



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

RENATO TREVISAN SIGNORI
MOACIR CARVALHO DE SOUSA JÚNIOR

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA SERRAGEM UTILIZADA NOS FORNOS DE QUEIMA
DE CERÂMICA VERMELHA**

SANTARÉM – PARÁ
2017

RENATO TREVISAN SIGNORI
MOACIR CARVALHO DE SOUSA JÚNIOR

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA SERRAGEM UTILIZADA NOS FORNOS DE QUEIMA
DE CERÂMICA VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC
apresentado ao Curso de Bacharelado
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da
Universidade Federal do Oeste do Pará -
UFOPA como requisito parcial para obtenção do
grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Victor Hugo Pereira
Moutinho

SANTARÉM – PARÁ
2017

Ficha catalográfica elaborada pelo Setor de Processamento Técnico da Divisão de Biblioteca da UFOPA.
Catalogação de Publicação na Fonte. UFOPA - Biblioteca Campus Tapajós.

674.02 Signori, Renato Trevisan
Si266 Análise energética da serragem utilizada nos fornos de queima de cerâmica vermelha./
Renato Trevisan Signori, Moacir Carvalho de Sousa Júnior . -- 2017.
53 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Curso de Ciência e Tecnologia,
Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Victor Hugo Pereira Moutinho.

1. Cerâmica. 2. Serragem. 3. Análise química I. Sousa Júnior, Moacir Carvalho de
II.Moutinho, Victor Hugo Pereira, orient. III. Título.

CDD. 23. ed.:

TERMO DE APROVAÇÃO

RENATO TREVISAN SIGNORI
MOACIR CARVALHO DE SOUSA JÚNIOR

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA SERRAGEM UTILIZADA NOS FORNOS DE QUEIMA
DE CERÂMICA VERMELHA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi analisado pelos membros da Banca
Examinadora, abaixo assinados:

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Victor Hugo Pereira Moutinho



Prof. Ms. Thiago Augusto De Sousa Moreira



Prof. Dr. Carlos Celio Sousa Da Cruz

APROVADO EM: 14 / 11 / 2017

AGRADECIMENTOS – MOACIR CARVALHO DE SOUSA JÚNIOR

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Moacir e Ana, por me incentivarem e apoiarem ao longo de toda minha vida. Para eles o meu eterno agradecimento!

Aos meus amigos, que sempre estiveram presentes em minha vida tornando essa jornada acadêmica menos exaustiva.

À Mônica, minha amiga e companheira, pelo amor, paciência e ajuda nos bons e maus momentos.

Ao Renato, meu amigo e parceiro de TCC, por proporcionar uma excelente convivência durante toda nossa jornada acadêmica e durante todo o desenvolvimento do nosso TCC. Muito obrigado!

Agradeço aos amigos e colegas que conheci na Universidade Federal do Oeste do Pará, pois me proporcionaram grandes momentos desde o meu ingresso na UFOPA.

Ao nosso orientador, Professor Doutor Victor Hugo, por nos auxiliar na pesquisa deste trabalho compartilhando seu conhecimento.

À Thaiza Rodrigues e Raiana Grandal, do Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal do Oeste do Pará, por auxiliarem nos ensaios realizados neste estabelecimento.

AGRADECIMENTOS – RENATO TREVISAN SIGNORI

Primeiramente aos meus pais, Almir e Lorinete, por todo o apoio e carinho ao longo dessa jornada.

À Andressa, por todo companheirismo, amor e paciência, além de toda a ajuda durante a execução deste trabalho e apoio nas horas difíceis.

Aos meus amigos, por todo apoio, risadas e cervejas no decorrer desses anos de curso, fazendo disso tudo uma experiência mais divertida e menos árdua.

Ao Moacir, meu colega de TCC e amigo de longa data, por toda a convivência e parceria ao longo dos anos e no decorrer do trabalho.

Ao nosso orientador, Professor Doutor Victor Hugo Moutinho, por viabilizar o presente trabalho, bem como por toda a ajuda durante a execução do mesmo.

Ao Samuel Souza, aka Panda, por emprestar sua sala, me proporcionando um local calmo onde pude desenvolver minhas atividades.

À Thaiza Rodrigues e Raiana Grandal, do Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal do Oeste do Pará, por toda a ajuda prestada durante a realização dos ensaios e análises.

“All we have to decide is what to do with the time that is given us.”

Gandalf, the Grey

RESUMO

O material cerâmico é todo material ou produto químico inorgânico, não metálico, obtido geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. Durante seu processo de produção, a sub etapa de queima se mostra a mais onerosa, sendo responsável por 34% de todo o gasto com a produção, haja vista o combustível necessário para o abastecimento dos fornos. Dentre os insumos energéticos utilizados, a serragem proveniente de resíduos madeireiros destaca-se pelo seu potencial energético e sua facilidade de obtenção. Deste modo, o presente trabalho objetivou realizar uma análise energética da serragem utilizada como combustível nos fornos de queima de cerâmica vermelha em uma empresa situada em Santarém-Pará. Para tanto, foi necessário aplicar um questionário econômico com finalidade de abordar questões envolvendo a produção e tratamentos previamente realizados nos insumos energéticos. Posteriormente, realizou-se a coleta do material combustível, serragem de madeira, diretamente do acondicionamento da fábrica, o qual passou por diversos ensaios, tais como, análise energética da serragem e análise química imediata, com base nas normas ASTM D5865-13 e ASTM 1762. Constatou-se os seguintes valores do poder calorífico superior, inferior e útil na ordem de 3424,44 kcal/kg, 2781,88 kcal/kg e 1608,81 kcal/kg, respectivamente. Por fim, realizou-se uma análise comparativa com simulações de amostras com menores teores de umidade e de matéria inorgânica, verificando-se um incremento de 127% no poder energético para a serragem em condições ideais.

Palavras-chaves: Cerâmica. Serragem. Análise energética. Análise química imediata.

ABSTRACT

The ceramic material is any kind of inorganic material or chemical product, nonmetallic, generally obtained after heat treatment at elevated temperatures. During its production process, the sub-stage of burning is the most costly, being responsible by 34% of all production costs, given the fuel needed to supply the kilns. Among the energy inputs used in the furnaces, sawdust coming from wood residues stands out for its calorific potential and its ease of obtaining. Thus, the present work carried out the energy analysis of sawdust used in red ceramic burning furnaces. For that, it was necessary to apply an economic questionnaire with the purpose of check question involving the production and treatments previously performed on energy inputs. Subsequently, the fuel material, wood sawdust, was collected directly from the factory, which underwent several tests, such as sawing energy analysis and immediate chemical analysis, based on ASTM D5865-13 and ASTM 1762. Having found the higher, lower and gross heating value in the order of 3424.44 kcal / kg, 2781.88 kcal / kg and 1608.81 kcal / kg, respectively. Finally, a comparative analysis was made with simulations of samples with lower moisture and inorganic material content, with an increase of 127% in energy power for sawdust under ideal conditions.

Key-words: Ceramic. Sawdust. Energy analysis. Immediate chemical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Gráfico de distribuição das empresas cerâmicas por região (Fonte: Adaptado FIEMG & FEAM, 2013)..... | 17 |
| Figura 2 – Mapa dos Principais polos cerâmicos do Brasil (Fonte: Adaptado FIEM & FEAM, 2013)..... | 18 |
| Figura 3 - Fluxograma do processo produtivo, entradas e saídas de insumo (Fonte: FIEMG & FEAM, 2013)..... | 19 |
| Figura 4 – Processo de extrusão (Fonte: CALLISTER, 2007)..... | 21 |
| Figura 5 - Secagem natural realizada sob lonas (Fonte: FEAM, 2012)..... | 23 |
| Figura 6 - Estrutura de um secador (Fonte: AUTORES)..... | 24 |
| Figura 7 - Estrutura de um forno tipo túnel (Fonte: Adaptado de Grigoletti 2001)..... | 27 |
| Figura 8 – Distribuição média dos custos de produção da indústria de cerâmica vermelha (Fonte: FEAM, 2012)..... | 28 |
| Figura 9 – Serragem estocada (Fonte: Autores)..... | 34 |
| Figura 10 – Peneiras utilizadas (Fonte: Autores)..... | 35 |
| Figura 11 – Determinação de materiais voláteis (Fonte: Autores)..... | 37 |
| Figura 12 – Equipamento utilizado para determinação de poder calorífico (“C 2000 calorimeter system” - Ika® Werke) (Fonte: Autores)..... | 38 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Consumo de energia pelo setor cerâmico no Brasil por ano (%)..... | 28 |
| Tabela 2 – Análise Química Imediata e teor de umidade..... | 41 |
| Tabela 3 – Poder Calorífico superior, inferior e útil da serragem..... | 43 |
| Tabela 4 – Comparação do Poder Calorífico das amostras..... | 45 |
| Tabela 5 – Análise Química Imediata..... | 46 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ASTM – American Society for Testing and Materials
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.
FEAM – Federação Estadual de Meio Ambiente
FIGM – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
MINEROPAR – Minerais do Paraná
Mtep – Mega tonelada equivalente de petróleo
PCI – Poder Calorífico Inferior
PCS – Poder Calorífico Superior
PCU – Poder Calorífico Útil
SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
 μm - Micro

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 15 |
| 2.1 | Setor Cerâmico..... | 15 |
| 2.2 | Processo de Produção da Cerâmica Vermelha | 18 |
| 2.2.1 | Preparação..... | 19 |
| 2.2.2 | Conformação..... | 20 |
| 2.2.3 | Tratamento Térmico | 21 |
| 2.2.3.1 | Secagem | 22 |
| 2.2.3.2 | Queima..... | 25 |
| 2.3 | Insumos Energéticos | 28 |
| 2.3.1 | Biomassa..... | 29 |
| 2.3.1.1 | Serragem..... | 29 |
| 2.3.2 | Propriedades do Insumo | 30 |
| 2.3.2.1 | Teor de Umidade..... | 30 |
| 2.3.2.2 | Análise Química Imediata..... | 31 |
| 2.3.2.3 | Poder Calorífico..... | 32 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 33 |
| 3.1 | Análise Química Imediata | 35 |
| 3.1.1 | Teor de umidade | 36 |
| 3.1.2 | Materiais Voláteis | 36 |
| 3.1.3 | Teor de Cinzas | 37 |
| 3.1.4 | Carbono Fixo..... | 38 |
| 3.2 | Poder Calorífico..... | 38 |
| 3.3 | Tratamento Estatístico..... | 39 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 40 |
| 4.1 | Diagnóstico da Empresa..... | 40 |
| 4.2 | Análise Química Imediata e Umidade | 41 |
| 4.3 | Poder Calorífico..... | 43 |
| 4.4 | Simulações | 45 |
| 5 | CONCLUSÕES | 47 |
| | REFERÊNCIAS..... | 49 |
| | ANEXOS | 53 |

1 INTRODUÇÃO

A cerâmica, ou material cerâmico, de acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (2017), é todo material ou produto químico inorgânico, não metálico, obtido geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas.

O processo de fabricação de peças cerâmicas pode ser dividido em três principais etapas, são elas: preparação da matéria-prima e da massa, conformação das peças e tratamento térmico (ABCERAM, 2017).

Em relação a distribuição do custo de produção, a etapa que mais acarreta gastos é a de tratamento térmico, devido a sub etapa denominada de queima pois, nesta, as peças são submetidas a temperaturas elevadas, gerando gastos de, aproximadamente, 34% dos custos totais com insumos energéticos, visando a alimentação dos fornos (FEAM, 2012). Dentre os combustíveis utilizados na fase de queima, destacam-se a matéria proveniente de biomassa, o gás natural e o óleo combustível (SEBRAE, 2008).

Segundo Lopes (2012), os resíduos de biomassas, quando utilizados como combustíveis, apresentam um menor custo na geração de calor, resultando na geração de energia mais competitiva; contudo, ainda assim, possuem um pequeno rendimento térmico em razão da umidade e heterogeneidade, o que pode ser compensado pela facilidade na obtenção do combustível a um custo mínimo. SEBRAE (2008), por sua vez, explana que setor de cerâmicas é um grande consumidor de madeira para energia no Brasil, onde 50% de todo consumo energético de tal setor advém da biomassa.

Entre estes, um dos resíduos mais utilizado como combustível na etapa de queima é a serragem proveniente do processamento mecânico da madeira em serrarias. Por se tratar de biomassa produzida a partir da madeira, o teor de umidade, o poder calorífico e as propriedades químicas (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) são importantes características a serem estudadas para a utilização da serragem como insumo energético.

De acordo com Pinheiro et al (2008), o teor de materiais voláteis presentes no combustível é uma das mais importantes propriedades do mesmo, pois está diretamente ligado a facilidade de ignição, velocidade de combustão e estabilidade da chama. Já quanto as cinzas, as contaminações presentes na serragem, podem elevar o teor das mesmas, segundo Parikh et al (2005), interferindo no rendimento da

serragem e causando problemas na câmara de combustão dos fornos, dependendo da quantidade de impurezas no material e do seu armazenamento.

Ante o exposto, verifica-se a necessidade de avaliar esta importante biomassa como fonte energética para o setor, visando o melhor aproveitamento da mesma e, conseqüentemente, gerando subsídios para minimizar os custos de produção e aumentar a competitividade do setor. Assim, propõe-se trabalhar o controle da umidade presente na serragem, verificado por meio de simulações, como um dos fatores determinantes para sua eficiência, bem como, a presença ou não de contaminação no material.

Deste modo, o presente trabalho objetiva realizar uma análise energética da serragem utilizada como combustível nos fornos de queima de cerâmica vermelha.

Para alcançar o objetivo principal, foi imprescindível definir como objetivos específicos:

- traçar um perfil de produção da empresa;
- encontrar o teor de umidade;
- realizar análise química imediata da serragem;
- realizar análise energética da serragem (PCS, PCI e PCU);
- simular o poder calorífico em outras condições (umidade e contaminação [por matéria inorgânica])
- comparar os resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Setor Cerâmico

No Brasil, além do baixo número de dados disponíveis sobre o setor cerâmico, os mesmos apresentam grandes divergências entre as principais entidades representativas. Muito disso se deve ao fato de a maior parte desse nicho empresarial ser constituída por micro e pequenas empresas, que se distribuem de forma pulverizada por todo o país (PRADO & BRESSIANI, 2013).

A Associação Nacional da Indústria Cerâmica aponta que o mercado da cerâmica no Brasil conta com cerca de 6.900 empresas entre cerâmicas e olarias,

sendo responsável por mais de 293 mil empregos diretos, 900 mil indiretos e gerando um faturamento anual de R\$ 18 bilhões, que representa 4,8% do faturamento da indústria da construção civil no país (IBGE, 2008 *apud* ANICER, 2015).

Por outro lado, a Associação Brasileira de Cerâmica contabilizou a existência de mais 11.000 mil empresas de pequeno porte, que trabalham exclusivamente com cerâmicas vermelha (estrutural) distribuídas pelo país (ABCERAM, 2016). Esse dado é mais compatível com a realidade, haja vista que apenas em Minas Gerais, o segundo maior polo cerâmico do Brasil, no ano de 2012, 626 empresas estavam cadastradas no Sistema Integrado de Informação Ambiental (FIEGM & FEAM, 2013).

Para ilustrar tal discrepância dos dados, Bustamante & Bressiani (2000), já estimavam que o número de empresas envolvidas com a produção de cerâmicas vermelhas estava em torno de 11 mil, gerando entre 200 mil e 300 mil empregos e movimentando um montante de R\$ 2,5 bilhões.

Os fatores determinantes relacionados à localização das cerâmicas são a proximidade com as jazidas de argila, pois é necessário um grande volume de matéria-prima a ser processada, e a proximidade dos mercados consumidores, tendo em vista o custo com transporte e a fragilidade das peças (FIEMG & FEAM, 2013). Em relação ao raio médio para envio dos produtos, o mesmo gira em torno de 250 km. Para telhas, essa distância pode aumentar, chegando até aos 500 km, em função do valor agregado da mesma e sua maior resistência mecânica (BUSTAMANTE & BRESSIANI, 2000).

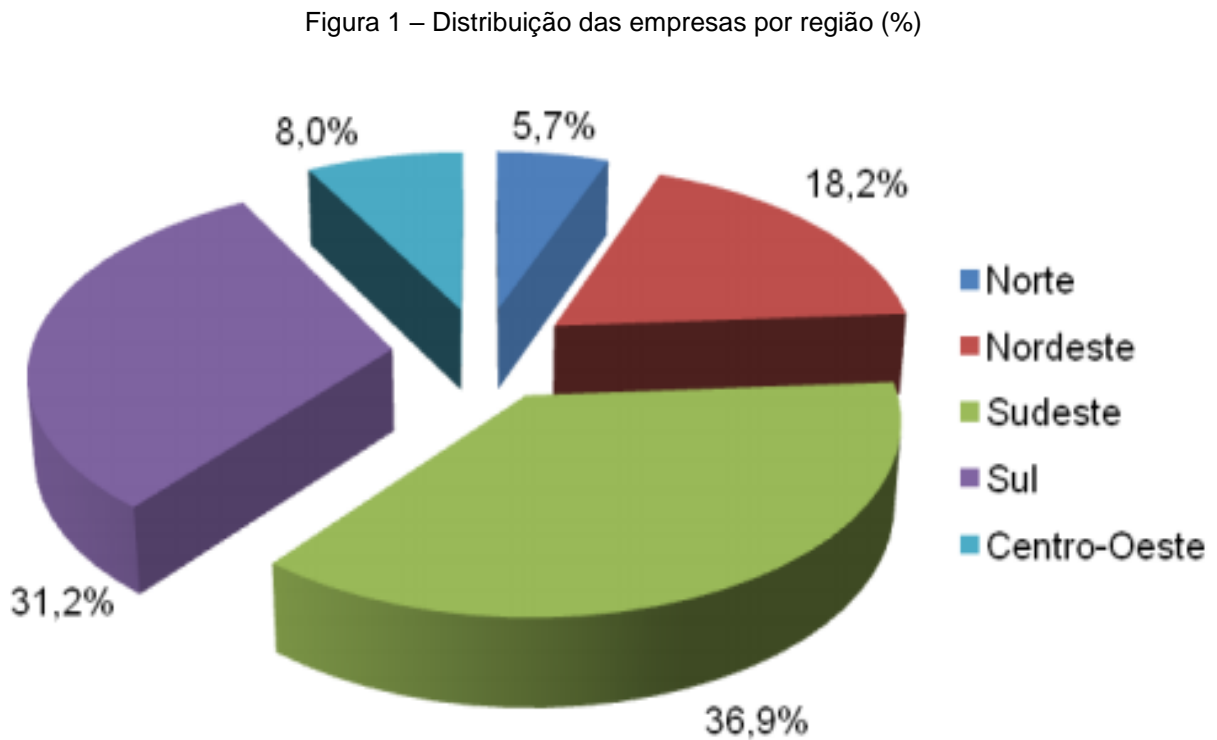
Dentro do setor de cerâmica, a produção nacional se divide em três vertentes: cerâmica branca e louças; cerâmica vermelha e revestimentos e materiais refratários (SEBRAE, 2015).

A cerâmica vermelha (ou estrutural) possui esse nome devido a sua cor, que tem como origem a presença de compostos ferrosos em sua composição. A mesma engloba uma gama de materiais usualmente utilizados na construção civil, como blocos, telhas, tijolos maciços, tubos para saneamento, elementos de laje, green wall, elementos vazados e também argila expandida. Também podendo estar presente em elementos domésticos, como filtros e painéis (SEBRAE, 2015).

Segundo Prado & Bressiani (2013), grande parte da indústria cerâmica vermelha está diretamente vinculada ao mercado da construção civil, logo, o crescimento deste segmento na última década foi o principal motivo para a recente expansão do setor

cerâmico. Sendo assim, os maiores polos cerâmicos do país estão nas regiões sul e sudeste, uma vez que há maior demanda de produtos cerâmicos nessas regiões.

A Figura 1 apresenta o gráfico da porcentagem das empresas por região, segundo FIEMG & FEAM (2013).



Fonte: Adaptado FIEMG & FEAM (2013).

Tendo em vista que a comercialização dos produtos geralmente se dá nas proximidades das empresas, os estados e regiões com maior população são onde os polos cerâmicos são mais facilmente encontrados. No estado do Pará, por exemplo, os dois grandes polos de produção se encontram nas cidades de São Miguel do Guamá e Santarém, de forma que, respectivamente, um atende a região mais populosa do estado e próxima a capital Belém, e outro a área com maior população do interior do estado. A Figura 2 apresenta os principais polos de produção de cerâmica vermelha do Brasil.

Figura 2 - Principais polos cerâmicos do Brasil



| SUL | SUDESTE | NORDESTE | NORTE | CENTRO OESTE | |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| Rio Grande do Sul | São Paulo | Rio de Janeiro | Bahia | Pará | Mato Grosso |
| 1 Santa Rosa | 15 Panorama | 28 Campos de Goytacazes | 40 Recôncavo Baiano | 50 São Miguel do Guama | 54 Várzea Grande |
| 2 Pelotas | 16 Teodoro Sampaio | 29 Itaboraí | 41 Calhém | 51 Santarém | Mato Grosso do Sul |
| 3 Santa Maria | 17 Penápolis | 30 Três Rios | Pernambuco | Rondônia | 55 Três Lagoas |
| 4 Lajeado Rio de Janeiro | 18 Ourinhos | 31 Governador Valadares | 42 Pau Dalho | 52 Porto Velho | 56 Rio Verde |
| 5 Feliz | 19 Região Metropolitana | 32 Igaratinga | Paraná | Acre | 57 Campo Grande |
| 6 Porto Alegre | 20 Bragança Paulista | 33 Sete Lagoas | 43 Juazeirinho | 53 Rio Branco | Goiás |
| Santa Catarina | 21 Tatui Paraíba | 34 Região Metropolitana | Rio Grande do Norte | | 58 Anápolis |
| 7 Canelinha | 22 Rio Claro | 35 Monte Carmelo | 44 Parelhas | | |
| 8 Pouso Redondo | 23 Mogi Guaçu | 36 Uberlândia | 45 Golaninha | | |
| 9 Criciúma | 24 Barras Bonitas | 37 Itulubá | 46 Açu | | |
| Paraná | 25 Itu | Espírito Santo | Ceará | | |
| 10 Curitiba | 26 Tambaú | 38 Itapemirim | 47 Russas | | |
| 11 Prudentópolis | 27 Rincão | 39 Colatina | 48 Caucaia | | |
| 12 São Carlos do Ivaí | | | Maranhão | | |
| 13 Londrina | | | 49 Timon | | |
| 14 Foz do Iguaçu | | | | | |

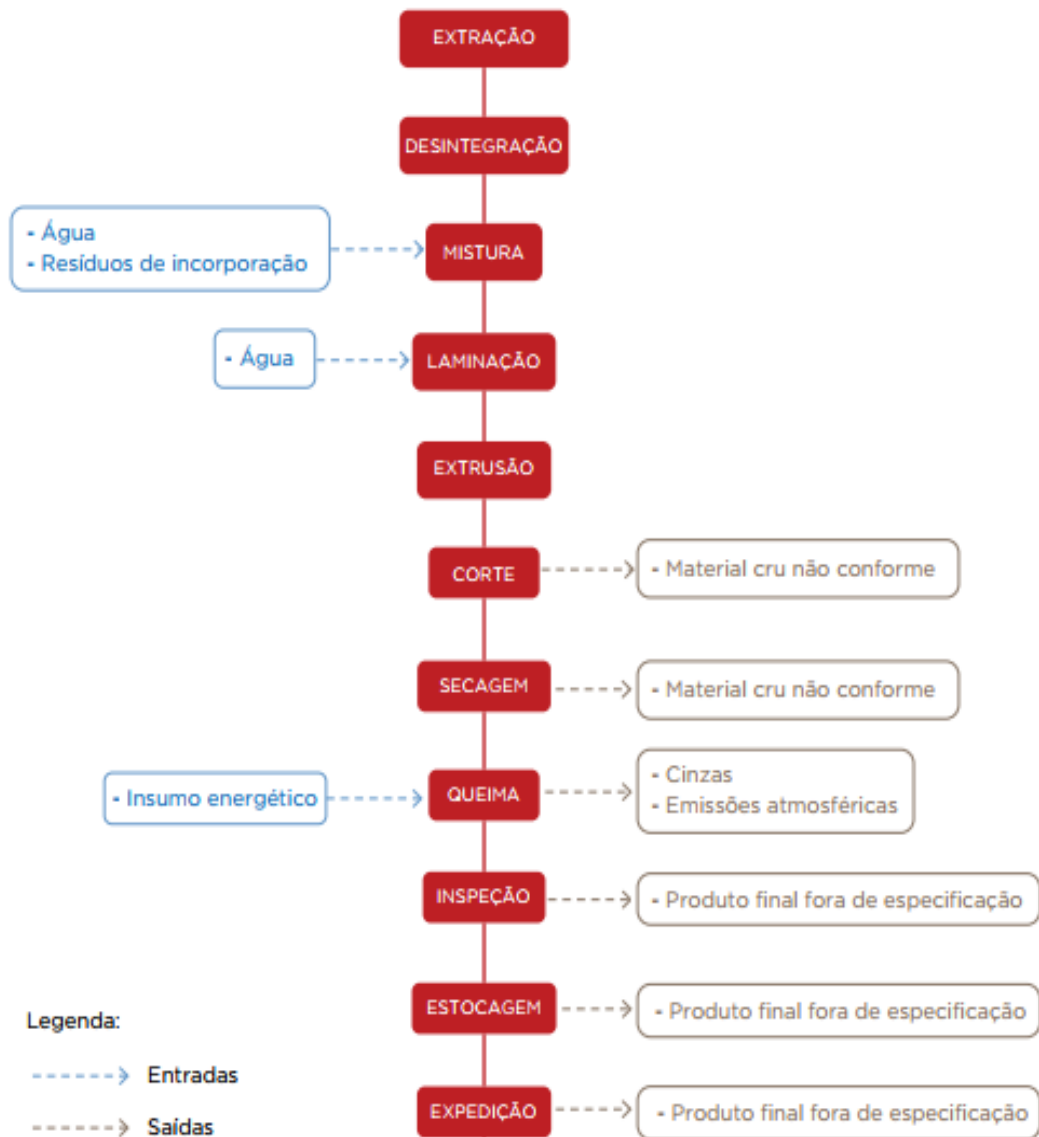
Fonte: Adaptado FIEM & FEAM (2013).

2.2 Processo de Produção da Cerâmica Vermelha

O processo de produção da cerâmica vermelha se dá basicamente em três etapas: Preparação, conformação e tratamento térmico. Resumidamente, a preparação é a etapa que compreende a extração e homogeneização da argila, podendo ser realizado manualmente ou por meio de máquinas. A conformação envolve a modelagem dos produtos a serem produzidos. Depois de modelados, os

produtos são submetidos à secagem e, posteriormente, encaminhados para a queima (FEAM, 2012). A Figura 3 apresenta o fluxograma do processo produtivo de cerâmicas vermelhas.

Figura 3 – Fluxograma do processo produtivo, entradas e saídas de insumo



Fonte: FIEMG & FEAM (2013).

2.2.1 Preparação

A matéria-prima fundamental para alimentar o processo de fabricação de cerâmica vermelha é a argila em seus diversos tipos que constituem, em sua maior parte, no que se denomina, em mineralogia, de argilominerais. A maioria das argilas

brasileiras está depositada nas várzeas dos rios, constituindo aluviões recentes, e de acordo com Bacelli Júnior (2010), neste caso, a extração é a céu aberto. A extração de argila ocorre a céu aberto, preferencialmente nos meses de menor precipitação, podendo ser realizada manualmente ou mecanizada, conjunta ou isoladamente da extração de areia (FIEGM & FEAM, 2013).

A preparação da argila é a etapa do processamento que visa homogeneizar a massa, retirada ou destruição de materiais indesejáveis e correção da sua granulometria, influenciando diretamente na qualidade do produto final. Consiste na mistura dos diversos tipos de argila, água e resíduos, quando aplicáveis (MINEROPAR, 2007). Geralmente os materiais cerâmicos tem em sua composição mais de dois tipos de matérias-primas. No caso das cerâmicas vermelhas, mesmo sua produção se dando apenas com argila como insumo, ocorre a mistura de pelo menos dois tipos diferentes de materiais (ABCERAM, 2016).

O processo de mistura geralmente tem início em um misturador, ocorrendo a adição de água de modo que a umidade seja uniforme, pois a variação da mesma pode causar sérios problemas com a massa durante o processo de extrusão (WIECK & FH, 2013). Depois de descansar por 48 horas, a massa é encaminhada para um laminador, que conclui a mistura e preparação da mesma. O laminador é responsável por um adensamento, eliminando bolhas de ar ou aglomerados remanescentes, sendo a etapa do processo que iria interferir diretamente no acabamento das peças (BACELLI JÚNIOR, 2010; FIEGM & FEAM, 2013).

2.2.2 Conformação

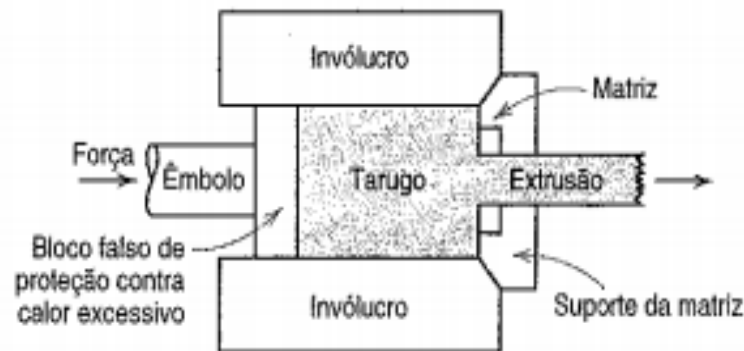
Depois de extraída e preparada, a mistura de argila estará pronta para ser utilizada na linha de produção. Os minerais a base de argila, quando misturados a água se tornam plásticos e flexíveis, sem que ocorra o risco de trincas. Desse modo, podem ganhar as formas e dimensões desejadas através de um processo de conformação. Dentre os vários processos para se dar forma às peças cerâmicas, os métodos mais utilizados são os de colagem, prensagem, extrusão e torneamento. A escolha de um desses métodos depende das características do produto e de sua viabilidade econômica (CALLISTER, 2007; ABCERAM, 2016).

O método de conformação mais utilizado na fabricação de cerâmicas vermelhas é o de extrusão, que pode ser descrito como:

...a cerâmica plástica é forçada através de uma matriz por meio de uma rosca sem fim acionada por um motor, e o ar é frequentemente removido em uma câmara a vácuo, para melhorar a densidade da peça. As colunas ocas no interior da peça extrudada (por exemplo, no tijolo de construção) são formadas pela introdução de inserções colocadas dentro do molde. (CALLISTER, 2007, p. 347).

A extrusão, porém, é um processo de conformação limitado à fabricação de objetos de seção constante, em que os principais fatores que afetam o seu rendimento e a qualidade final dos produtos fabricados são, como citado anteriormente, a composição e a preparação das massas, os moldes de extrusão, o modelo da máquina extrusora e a qualidade da câmara de vácuo (WIECK & FH, 2013). A Figura 4 ilustra o processo de extrusão das peças.

Figura 4 – Processo de extrusão



Fonte: CALLISTER (2007)

Após o processo de extrusão ocorre o corte da peça, podendo ser realizado por cortadoras automáticas - acopladas às extrusoras - ou manualmente, de acordo com as normas da ABNT. Ainda há a necessidade da carimbagem da peça, com as informações que precisam constar no produto cerâmico (BACELLI JÚNIOR, 2010).

2.2.3 Tratamento Térmico

Depois de conformada, a peça cerâmica possui forma e dimensões próximas ao desejado, porém retém uma porosidade bastante significativa e sua resistência mecânica ainda não é ideal para a maior parte das aplicações práticas. Ademais, para o preparo da massa e durante a operação de conformação das peças, ocorre o incremento de líquidos (normalmente água), que ainda precisam ser removidos. Por

fim, um tratamento térmico há altas temperaturas é realizado para um melhoramento das propriedades mecânicas do material. Esses dois processos são chamados de secagem e cozimento (ou queima) e são pontos críticos da produção de cerâmicas, pois defeitos que tornam as peças imprestáveis, como empenamento, distorção e trincas, são normalmente introduzidos nessas etapas (CALLISTER, 2007).

2.2.3.1 Secagem

Tendo em vista que todo processo de secagem busca reduzir o nível de umidade em objetos, Tubino & Borba (2006), comentam que após da etapa de conformação, em geral, as peças saem com cerca de 30% de umidade distribuída de forma mais ou menos uniforme em toda a massa. Ao final da secagem, a umidade presente na peça caí para em torno de 3%, sendo que o teor de umidade ideal gira em torno de 1% antes do início da queima.

Durante os estágios iniciais da secagem, as partículas de argila do corpo cerâmico estão envolvidas por uma fina camada de água. Com o avanço do processo, a água é retirada e as partículas se aproximam, causando a contração da peça (CALLISTER, 2007). De modo a evitar que a contração da cerâmica provoque tensões e, conseqüentemente, defeitos na fabricação, ABCERAM (2016) recomenda a eliminação de água lenta e gradualmente, de forma contínua ou intervalada, em temperaturas que variam entre 50°C e 150°C.

A remoção da água ocorre através da difusão das moléculas de água presentes no interior das peças cerâmicas para a superfície das mesmas, onde ocorre a evaporação. Desse modo, um dos pontos críticos do processo é o controle da taxa de remoção da umidade, pois se a taxa de evaporação superar a taxa de difusão, a superfície, mais seca que o interior, irá se contrair, podendo causar defeitos já mencionados anteriormente. Desse modo, a taxa de evaporação é reduzida para, no máximo, ser igual a taxa de difusão. Isso se dá pelo controle da temperatura, umidade e escoamento do ar (CALLISTER, 2007).

A secagem dos materiais cerâmicos pode ser realizada de forma natural, artificial ou mista. A secagem natural acontece pela exposição do material ao ar livre. A duração da mesma depende das condições climáticas as quais a peça é exposta, como umidade do ar, velocidade e direção do vento, calor entre outras. Ela pode acontecer em com a exposição direta ao sol ou em galpões cobertos com lona,

formando uma espécie de estufa -neste caso, sendo mais lenta- onde as peças são empilhadas (BACELLI JÚNIOR, 2010).

Segundo FIEMG & FEAM (2013), as desvantagens desse modelo de secagem estão ligadas a qualidade final das peças, haja vista que o processo estará diretamente ligado às condições climáticas do local e da impossibilidade de controlar as mesmas adequadamente. Por outro lado, a secagem natural é a forma mais barata para essa etapa de tratamento térmico. A Figura 5 mostra a secagem natural em um galpão com lona.

Figura 5 - Secagem natural realizada sob lonas



Fonte: FEAM (2012).

A secagem artificial acontece em secadores, construídos como câmaras de alvenaria, de forma contínua ou intermitente, sendo em ambos os casos necessário bombear ar quente para dentro do secador, onde as peças são empilhadas ou colocadas em prateleiras, de modo a facilitar o escoamento do mesmo (Figura 6).

Figura 6 - Estrutura de um secador



Fonte: Autores.

De acordo com Bacelli Júnior (2010), nos secadores intermitentes, a estrutura tem formato de câmara, onde todas as peças são colocadas de forma a secarem ao mesmo tempo. O material é colocado em prateleiras, de maneira espaçada e de modo que as peças sigam o sentido da corrente de ar quente, maximizando assim a superfície de contato com o fluido e uniformizando a velocidade da secagem (FEAM, 2012).

Nesse tipo de forno, o ar quente é introduzido por canais ao longo do piso ou do teto e distribuído pelo interior da câmara com o auxílio de circuladores de ar. Já o ar úmido é retirado por aberturas no fundo ou teto do secador. (SUDENE/ITEP, 1988 *apud* GRIGOLETTI, 2001). Este tipo de secador é muito utilizado na fabricação de telhas e blocos de grande massa, e a duração do processo dura, em média, 24 horas (FIEMG & FEAM, 2013).

Já os secadores contínuos funcionam de modo que novas levas de produtos sejam colocadas gradualmente em seu interior. Sua estrutura é em forma de túnel e as cerâmicas são colocadas em vagonetas, que deslizam sobre trilhos durante todo o comprimento do mesmo e no sentido contrário ao fluxo de ar quente. Em ambos os casos o calor dos secadores pode ser gerado por fonte própria ou reutilizando a

energia dos fornos de queima, deste modo, o tempo gasto nessa etapa do processo é menor em comparação a secagem natural.

Como é sabido, caso as peças cerâmicas percam rapidamente a água na sua superfície, as mesmas sofrem contração. Desse modo, segundo SANTOS & SILVA (1995 *apud* FEAM 2012), nesse processo, as peças são submetidas, primeiramente, a um aquecimento com ar úmido para evitar a contração e conseqüente quebra ou trinca. Em seguida, o ar úmido é substituído aos poucos por ar seco, até que a umidade restante seja extraída do material.

2.2.3.2 Queima

Após o processo de secagem, os corpos cerâmicos são transportados até um forno, onde ocorre a queima, também chamada de cozimento ou sinterização. De acordo com CALLISTER (2007), o cozimento ocorre em uma temperatura entre 900°C e 1400°C e durante esse processo, ocorre o aumento da massa específica, diminuição da porosidade e melhoramento das propriedades mecânicas das peças.

De acordo com a FEAM (2012), essa é uma etapa delicada do processo de produção, pois eventuais defeitos originados nas etapas anteriores, porém não visíveis, se revelam após o cozimento dos produtos. Quando terminada a queima, as peças adquirem as suas propriedades finais, pois o tratamento térmico acarreta em uma série de transformações físico-químicas, como perda da massa, surgimento de novas fases cristalinas, sinterização dos grãos e, em determinados tipos de cerâmica, a formação da fase vítrea (FIEM & FEAM, 2013).

A etapa de queima pode ser subdividida em 3 fases:

- a) aquecimento: O aquecimento do forno começa com fornalhas e cinzeiros fechados (após a combustão do insumo energético) de modo a se evitar o excesso de oxigenação, pois o aumento da temperatura deve acontecer de forma lenta (FIEMG & FEAM, 2013). Durante essa fase, ocorre a evaporação da água contida nos poros e parte da matéria orgânica é queimada. A temperatura fica em torno de 300°C e o tempo de duração dessa fase é entre 10 e 20 horas.

- b) queima: Durante esta etapa, ocorrem a transformações químicas que dão ao material as suas principais características para aplicações práticas. Os compostos sulfurosos são dissociados, a água de constituição das argilas é liberada na forma de vapor, os carbonatos se decompõem e ocorre a formação dos complexos sílico-aluminosos (TUBINO & BORBA, 2006). A velocidade do aumento da temperatura não pode ultrapassar os 40°C/h até chegar a temperatura de 900°C, quando começa uma subfase denominada “Patamar de Queima”, que é o tempo durante o qual o material fica na máxima temperatura. O patamar de queima dura por volta de 6 a 10 horas (FIEMG & FEAM, 2013).
- c) resfriamento: Após o cozimento, a temperatura das peças é gradualmente diminuída para que se evite deformações e fissuras. Essa etapa pode levar de 8 a 24 horas de acordo com Santos & Silva (1995 *apud* GRIGOLETTI 2001).

Sobre a etapa de queima, FEAM (2012) diz que:

A fase de esquite dura entre 8 e 40 horas, com média de 20 horas, enquanto a fase de queima propriamente dita dura entre 14 e 48 horas com média de 36 horas. A fase de esfriamento varia de 0 a 72 horas, com média de 24 horas. Dessa forma, o ciclo total de queima varia de 24 horas até 168 horas, mas a média nas cerâmicas visitadas é de 58 horas. (FEAM, 2012, p 62).

A queima dos produtos cerâmicos é realizada em equipamentos denominados fornos, cuja estrutura e combustíveis empregados possuem grande variedade. Bacelli Júnior (2010) afirma que os fornos podem ser classificados de acordo com seu modo de operação, se dividindo em intermitentes (abóboda ou paulistinha, garrafão, chinês, caipira e chama reversível) e contínuos (Hoffmann ou semicontínuo e túnel).

Os fornos intermitentes são normalmente construídos com tijolos de alvenaria comuns, na forma de câmaras circulares ou retangulares, onde a temperatura não é uniforme em toda a sua extensão. Os materiais são carregados manualmente até o preenchimento de toda a câmara, fazendo assim com que o processo seja caracterizando pela baixa produtividade, elevado consumo de combustível e de mão-de-obra (TUBINO & BORBA, 2006). Em decorrência da temperatura não uniforme, no forno intermitente cada queima pode gerar um resultado diferente, fazendo com que

a empresa busque alternativas que permitam o melhoramento do processo. Normalmente, uma alteração na curva de queima, no tempo da queima ou um ajuste de diferentes peças dentro dos fornos são opções utilizadas para contornar problemas. Por outro lado, essas ações aumentam o tempo de produção (NICOLAU, 2012).

Os fornos de produção contínua são caracterizados por sua estrutura em câmaras, de modo que o ar aquecido é levado a atravessar toda a extensão do forno antes de sair pela chaminé. Esse tipo de forno funciona em ciclos de 24h/dia, sem necessidade de parada para carga ou descarga dos produtos (SUDENE/ITEP, 1988 *apud* GRIGOLETTI, 2001). Os modelos de fornos contínuos mais utilizados são o Hoffmann e Túnel. Segundo Tubino & Borba (2006), os fornos Hoffmann são constituídos por duas galerias paralelas, que se unem nas extremidades por uma passagem de fogo. Nas laterais do forno se encontram as portas, por onde se realiza a enforma e desenforma das peças.

Ainda segundo o autor, os fornos do tipo túnel (Figura 7) são construídos como uma longa galeria fechada, podendo chegar até 140 metros de extensão. Neste tipo de forno, o material se movimenta por meio de vagonetas que percorrem toda a extensão do túnel com velocidade contínua, enquanto o fogo fica fixo. Durante o processo de produção, as vagonetas são introduzidas na galeria em intervalos regulares de tempo, de modo que no momento em que uma é retirada do forno, na outra extremidade outra é colocada.

Figura 7 - Estrutura de um forno tipo túnel



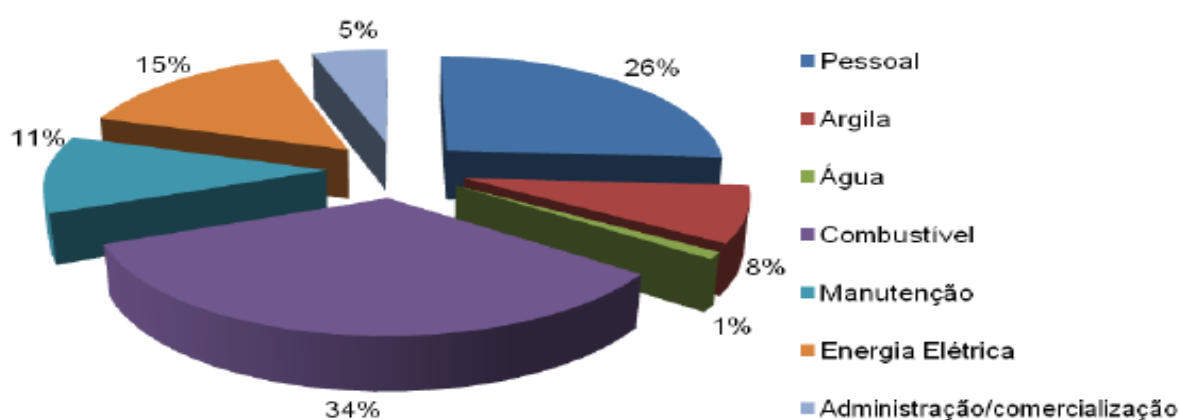
Fonte: Adaptado de Grigoletti (2001).

Depois de retiradas do forno, as peças são embaladas e armazenadas. Além disso, amostras de 100 indivíduos devem ser escolhidas aleatoriamente para que sejam realizados os testes de qualidade nas mesmas (FIEMG & FEAM, 2013).

2.3 Insumos Energéticos

De forma geral, as empresas do setor de cerâmica vermelha têm pouco controle ou conhecimento sobre os gastos durante o processo de produção. Porém, é possível afirmar que existe um consenso de que as etapas mais onerosas do processo são a aquisição do combustível utilizados para queima dos produtos nos fornos, seguido da mão-de-obra, como mostra a ilustração abaixo (Figura 8):

Figura 8 – Distribuição média dos custos de produção da indústria de cerâmica vermelha



Fonte: FEAM (2012).

Como é possível averiguar pela Figura 8, os gastos com insumos energéticos para a alimentação dos fornos giram em torno de 34% dos custos totais dos produtos. Dentre os combustíveis utilizados na etapa de queima, destacam-se a matéria proveniente de biomassa, o gás natural e o óleo combustível (Tabela 1).

Tabela 1 - Consumo de energia pelo setor cerâmico no Brasil por ano (%)

| Combustível | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
|------------------|------|------|------|------|------|
| Biomassa | 48,6 | 49,1 | 50,1 | 50,1 | 49,9 |
| Gás Natural | 23,1 | 25,2 | 23,9 | 24,3 | 25,5 |
| Óleo Combustível | 11,4 | 9,2 | 9,2 | 7,8 | 8,1 |
| Eletricidade | 7,8 | 7,8 | 8,2 | 7,9 | 7,8 |
| Outras | 9,1 | 8,7 | 8,7 | 9,8 | 8,7 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Fonte: Adaptado de SEBRAE (2008).

2.3.1 Biomassa

De acordo com a ANEEL (2005), biomassa é todo recurso renovável advindo de material orgânico, seja ele animal ou vegetal, que possa ser utilizado na produção de energia. A energia da biomassa é indiretamente proveniente da luz solar, que é processada em energia química através do processo de fotossíntese.

Sobre as fontes e formas de obtenção de biomassa, Cortez (2008) diz:

A biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, e também de resíduos orgânicos, nos quais encontramos os resíduos agrícolas, urbanos e industriais. Assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais (por exemplo, mamona e soja) (CORTEZ, p.18, 2008).

Conforme levantamento realizado pelo Ministério de Minas e Energia (2017), em 2016, a biomassa representava 29,9% da matriz energética brasileira, com uma oferta total de 86,2 Mtep (tonelada equivalente de petróleo), com destaque para os produtos advindos da cana de açúcar (bagaço e etanol), com oferta de 50,3 Mtep, respondendo por 58,4% da bioenergia e por 17,5% da matriz nacional e para a lenha, com oferta de 23,1 Mtep, correspondendo a 26,8% da matriz bioenergética e 8% da matriz nacional.

No setor da cerâmica vermelha, sendo este o foco do presente estudo, a lenha é o principal combustível utilizado nos fornos, sendo responsável por aproximadamente 50% da energia consumida pelo setor cerâmico brasileiro (SEBRAE, 2008). Porém, segundo a FEAM (2012), algumas empresas vêm substituindo a lenha, em sua forma mais rústica, por outras biomassas de menor custo, como serragem, pallets e cavacos de madeira.

2.3.1.1 Serragem

A serragem é definida tanto como produto originado do processamento da lenha, quanto resíduo da indústria madeireira. De acordo com Cortez (2008), o volume de resíduos pode ser maior do que o da madeira trabalhada, o que torna esse insumo uma opção viável para uso energético.

De modo geral, e tendo em vista que a serragem é obtida diretamente da madeira, suas propriedades químicas são as mesmas, sendo formados

essencialmente por material orgânico, onde os principais elementos existentes são o Carbono (49-50%), o Hidrogênio (6%), o Oxigênio (44-45%) e o Nitrogênio (1%). Além desses, alguns minerais como Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg) podem ser encontrados em pequenas quantidades (KLOCK, 2005). O material inorgânico permanece como resíduo depois da queima, sendo chamado de “cinzas”, e normalmente seu teor não ultrapassa os 2%.

Como características da sua utilização na indústria cerâmica, a serragem deve ser estocada em silos ou galpões, havendo a necessidade de adaptação nos equipamentos de queima. Além disso, a serragem proporciona uma melhor mistura com o ar, o que diminui o consumo de combustível, se comparada a lenha (FEAM, 2012; FIEM & FEAM, 2013).

Por se tratar de biomassa produzida a partir da madeira, o teor de umidade, o poder calorífico e a análise imediata (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), são importantes propriedades a serem estudadas para a utilização da serragem como insumo energético.

2.3.2 Propriedades do Insumo

2.3.2.1 Teor de Umidade

De acordo com Couto & Barcellos (2011), a quantidade de água presente em uma árvore viva pode variar consideravelmente entre espécies e até mesmo em um único indivíduo. Essa quantidade de água é denominada teor de umidade, e sua determinação é de suma importância, pois o mesmo impacta diretamente na utilização da madeira como combustível.

Quirino et al (2005) aponta que a porcentagem máxima de umidade (em base úmida) que uma madeira pode ter para ser queimada no forno está em torno de 65% a 70%. A nível de comparação, Couto & Barcellos (2011) afirmam que, uma madeira cortada, secada ao ar livre por um período de um mês, tem um teor de umidade em torno de 20 a 40%.

Em virtude de a umidade ser um aspecto muito importante no processamento da madeira, inúmeros métodos foram desenvolvidos para a determinação do seu teor, sendo o mais comum baseado na massa da madeira seca em estufa a 103± 2°C (PONCE & WATAI, 1985). Esse método de cálculo é denominado “umidade base

seca” ou “anidra” e serve para padronizar outras maneiras de determinação da umidade na parte interna da madeira (JANKOWSKY & GALINA, 2013; COUTO & BARCELLOS, 2011).

Há também um modo para se calcular a umidade denominado “umidade base úmida”, sendo baseado na massa da madeira antes de passar pelo processo de secagem. Esse método, porém, não é recomendável para madeiras maciças, mas sim para pastas celulósicas e as madeiras destinadas à sua fabricação (JANKOWSKY & GALINA, 2013; COUTO & BARCELLOS, 2011).

Por fim, o volume do combustível é diretamente afetado pelo teor de umidade presente no mesmo. Quanto maior a umidade, maior o volume do combustível e maior o espaço ocupado pelo mesmo no forno (ARANTES, 2009). Em termos do processo, esse espaço extra poderia ser utilizado de outras formas na linha de produção.

2.3.2.2 Análise Química Imediata

O desempenho térmico da serragem no forno está diretamente ligado ao comportamento dos 3 principais componentes da madeira (hemicelulose, celulose e lignina) bem como ao teor de material inorgânico presente na mesma, que são estudados como as cinzas restantes após o processo de queima. Para tal, é realizada a análise química imediata que, de acordo com Brito & Barrichelo (1978):

A análise imediata de um combustível fornece a percentagem de material volátil, carbono fixo e cinza. Em outras palavras ela fornece a percentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), bem como dá uma indicação do material residual (BRITO & BARRICHELO, 1978).

De acordo com Pinheiro et al (2008), o teor de materiais voláteis presentes no combustível é uma das mais importantes propriedades do mesmo, pois está diretamente ligado a facilidade de ignição, velocidade de combustão e estabilidade da chama. Em combustíveis cuja estrutura apresente 100% de materiais voláteis (líquidos e gases), a combustão acontece de forma praticamente instantânea. Em combustíveis sólidos a combustão acontece em um tempo proporcional ao teor de materiais voláteis.

A composição química da madeira, temperatura de carbonização e taxa de aquecimento são os fatores que terão influência direta no teor de voláteis e na quantidade de carbono presente na composição dos combustíveis, denominada carbono fixo. Este, sendo reflexo direto da quantidade de lignina na madeira, porém em proporção inversa a presença de hemicelulose (CARMO, 1988). A relação entre esses dois fatores se dá, pois, combustíveis com elevadas porcentagens de carbono fixo e baixas porcentagens de materiais voláteis, por exemplo, tendem a queimarem de modo mais lento, um exemplo disso é o carvão. De acordo com Parikh et al (2005), na serragem, a proporção de voláteis e carbono fixo é de 72% e 25%, respectivamente.

A cinza é um resíduo mineral pós queima e resulta dos componentes inorgânicos da madeira, sendo composta principalmente por Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) que, após a incineração, tomam a forma de óxidos (CARMO, 1988; KLOCK, 2005).

As contaminações presentes na biomassa, entretanto, podem elevar o teor das cinzas. O teor das cinzas na madeira, segundo Parikh et al (2005), fica entre 0,5% e 2%, porém, em cavaco e serragem com cascas e galhos, essa porcentagem pode aumentar para cerca de 5-10%, dependendo da quantidade de impurezas no material e do seu armazenamento (KOFMAN, 2006 *apud* LOPES, 2012).

De acordo com Hoffmann (2010), o teor das cinzas presentes no combustível é determinante para o projeto do layout de produção, pois afeta a complexidade do mecanismo de retirada das mesmas, levando em conta suas características, que variam de acordo com o material inorgânico presente em sua composição.

2.3.2.3 Poder Calorífico

De acordo com Brito e Barrichelo (1978) o poder calorífico corresponde à quantidade de calor liberada após uma certa parcela de combustível passar completamente pelo processo de combustão. Para a utilização de madeira para fins energéticos e industriais deve ser baseada no conhecimento de seu poder calorífico. Porém, existem características da madeira que influenciam o valor do mesmo. Sua composição química e seu teor de umidade, por exemplo, são alguns desses fatores. Farianhaque (1981, *apud* VALE et al, 2000) afirma que quanto menor for a porcentagem de umidade presente na madeira, maior será o calor gerado por unidade

de massa. Para uma queima eficiente de combustível derivado da madeira, o teor de umidade do mesmo não deverá ultrapassar os 25%, pois acima disso ocorre uma redução do calor da combustão e, conseqüentemente, a diminuição da temperatura da câmara de combustão e dos gases de escape.

O poder calorífico pode ser dividido em três tipos:

- a) poder Calorífico Superior;
- b) poder Calorífico Inferior;
- c) poder Calorífico Útil.

Cortez et al (2008), afirma que o poder calorífico superior (PCS) é a quantidade total de calor liberado após certa unidade de massa de combustível passar pelo processo completo de combustão, levando em consideração a formação de água no processo e a umidade presente no mesmo. Já o poder calorífico inferior (PCI) a água e umidade do processo não são consideradas para o cálculo.

O poder calorífico útil (PCU), é a energia útil do processo, na qual o calor utilizado para a evaporação de toda a água presente é descontado dos cálculos finais. Vale & Brasil (1997 *apud* LOPES, 2012), apontam que na maior parte dos processos que utilizam biomassa como fonte de energia, o combustível não passa por um processo de secagem que diminua o teor de umidade para menos de 10%, portanto o PCU é o cálculo energético que melhor se enquadra para essa realidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta da serragem utilizada no experimento foi realizada em uma empresa de produção cerâmica, localizada na Travessa Caranan nº1100, Bairro Floresta, no município de Santarém, estado do Pará, e em funcionamento desde a década de 1980. Dentre os materiais fabricados pela empresa estão tijolos, telhas naturais e resinadas. Trata-se de uma empresa certificada pela ANICER.

A primeira etapa do trabalho consistiu em um questionário econômico realizado no estabelecimento, de modo a contextualizar o processo de produção do mesmo. O questionário, disponível no Anexo I, abordou questões envolvendo a quantidade de produção e matéria-prima utilizada, fornecedores, distância dos mesmos e tratamentos previamente realizados nos insumos energéticos.

Depois de uma visita ao pátio de produção, realizada de modo que se pudesse conhecer de fato como o processo de produção das cerâmicas vermelhas é realizado, com todas as particularidades da empresa, foi feita a coleta das amostras a serem estudadas. Assim, foram recolhidas três amostras, pesando aproximadamente 1kg, de três pilhas distintas de serragem, estocadas em um galpão ao lado da linha de produção (Figura 9).

Figura 9 – Serragem estocada



Fonte: Autores.

A serragem foi coletada preferencialmente em pontos mais profundos da pilha uma vez que o material localizado na superfície da pilha de armazenamento, mesmo que de forma leve, está mais suscetível as pequenas e rápidas mudanças do ambiente, além de representar uma pequena parte da pilha. Vale ressaltar que, a serragem coletada, de acordo com o gerente de produção, estava pronta para uso, sendo consumida até o final do dia. As amostras foram armazenadas de modo que conservassem da melhor maneira possível suas condições naturais até que a etapa de análise se iniciasse.

De acordo com Klock et al. (2005), não existe uma regra para o menor tamanho das partículas a serem analisadas, porém recomenda-se que as mesmas estejam em uma faixa entre 40 e 80 mesh ($425\mu\text{m}$ e $180\mu\text{m}$, respectivamente). Neste caso, a peneira de 80 mesh foi substituída por uma de 60 ($250\mu\text{m}$) e o material analisado foi o que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60. A Figura 10 mostra as peneiras e suas sobreposições.

Figura 10 – Peneiras utilizadas



Fonte: Autores

3.1 Análise Química Imediata

A análise química imediata foi realizada de acordo com a norma ASTM 1762 (ASTM, 2007), porém adaptada à serragem, com três repetições para cada amostra. Os cadinhos utilizados foram calcinados a 700°C por 30 minutos e posteriormente colocados em um dessecador antes da pesagem da tara.

3.1.1 Teor de umidade

Foi determinado o teor de umidade na base seca e na base úmida, através da diferença da pesagem entre o material úmido e após a secagem realizada em estufa com temperatura em torno de 105°C. As equações (1) e (2) foram utilizadas para tal:

$$U_{bs}\% = \frac{m_u - m_s}{m_s} * 100 \quad (1)$$

$$U_{bu}\% = \frac{m_u - m_s}{m_u} * 100 \quad (2)$$

Onde:

$U_{bs}\%$ = Teor de umidade da amostra (base seca)

$U_{bu}\%$ = Teor de umidade da amostra (base úmida)

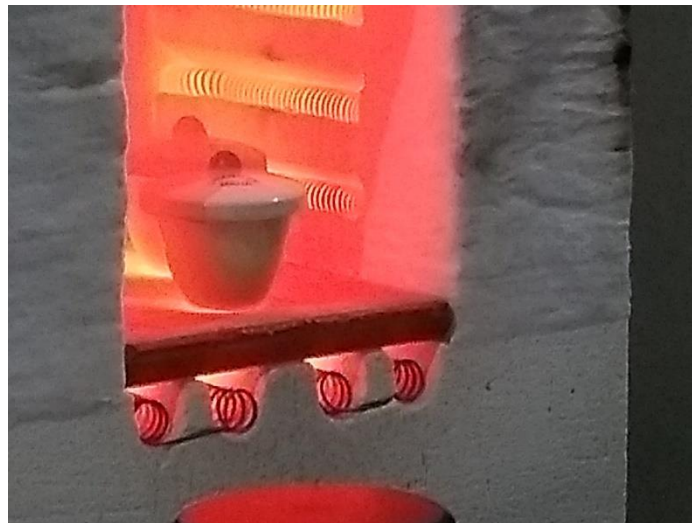
m_u = massa úmida (g)

m_s = massa seca (g)

3.1.2 Materiais Voláteis

A determinação dos materiais voláteis na serragem se dá aquecendo a mufla à 950°C (Figura 11), onde o cadinho com o material fica por 6 minutos. Depois de retirado da mufla e resfriado no dissecador, a amostra é pesada e seu teor de matéria volátil pode ser determinado através da equação (3).

Figura 11 – Determinação de materiais voláteis.



Fonte: Autores

$$\text{Materiais Voláteis (\%)} = \frac{m_s - m_v}{m_s} * 100 \quad (3)$$

Onde:

m_s = massa seca (g)

m_v = massa da amostra após secagem a 950°C (g)

3.1.3 Teor de Cinzas

Para determinar o teor de cinzas do material, as amostras são colocadas na mufla, a uma temperatura de 750°C, com os cadinhos destampados. Após 6 horas, são retiradas e colocadas em um dissecador por aproximadamente uma hora, para depois serem pesadas.

O teor de cinzas da amostra é encontrado através da equação (4):

$$\text{Cinzas (\%)} = \frac{m_c}{m_s} * 100 \quad (4)$$

Onde:

m_s = massa seca (g)

m_c = massa dos resíduos (g)

3.1.4 Carbono Fixo

Tendo em mãos os valores dos materiais voláteis e do teor de cinzas da amostra, a determinação do carbono fixo é feita por diferença entre a soma de ambos e 100 (%), conforme a equação (5):

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [(\% \text{ cinzas}) + (\% \text{ materiais voláteis})] \quad (5)$$

3.2 Poder Calorífico

A determinação do poder calorífico foi realizada de acordo com a norma ASTM D5865-13 (ASTM, 2013), porém adaptada à serragem, com três repetições para cada amostra. Para tal, as amostras foram queimadas em uma bomba calorimétrica (Figura 12), obtendo-se o poder calorífico superior.

Figura 12 – Equipamento utilizado para determinação de poder calorífico (“C 2000 calorimeter system” - Ika® Werke).



Fonte: Autores.

Segundo PARIKH et al (2005), para a obtenção dos valores do poder calorífico superior, inferior e útil por meio de cálculos, foram utilizadas as seguintes equações, respectivamente:

$$PCS = (0,312 * \% \text{ carbono fixo}) + (0,1534 * \% \text{ materiais voláteis}) \quad (6)$$

$$PCI = PCS - (600 * 0,09 * \% \text{ Hidrogênio}) \quad (7)$$

$$PCU = (PCI * (1 - (0,01 * \% \text{ Umidade}))) - (600 * 0,01 * \% \text{ Umidade}) \quad (8)$$

Onde:

PCS^s = Poder calorífico superior, base seca, (MJ/kg)

PCI^s = Poder calorífico inferior, base seca, (kcal/kg)

PCU^u = Poder calorífico útil, base úmida, (kcal/kg)

$\% \text{ Hidrogênio}$ = Teor de hidrogênio na amostra, considerado 6%

3.3 Tratamento Estatístico

Foram realizadas simulações da serragem em diferentes graus de umidade e sem contaminação. As simulações se deram com a serragem com contaminação em umidade de 18% e 8%, bem como serragem sem contaminação nos mesmos teores, cujos dados se encontravam no Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM) da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) nas mesmas condições de umidade.

Para as análises estatísticas e comparação entre as médias dos tratamentos de serragem, primeiramente realizou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk ao nível de 95% de probabilidade. Após comprovada a normalidade dos dados, procedeu-se com a Análise de variância (ANOVA), e caso verificado diferença estatística através desse procedimento, aplicou-se o teste de Tukey para comparação de médias, ao nível de 95% de probabilidade. Utilizou-se o software BioEstat v. 5.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diagnóstico da Empresa

O questionário aplicado no empreendimento teve como objetivo um diagnóstico das atividades da empresa, de modo a mapear a produção e, conseqüentemente, o uso da serragem nos fornos de queima, bem como sua eficiência e o impacto econômico do uso do insumo energético.

Com uma produção de 700 mil peças mensais -com capacidade de aumento até 1,5 milhão – a cerâmica estudada está inclusa na categoria de médio porte, de acordo com a classificação proposta por Santos (2003). Para a queima dessa quantidade de produtos, aproximadamente 1000m³ de serragem são utilizados, a um custo de 15 reais por m³, o que resulta num gasto aproximado de R\$ 15.000,00.mês⁻¹. Sendo assim, em média, cada metro cubico de serragem produz 700 peças e o gasto com combustível para a produção de um único produto é de aproximadamente R\$ 0,02.

A serragem utilizada pela empresa é comprada de serrarias na cidade de Santarém, resultando do resíduo do processo de produção dessas empresas. Por esse motivo, não se tem um controle apropriado sobre o material que compõe a serragem utilizada nos fornos.

O abastecimento do estoque de serragem acontece diariamente, por meio de caminhões, pois de acordo com os dados obtidos, uma pilha de 12 m³ de serragem é consumida a cada 8 horas. Dessa forma, a serragem é armazenada em um galpão coberto próximo a linha de produção e o único pré-tratamento feito na mesma é a retirada de pedaços grandes de madeira, realizado manualmente. De acordo com Canto (2009), esse armazenamento pode acarretar contaminações na serragem com areia e terra, materiais que aumentam o teor de cinzas pós-combustão e podem causar problemas de operação nos fornos.

As pilhas de serragem recém-chegadas são misturadas diretamente ao material da pilha de utilização. Existe apenas uma divisão de pilhas, haja vista o tamanho do local de armazenamento. Apesar do pequeno controle sobre as características e propriedades da serragem, nota-se a alteração da umidade presente na mesma ao longo do ano, pois a região amazônica apresenta duas estações bastante distintas entre si.

A alimentação dos fornos ocorre de forma semiautomática, com os dispensadores de serragem sendo cheios manualmente. O forno de produção contínuo, modelo túnel, alcança uma temperatura máxima de 835°C e tem seu controle realizado em 6 pontos ao longo de sua extensão.

4.2 Análise Química Imediata e Umidade

As médias do teor de materiais voláteis e de carbono fixo encontradas nas amostras são de 72,94% e 15,99%, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2 – Análise Química Imediata e teor de umidade

| Estatística Descritiva | Voláteis | Cinzas | Carbono Fixo | Umidade |
|-------------------------------|-----------------|---------------|---------------------|----------------|
| Média | 72,94 | 11,07 | 15,99 | 53,09 |
| Desvio padrão | ± 0,71 | ± 0,41 | ± 0,47 | ± 1,60 |
| Coefficiente de variação (%) | 0,98 | 3,72 | 2,97 | 3,01 |

Fonte: Autores.

De modo geral, a serragem normalmente apresenta cerca de 72,40% de voláteis e 25% de carbono fixo (PARIKH et al., 2005). Levando em conta a heterogeneidade das amostras de serragem analisadas, o teor de materiais voláteis encontrado nas mesmas é condizente com o encontrado na literatura. Por sua vez, a porcentagem de carbono fixo é menor, provavelmente prejudicado pelo elevado valor de cinzas.

Tais fatores fazem da serragem um combustível com maior facilidade de ignição, velocidade de combustão e estabilidade da chama (PINHEIRO et al, 2008). Desse modo, o abastecimento do forno é realizado de maneira contínua e em intervalos menores, comparados com outros tipos de combustíveis como carvão e lenha

Para cinzas, encontrou-se média de 11,07%, verificando um teor muito maior do que o encontrado em literatura para esse tipo de material. Segundo Parikh et Al (2005) e Lopes (2012), o teor de cinzas em combustíveis advindos de resíduos madeiros situa-se em uma faixa entre 0,5% e 2.45%. Klock (2005), relata que a porcentagem de cinzas em madeiras de regiões temperadas estão entre 0,2 e 0,5%, podendo ser mais alta no caso de madeiras tropicais.

As cinzas são resultantes do material inorgânico presente no combustível, e permanecem como resíduo pós-queima. De acordo com Canto (2009), o elevado teor

de cinzas encontrados em combustíveis desse tipo pode ser atribuído a uma grande quantidade de impurezas como terra, areia e pedras, que são carregadas juntamente com a biomassa. Tendo em vista que a serragem utilizada nos fornos é comprada como resíduo de madeiras, a empresa cerâmica não possui um controle sobre as instalações onde o beneficiamento da madeira é realizado. Assim, terra, areia e outros materiais inorgânicos podem ser misturados com a serragem ainda na madeira e na etapa de transporte do combustível.

Outro fator que pode contribuir para a contaminação da serragem é o armazenamento da mesma no próprio pátio da empresa cerâmica, uma vez que o combustível é armazenado em contato direto com o solo. Durante o carregamento da serragem para os fornos, terra e areia podem ser misturadas aos insumos, acarretando o aumento do teor de cinzas presentes ao final da queima.

Cabe ressaltar que no decorrer da realização dos testes com a bomba calorimétrica, averiguou-se que o elevado teor de materiais inorgânicos na serragem criou uma espécie de crosta no cadinho utilizado. Algo semelhante deve acontecer na câmara de combustão do forno pois, segundo Reinaldo et al., (2006), as cinzas leves formadas durante o processo de combustão são levadas em direção a chaminé do forno pelos gases aquecidos e acabam formando depósitos nas paredes da câmara de combustão e ao longo do forno, diminuindo assim a eficiência térmica.

Além do processo de combustão em si, um elevado teor de cinzas terá influência no layout da fábrica, pois deverá levar-se em consideração a remoção das cinzas dos fornos, seu armazenamento e uma possível reutilização das mesmas (HOFFMANN, 2010). Ademais, intervalos para manutenção são mais frequentes ocasionando um maior gasto a empresa.

Quanto a umidade, encontrou-se valor médio de 53,09% que, segundo Quirino et al (2005), se encontra abaixo da porcentagem máxima aceita para a combustão no forno, entre 65-70%. Entretanto, de acordo com Alakangas (2005, *apud* CANTO, 2009), o valor encontrado está dentro da margem usualmente presente em combustíveis formados através de resíduos de madeira e que varia entre 45-55%.

O teor de umidade afetará diretamente a eficiência da serragem como combustível, pois o mesmo é um dos fatores diretamente ligados ao poder calorífico do material. O alto teor de água presente na serragem diminui o seu poder calorífico inferior e útil, que conseqüentemente diminui a eficiência do processo de queima e faz com que o gasto de combustível seja maior. Farianhaque (1981, *apud* VALE et al.,

2000) afirma que o calor gerado por unidade de massa de serragem será maior à medida que a umidade presente diminui.

Ainda segundo o autor, para um processo eficiente de queima, a porcentagem de umidade presente em combustíveis originados de madeira não deverá ultrapassar 25%, pois acima desta faixa ocorre uma grande diminuição da temperatura de queima e dos gases de escape. Assim, um processo de secagem reduziria o teor de água na serragem, entretanto, isso acarretaria em gasto para a construção de uma nova estrutura para tal, além do risco de maior contaminação com material inorgânico durante esse processo.

Em contrapartida, Lopes (2012), destaca que serragem muito seca também pode se tornar um problema para a operação dos fornos, pois esse material libera mais calor com uma maior velocidade. Isso faz com que os fornos alcancem temperaturas mais altas muito rapidamente, o que pode prejudicar o ciclo de queima e danificar produtos.

4.3 Poder Calorífico

Percebe-se um poder calorífico superior (PCS) relativamente pequeno para a serragem em relação a outros combustíveis e aos dados encontrados sobre a própria serragem na literatura (Tabela 3).

Tabela 3 – Poder Calorífico superior, inferior e útil da serragem, em kcal/kg

| Estatística Descritiva | PCS | PCI | PCU |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
| Média | 3424,44 | 2781,88 | 1608,81 |
| Desvio padrão | ± 98.69 | ± 91.21 | ± 44.5 |
| Coeficiente de variação (%) | 2,88 | 3,28 | 2,77 |

Fontes: Autores.

Brito & Barrichelo (1978) apontam que a madeira apresenta uma variação de PCS para madeiras não-resinosas e resinosas de 4000 a 4250 kcal/kg e 4300 a 4850 kcal/kg, respectivamente. Já Parikh et al (2005), afirma que o poder calorífico superior da serragem é de, em média, 4800kcal/kg, valor semelhante ao encontrado por Quirino et al (2005), de 4880 kcal/kg.

Porém, tendo um PCS médio de 3424,44 kcal/kg, a serragem analisada se aproxima da margem apontada por Brito (1993 *apud* VALE et al., 2000), que está entre 3500 a 5000 kcal/kg. Esse poder calorífico relativamente baixo, em comparação aos demais insumos energéticos, pode ser ocasionado pela quantidade de impurezas presentes na sua composição, haja vista que as mesmas influem diretamente na quantidade de calor liberada durante a queima.

Sendo derivado do poder calorífico superior, o poder calorífico inferior (PCI) também é afetado por fatores na composição do combustível. Além disso, a umidade presente faz com que o mesmo tenha uma queda ainda mais acentuada, pois energia é gasta para para condensação das moléculas de água durante o processo de combustão.

Considerando que encontrou-se um poder calorífico inferior médio de 2781,88 kcal/kg, a amostra analisada encontra-se dentro da faixa de PCI da serragem encontrada na literatura, que varia entre 2500 kcal/kg até 4200 kcal/kg (Manfredini & Sattler, 2005; ARAUTERM, 2017). Para demais combustíveis derivados de biomassa madeireira, como cavacos, valores que variam entre 1905,0 kcal/kg e 4064,0 kcal/kg foram encontrados (CANTO, 2009; FERREIRA, 2014). Tal disparidade pode ser atribuída aos diferentes tipos de madeiras estudadas e suas propriedades, bem como as diferenças que um único indivíduo pode apresentar em sua estrutura.

A energia gasta de fato para a queima da cerâmica é ilustrada no poder calorífico útil (PCU), pois o mesmo desconta toda o calor dispensado para condensação e evaporação das moléculas de água presentes no combustível e formadas durante a combustão. Como o teor de umidade presente na serragem utilizada pela empresa é superior a 50%, o PCU da mesma, com valor de 1608,81 kcal/kg, representa apenas 46,98% de toda a energia gerada durante o processo de combustão. Isso reflete uma baixa eficiência desse material em termos energéticos.

Vale ressaltar o desvio padrão encontrado nas amostras, tanto na análise química imediata quanto na análise do poder calorífico, pois a serragem utilizada nos fornos é uma mistura de vários tipos de madeiras, com diferentes partes e diferentes espécies. Além disso, as impurezas presentes também são compostas e dispersas de forma heterogênea nas amostras.

4.4 Simulações

Para se ter uma maior base de comparação da eficiência da serragem utilizada como combustível, foram realizadas simulações e confronto dos dados com outras amostras de serragem disponíveis no Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM), da Universidade Federal do Oeste do Pará (Tabela 4). Para tal, analisou-se, além da serragem coletada no pátio da empresa -cuja umidade média é de 53%-, simulações com essa mesma serragem em condições de umidade de 8 e 18%, bem como outra serragem, sem contaminação por material inorgânico, nos mesmos níveis de umidade.

Tabela 4 - Comparação do Poder Calorífico das amostras

| Tratamento | PCS (Kcal/Kg) | PCI (Kcal/Kg) | PCU (Kcal/Kg) |
|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Serragem contaminada 53% | 3424.44 a | 2781.88 c | 1608.81 e |
| Serragem contaminada 18 % | 3424.44 a | 2992.44 b | 2444.44 d |
| Serragem contaminada 8 % | 3424.44 a | 3052.44 b | 2781.89 c |
| Serragem não contaminada 8% | 4366.57 b | 3995.17 a | 3658.9 b |
| Serragem não contaminada 18% | 4366.57 b | 3934.57 a | 3242.85 a |

* Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

As simulações para comparação se deram com serragem sem contaminação por matéria inorgânica, com diferentes teores de umidade. Dessa forma, foi possível observar a variação do poder calorífico superior entre as amostras. Houve o incremento de quase 1000 Kcal/Kg nas amostras não contaminadas. Tendo um poder calorífico superior médio de 4366.57 kcal/kg, as amostras sem contaminação estão bem mais próximas dos valores encontrados na literatura, tanto para madeiras quanto para serragens

Com relação ao poder calorífico inferior, a variação entre amostras com e sem contaminação continua grande, porém, aqui o importante a se notar é como o mesmo varia com o teor de umidade presente na serragem, tendo três classes bastante distintas uma da outra. Como era de se esperar, o maior PCI é o da serragem não contaminada que passou por processo de secagem, ficando com uma umidade média de 8%.

Entre a amostra coletada na empresa (serragem contaminada 53%) e a amostra de laboratório (serragem não contaminada 8%), existe uma diferença de

aproximadamente 43,61%, evidenciando condições de composição da serragem que interferem em seu rendimento. Como ressaltado anteriormente, grande parte dessa diferença deve-se a condições de acondicionamento e transporte do material, como apontado por Canto (2009).

O poder calorífico inferior das amostras não contaminadas e em condições de menor umidade se aproxima bastante dos valores apontados pela ARAUTERM (2017), da ordem de 4000 kcal/kg para o pó de serragem fino e 4200 kcal/kg para a serragem com maior granulometria. Esse valor também é maior do que os valores apontados para demais biomassas utilizadas como combustível nos fornos, como lenha e pallets de madeira, que possuem PCI's estimados em 3100 kcal/kg e 3000 kcal/kg, respectivamente (CEMIG, 2016; SEBRAE, 2008).

Na comparação entre o poder calorífico útil das amostras e simulações, foram encontrados cinco grupos distintos, que variam de 1608.81 Kcal/Kg a 3658.90 Kcal/Kg. Como o PCU indica a energia utilizada, de fato, no processo de queima, a comparação mostra a importância da composição química e do teor de umidade no processo. A serragem em condições ideais de umidade e composição tem um rendimento médio 2,27 vezes maior do que o das amostras coletadas na empresa. Caso a serragem utilizada nos fornos apenas passasse por um processo de secagem, de modo que ficasse com aproximadamente 8% de umidade, a diferença de eficiência ficaria próxima de 73%.

A Tabela 5 mostra a comparação entre a análise química imediata da serragem coletada na empresa, com 53% de umidade, e a serragem do laboratório, com 8% de umidade.

Tabela 5 – Análise Química Imediata

| | Voláteis | Cinzas | Carbono fixo |
|--------------------|-----------------|---------------|---------------------|
| 8% não contaminada | 80,43 | 0,52 | 19,05 |
| 53% contaminada | 72,94 | 11,07 | 15,99 |
| F_{cal} | 439.71** | 3224.13** | 92.73** |

F_{cal} = Valor de F obtido através da análise de variância (ANOVA); * Significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0.01$); ** Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0.01 < p < 0.05$).

Essa comparação evidencia o teor de cinzas extremamente elevado da serragem utilizada nos fornos de queima, sendo mais de vinte e uma vezes maior do que o da serragem sem contaminação por materiais inorgânicos. Além disso, a

serragem não contaminada, com 80,43% de materiais voláteis e 19,05% de carbono fixo, ainda terá um desempenho de queima melhor, pois sua velocidade de chama será maior e mesmo assim, a serragem queimará por mais tempo do que a amostra (CORTEZ, 1988).

5 CONCLUSÕES

Averiguou-se que a empresa estudada tem foco de investimento no processo produtivo. A compra de equipamentos de produção contínua otimiza o processo e a expectativa de aumento de produção é grande, com capacidade para dobrar nos próximos anos. Equipamentos automatizados, sistemas de reaproveitamento de calor e de filtragem mostram preocupação com a redução de gastos e com o fator ambiental. Por fim, o apoio e o incentivo ao presente estudo sobre insumos energéticos mostra interesse na melhoria contínua da sua produção.

A serragem utilizada como combustíveis nos fornos de queima de cerâmica vermelha apresentou alto teor umidade, por volta de 53.09%, o que impacta diretamente na qualidade da mesma como insumo energético, pois reduz drasticamente a energia utilizada para o cozimento das peças cerâmicas.

A análise química imediata mostra que a serragem utilizada nos fornos tem aproximadamente 72.94% de materiais voláteis em sua composição, 15.99% de carbono fixo e 11.07% de cinzas. Esses valores mostram que há contaminação por matéria inorgânica na serragem (areia, terra, etc), pois o teor de cinzas é extremamente elevado. Isso interfere diretamente no rendimento da serragem e ainda pode causar problemas na câmara de combustão do forno.

A análise energética determinou que o poder calorífico superior (PCS), medido em uma bomba calorimétrica, é de aproximadamente 3424.44 Kcal/Kg. Por meio de cálculos, o poder calorífico inferior foi estimado em aproximadamente 2781.88 Kcal/Kg, enquanto o poder calorífico útil foi estimado em 1608.81 Kcal/Kg. Esses valores são afetados pela composição química da serragem, seu grau de contaminação e a umidade presente na mesma. Dessa maneira, o calor utilizado de fato pelos fornos para o processo de cozimento, é de apenas 46.98% da energia gerada pela serragem.

A simulação e comparação com serragens sem contaminação e com outros teores de umidade mostrou que uma serragem em condições ideais de umidade e

sem contaminação pode fornecer até 2,27 vezes mais energia para a fornalha, além de possuir um teor de cinzas cerca de 21 vezes menor, o que influencia diretamente na vida útil do forno. Caso a serragem utilizada pela empresa passasse por um processo de secagem até um teor de umidade de aproximadamente 8%, a energia fornecida para o processo de queima seria aproximadamente 73% maior.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM – **Associação Brasileira de Cerâmica**, [2016]. Disponível em <<http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>> Acesso em: 25 set. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2005. 2. ed. 153 p.
- ANICER - **Associação Nacional da Indústria Cerâmica**, Relatório Anual -2015. Disponível em: <<http://anicer.com.br/setor/>> Acesso em: 25 set. 2017.
- ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden x Eucalyptus urophylla S. T.**
- Blake**. 2009, 137p. Tese (Doutorado em Processamento e utilização da madeira) Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, 2009.
- ARAUTERM. **Poder Calorífico Inferior**. Disponível em http://www.arauterm.com/pdf/tbl_poder_calorifico_inferior.pdf. Acesso em : 04 nov. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICAS – ABCERAM. **Informações Técnicas: Processo de Fabricação de Cerâmica Vermelha**. 2011. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/?area=45>>. Acesso em: 30 set. 2017.
- ASTM D1762-84, Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org.
- ASTM D5865-13, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.
- BACCELI JÚNIOR, G. **Avaliação do processo industrial da cerâmica vermelha na região do Seridó - RN**. 2010, 541p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2010.
- BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. **Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. IPEF n.16, p.63-70, 1978. Disponível em: < <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr16/cap05.pdf> > Acesso em: 29 set. 2017.
- BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J.C. A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica Industrial**. São Paulo. v.5, n. 3, mai/jun. 2000. Disponível em: <http://ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n03/v5n3_5.pdf> Acesso em: 27 set. 2017.
- CALLISTER, W.D.J. **Ciência e engenharia de materiais**; uma introdução. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 785p.
- CANTO, J.L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009, 127 p. Tese (Doutorado – Doctor Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa, Minas Gerais, 2009.

CARMO, J.S. **Propriedades físicas e químicas do carvão vegetal destinado a siderurgia e metalurgia**. 1988. 40p. Monografia (Pós-graduação Lato Sensu em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 1988.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS [CEMIG]. **31º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais** – BEEMG, ano base 2015. Superintendência de Tecnologia e Alternativas Energéticas, Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008. 29p.

COUTO, L.C.; BARCELLOS, D.C. As relações água-madeira e sua influência nas suas propriedades físicas. **Biomassa & Energia**, v. 4, n. 2, p. 173-10, 2011. Disponível em: < <http://www.renabio.org.br/08-33-LCCouto-B&E-2011-PF-173-190.pdf>> Acesso em: 1 out. 2017.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Plano de ação para adequação ambiental e energética das indústrias de cerâmica vermelha no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 142p.

FEAM - Federação Estadual de Meio Ambiente; FIEMG - Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Minas Gerais, 2013. 59 pag.

GRIGOLETTI, G.C. **Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul**. 2001, 168p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Porto Alegre, 2001.

HOFFMANN, B.S. **O Ciclo Combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO₂: Uma Solução para Mitigar as Emissões de CO₂ em Termelétricas a Carvão em Larga Escala no Curto Prazo?** 2010, 128 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

JANKOWSKY, I.P.; GALINA, I.C.M. **Secagem de madeiras** – Manual Técnico. 2013. KLOCK, U. ; MUÑIZ, G.I.B.; HERNANDEZ, J.A.; ANDRADE, A.S. **Manual de Química da Madeira**. 3. ed. rev. Curitiba: Departamento de Eng. e Tec. Florestal da UFPR, 2005.

KLOCK, U. ; MUÑIZ, G.I.B.; HERNANDEZ, J.A.; ANDRADE, A.S. **Manual de Química da Madeira**. 3. ed. rev. Curitiba: Departamento de Eng. e Tec. Florestal da UFPR, 2005.

LOPES, G.A. **Uso energético de resíduos madeireiros em um polo de produção de cerâmicas vermelhas do Estado de São Paulo**. 2012, 100p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade de São Paulo – USP, Piracicaba, 2012.

MANFREDINI, C.; SATTTLER, M.A. **Estimativa da energia incorporada a materiais de cerâmica vermelha no Rio Grande do Sul**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-37, jan./mar. 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Miguel_Sattler/publication/237475036_Estimativa_da_energia_incorporada_a_materiais_de_ceramica_vermelha_no_Rio_Grande_do_Sul/links/0deec534300904a3af000000/Estimativa-da-energia-incorporada-a-materiais-de-ceramica-vermelha-no-Rio-Grande-do-Sul.pdf> Acesso em: 4 nov. 2017

MINEROPAR – Minerais do Paraná. **A preparação de argilas para a produção de telhas e blocos cerâmicos**. Curitiba: MINEROPAR, 2007. 36p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira, 2016**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017. 32p.

NICOLAU, V.P. A importância da curva de queima em fornos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**. São Paulo. v. 17, n. 2, mar/abr. 2012. Disponível em: <<http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v17n2/v17n2a05.pdf>> Acesso em: 27 de Set. 2017.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S.A.; GHOSAL, G.K. **A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels**. **Fuel**. n. 84, pag. 487- 494, 2005. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236104003072>> Acesso em: 02 out. 2017

PINHEIRO, P. C. Da C.; VIANA, E.; REZENDE, M.E.A. De; SAMPAIO, R. S. **A produção de carvão vegetal**. 2. ed.rev. e atual. Belo Horizonte: [s.n.], 2008.103p.

PONCE, R.H.; WATAI, L.T. Ministério da Indústria e do Comércio - **Manual de secagem da madeira**. Brasília: STI/IPT, 1985. 70p.

PRADO, U.S.; BRESSIANI, J.C. **Panorama da indústria cerâmica na última década**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 56., CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CERÂMICA, 1., ; BRAZILIAN SYMPOSIUM ON GLASS AND RELATED MATERIALS, 9., 2012, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Curitiba: CBC, CLAC, BSGRM. 2012. p. 3035- 3047. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2012/eventos/cbc/18423.pdf> > Acesso em: 28 set. 2017.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulosicos. **Revista da Madeira**, nº 8, pag. 100-106. 2005.

REINALDO, R.F.; REIMBRECHT, E.G.; BAZZO, E.; AZEVEDO, J.L.T. **Caracterização de depósitos de cinzas de caldeira com queima de carvão pulverizado**. In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 11., 2006 – ABCM, Curitiba, Brazil, **Anais eletrônicos...** Dec. 3-8, 2006. Disponível em: <<http://abcm.org.br/anais/encit/2006/arquivos/Heat%20Transfer/CIT06-0866.pdf> > Acesso em: 4 nov. 2017.

SANTOS, C.S. **A indústria cerâmica em Barra Bonita (SP) e suas relações com a usina hidrelétrica de Bariri: panorama e perspectiva. Dissertação.** 2003. 78p. (Mestrado em Geociências, Área de administração e política de Recursos Minerais)

SEBRAE – Serviço brasileiro de apoio as micro e pequenas empresas. **Construção Civil.** Boletim de Inteligência. São Paulo, dez. 2015.

SEBRAE - SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - **Cerâmica Vermelha:** Estudo de mercado. Brasília: Ed. SEBRAE, 2008. 41 p.

TUBINO, L.C.B.; BORBA, P. **Etapas do processo cerâmico e sua influência no produto final – massa, extrusão, secagem e queima.** Dossiê Técnico. Rio Grande do Sul: SENAI, nov. 2006.

VALE, A.T.; BRASIL, M.A.M.; CARVALHO, C.M.; VEIGA, R.A. **Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill EX-MAIDEN e *Acacia mangium* WILLD em diferentes níveis de adubação.** *Cerne*, vol. 6, n. 1, pag. 83-88. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2000. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74460110> > Acesso em: 01/10/2017.

WIECK, R.; FH, J.D.; **Extrusão em cerâmica vermelha: princípios básicos, problemas e soluções.** *Cerâmica Industrial.* São Paulo. v. 18, n. 3, mai/jun. 2013. Disponível em: <<http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v18n3/v18n3a02.pdf>> Acesso em: 26 set. 2017.

ANEXOS

ANEXO I – QUESTIONÁRIO UTILIZADO NA PESQUISA JUNTO À CERÂMICA

1. Informações legais

- a) Nome da Empresa:
- b) Endereço:
- c) Cidade:
- d) Nome e função de quem respondeu à pesquisa:
- e) Capacidade de produção da indústria:

2. Informações sobre o combustível utilizado

- a) Quantidade de serragem utilizada:
- b) Preço médio da biomassa colocada na indústria:
- c) Tipo de fornecedor:
 - () Direto do produtor
 - () Atravessador
 - () Outros (especificar)
- d) A características da biomassa se alteram ao longo do ano quanto à:
 - () Umidade
 - () Granulometria
 - () Composição
 - () Outros (especificar)
- e) Executa algum tipo de pré tratamento da biomassa antes de queimá-la?
 - () Secagem
 - () Peneiramento
 - () Picagem ou moagem
 - () Revolvimento da pilha
 - () Outros (especificar)
- f) Condições de armazenamento da pilha de biomassa:
 - () Galpão coberto
 - () A céu aberto
- g) Tempo médio de consumo de uma pilha de biomassa:
 - () em dias

h) Forma de consumo da pilha de biomassa:

Utiliza toda a pilha antes de misturar material recém chegado

Mistura material recém chegado na pilha em utilização

i) Forma de alimentação dos fornos com biomassa:

Manual

Com esteira

j) Temperatura máxima exigida no processo:

°C - Parte superior do forno

°C - Parte inferior do forno

°C - Temperatura única do forno