,28	0,17	0,19	0,17	0,39	0,19	0,19
Coefficiente de Variação	4,89	118,59	33,48	2,58	163,46	20,40	7,22	162,74	26,20