

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO**

Douglas Bruno Ferreira de Souza Mesquita

**MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM FORNO CERÂMICO POR
MEIO DA SECAGEM DO COMBUSTÍVEL**

Campos dos Goytacazes/ RJ

2022

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO**

DOUGLAS BRUNO FERREIRA DE SOUZA MESQUITA

**MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM FORNO CERÂMICO POR MEIO
DA SECAGEM DO COMBUSTÍVEL**

Cristine Nunes Ferreira
(Orientadora)

Alline Sardinha Cordeiro Morais
(Coorientadora)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção de título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

Campos dos Goytacazes/ RJ
2022

Biblioteca Anton Dakitsch
CIP - Catalogação na Publicação

M582m Mesquita, Douglas Bruno Ferreira de Souza
Melhoria da eficiência energética de um forno cerâmico por meio da
secagem do combustível / Douglas Bruno Ferreira de Souza Mesquita -
2022.
123 f.: il. color.

Orientadora: Cristine Nunes Ferreira
Coorientadora: Alline Sardinha Cordeiro Morais

Dissertação (mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado
Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos
Goytacazes, RJ, 2022.
Referências: f. 101 a 110.

1. Consumo de combustível. 2. Custo operacional. 3. Combustão. 4.
Energia térmica. I. Ferreira, Cristine Nunes, orient. II. Morais, Alline
Sardinha Cordeiro, coorient. III. Melhoria da eficiência energética de um
forno cerâmico por meio da secagem do combustível.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
FLUMINENSE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO

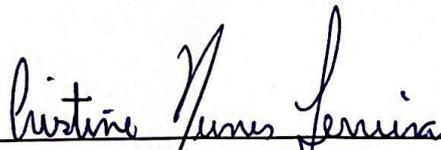
Douglas Bruno Ferreira de Souza Mesquita

MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM FORNO CERÂMICO POR MEIO
DA SECAGEM DO COMBUSTÍVEL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

Aprovado em 28 de setembro de 2022.

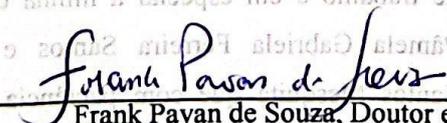
Banca Examinadora:



Cristine Nunes Ferreira, Doutora em Física
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense
(Orientadora)



Alline Sardinha Cordeiro Morais, Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense
(Coorientadora)



Frank Pavan de Souza, Doutor em Engenharia Civil
Universidade Cândido Mendes

Dedico este trabalho aos meus amigos, familiares, colegas de trabalho e em especial a minha companheira e filha Pâmela Gabriela Ferreira Santos e Monique Ferreira Santos Mesquita que com paciência entenderam minha ausência em momentos importantes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora e coorientadora Cristine Nunes Ferreira e Alline Sardinha Cordeiro Morais pelo direcionamento e orientação ao longo do trabalho.

Ao proprietário da Arte Cerâmica Sardinha Rodolfo Azevedo Gama pela hospitalidade e confiança.

Aos professores do Instituto Federal Fluminense pelos ensinamentos.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”. (Isaac Newton)

RESUMO

Os processos de fabricação de produtos cerâmicos exigem o emprego de altas temperaturas no interior dos fornos durante sua queima. Os gastos com combustíveis para geração de energia térmica compõem o segundo maior custo do processo produtivo na indústria de cerâmica vermelha. O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o processo de consumo de combustível dos fornos com o intuito de encontrar oportunidades de melhorias no processo de combustão visando a redução do consumo de lenha e consequentemente redução do custo operacional do forno cerâmico. O método utilizado na condução deste trabalho consiste em três etapas. Revisão bibliográfica para seleção de trabalhos relacionados que proporcionem embasamento para avaliação do processo de queima de combustíveis sólidos vegetais, experimentos laboratoriais para analisar os materiais utilizados na prática, e posteriormente, cálculos de estimativas financeiras de redução de custos operacionais dos fornos. Concluiu-se que, a biomassa utilizada como combustível para os fornos possui alto teor de umidade que compromete a eficiência do processo de queima. A secagem prévia e adequada da lenha proporcionou redução no consumo deste insumo e consequentemente economia financeira para a companhia. A secagem adequada traz grandes benefícios econômicos, energéticos, ambientais e possibilita melhoria na qualidade do produto final da cerâmica.

Palavras-chave: consumo de combustível, custo operacional, combustão, energia térmica.

ABSTRACT

The manufacturing processes of ceramic products require the use of high temperatures inside the kilns during their firing. Expenses with fuels for generating thermal energy make up the second highest cost of the production process in the red ceramic industry. The general objective of this research is to evaluate the process of fuel consumption of the kilns in order to find opportunities for improvements in the combustion process in order to reduce the consumption of firewood and consequently reduce the operating cost of the ceramic kiln. The method used in conducting this work consists of three steps. Bibliographic review for the selection of related works that provide a basis for evaluating the process of burning solid vegetable fuels, laboratory experiments to analyze the materials used in practice, and later, calculations of financial estimates for the reduction of operating costs of the ovens. In the end, it was possible to conclude that the biomass used as fuel for the ovens has a high moisture content that compromises the efficiency of the burning process. The prior and adequate drying of firewood provided a reduction in the consumption of this input and consequently financial savings for the company. Proper drying brings great economic, energy and environmental benefits and enables an improvement in the quality of the final ceramic product.

Key-words: fuel consumption, operating cost, combustion, thermal energy.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABESCO	Associação Brasileira das Empresas de Conservação de Energia
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
CE	Custo da Energia
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
C0	Termopar Superior Direito
C3	Termopar Superior Esquerdo
DB	Densidade Básica
DE	Densidade Energética
EMC	Teor de umidade de equilíbrio
FE	Fator de Empilhamento
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MC	Moisture Content (Teor de Umidade)
m_i	Massa Inicial
m_s	Massa Final
M1	Termopar Intermediário Direito
M2	Termopar Intermediário Esquerdo
M4	Termopar Inferior
NBR	Norma Brasileira
P	Pressão Parcial de Vapor
PC	Poder Calorífico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
P₀	Pressão de Vapor Saturado
PSF	Ponto de Saturação de Fibras
RCC	Rede Campos Cerâmica
RH	Fator de Umidade Relativa do Ar
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio s Micro e Pequenas Empresas
T9	Termopar Superior

U	Teor de Umidade
U_{Amb}	Umidade Relativa do Ambiente
U_{Eq}	Umidade de Equilíbrio
U_m	Teor de Umidade Médio
w_m	Massa da Madeira Molhada
w₀	Massa da Madeira Seca
Θ	Teor de Umidade

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produtos cerâmicos mais comercializados no Brasil.....	26
Figura 2 - Processo produtivo de fabricação da cerâmica vermelha.....	29
Figura 3 - Município de Campos dos Goytacazes – RJ	32
Figura 4 - Forno intermitente tipo abóboda.....	36
Figura 5 - Forno Hoffmann	38
Figura 6 - Forno túnel.....	39
Figura 7 - Curva de queima de forno tipo abóboda.....	42
Figura 8 - Densidade básica x Método do máximo teor de umidade	44
Figura 9 - Poder calorífico x umidade da madeira (Eucalipto Benthamii).....	47
Figura 10 - Secagem da madeira ao ar livre	53
Figura 11 - Secagem da madeira em estufa.....	54
Figura 12 - Etapas da metodologia.....	57
Figura 13 - Diagrama de Veen para as <i>strings</i> de busca	61
Figura 14 - Pátio de armazenagem da madeira	62
Figura 15 - Suportes de toras para controle de quantidade de madeira queimada	63
Figura 16 – Forno abóboda.....	64
Figura 17 - Fornalhas	65
Figura 18 - Posicionamento dos termopares instalados no forno em estudo	65
Figura 19 - Toras de Amostragem.....	66
Figura 20 - Esquema para extração dos copos de prova (NBR 7190).....	67
Figura 21 - Esquema para extração dos copos de prova (NBR 7190).....	68
Figura 22 - Dimensões dos copos de prova.....	68
Figura 23 - Extração dos copos de prova	69
Figura 24 - Lixamento e embalagem dos corpos de prova.....	69
Figura 25 - Pesagem dos corpos de prova úmidos	70
Figura 26 - Secagem dos corpos de prova.....	70
Figura 27 - Pesagem dos corpos de prova após 6 horas de secagem	71
Figura 28 - Pesagem dos corpos de prova após 12 horas de secagem	71
Figura 29 - Pesagem dos corpos de prova após 18 horas de secagem	72
Figura 30 - Pesagem dos corpos de prova após 24 horas de secagem	72
Figura 31 - Pesagem dos corpos de prova após 30 horas de secagem	73
Figura 32 - Curva de temperatura do forno abóboda	92

Figura 33 - Densidade energética x Teor de umidade	94
Figura 34 - Custo da energia (R\$) x Umidade (%)	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fases da queima da madeira	51
Quadro 2 - Classificação da madeira em relação ao teor de umidade.....	74
Quadro 3 - Pesagem dos corpos de prova antes da secagem	78
Quadro 4 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 6 horas de secagem.....	79
Quadro 5 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 12 horas de secagem.....	80
Quadro 6 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 18 horas de secagem.....	81
Quadro 7 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 24 horas de secagem.....	82
Quadro 8 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 30 horas de secagem.....	83
Quadro 9 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 6 horas de secagem.....	85
Quadro 10 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 12 horas de secagem.....	86
Quadro 11 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 18 horas de secagem.....	86
Quadro 12 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 24 horas de secagem.....	87
Quadro 13 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 30 horas de secagem.....	87
Quadro 14 - Dados da última queima realizada na Arte Cerâmica Sardinha.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre o número total de empresas e produtos cerâmicos	30
Tabela 2 - Temperatura de reações	41
Tabela 3 - Densidade básica x Poder calorífica das espécies de Eucalipto	94

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Teor de umidade na base seca.....	44
Equação 2 - Fator de umidade relativa.....	44
Equação 3 - Teor de umidade na base seca.....	75
Equação 4 - Teor de umidade na base úmida.....	75
Equação 5 – Teor de umidade médio do lote.....	75
Equação 6 - Densidade energética.....	76
Equação 7 – Custo da energia.....	76
Equação 8 - Poder calorífico da espécie eucalipto benhtamii.....	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Contextualização	19
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos	22
1.3 Justificativa	22
2 REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1 Indústria cerâmica	24
2.1.1 Cerâmica vermelha	26
2.1.2 Processo produtivo da cerâmica vermelha	27
2.1.3 Indústria cerâmica no Brasil	30
2.1.4 Polo cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ	31
2.2 Fornos cerâmicos	34
2.3 Processo de queima	40
2.4 Teor de umidade	43
2.4.1 Teor de umidade x poder calorífico	46
2.5 Madeira	47
2.5.1 <i>Eucalypto urograndis</i>	49
2.5.2 Processo de queima de madeira	49
2.5.3 Tipos de secagem da madeira	52
3 METODOLOGIA	55
3.1 Classificação da pesquisa	55
3.2 Etapas do procedimento metodológico	56
3.2.1 Revisão de literatura	57
3.2.1.1 Objetivos de pesquisa	57
3.2.1.2 Definição dos temas-chave	58
3.2.1.3 Definição das <i>Strings</i> de busca	58
3.2.1.4 Aplicação do método de pesquisa	59
3.2.2 Definição do objeto de pesquisa	62
3.2.3 Levantamento de dados dos fornos	63
3.2.4 Levantamento de dados da madeira utilizada na queima	66
3.2.4.1 Corpos de prova	67

3.2.5 Processo de secagem da madeira _____	69
3.2.5.1 Levantamento de dados do forno utilizado para secagem da madeira _____	73
3.2.6 Teor de umidade _____	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES _____	77
4.1 Análise dos dados obtidos após secagem dos corpos de prova _____	77
4.2 Análise dos dados obtidos no forno cerâmico _____	89
4.3 Análise da influência do teor de umidade na densidade energética e no custo da energia _____	93
5 CONCLUSÃO _____	97
REFERÊNCIAS _____	100
APÊNDICE A _____	110

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A indústria cerâmica é conhecida por ser caracterizada por processos que necessitam de um alto consumo de energia térmica. O forno cerâmico, em particular, é o principal componente, que emprega uma grande quantidade de energia. Regulamentações para o consumo de energia exigem um projeto mais preciso do forno para limitar o uso seja ele de combustível ou de eletricidade (GABALDÓN-ESTEVAN *et al.*, 2016).

No Brasil os gastos com a energia representam 30% dos custos na produção do segmento cerâmico, esses dados impulsionam as indústrias a buscarem alternativas para uma melhor eficiência energética visando a redução de custos. Toda a cadeia produtiva do país gira em torno da utilização da energia, seja ela elétrica, térmica, mecânica, dentre outras. Porém, hoje existe um sistema ineficiente quanto ao uso desta energia, com programas de eficiência energética que contemplam apenas uma pequena parte da matriz energética nacional (SEBASTIÃO; FERNANDES; NANDI, 2013).

Segundo pesquisa realizada pela Associação Brasileira das Empresas de Conservação de Energia (ABESCO) entre 2015 e 2017 o Brasil teve um desperdício energético de aproximadamente R\$ 62 bilhões, sendo assim, o desperdício energético no país chega a R\$ 15 bilhões ano, aproximadamente (ABESCO, 2017). Projetos de energia eficiente proporcionam um uso mais inteligente do recurso, preservam o meio ambiente e favorecem a sustentabilidade dos ciclos que mais consomem energia.

Dados levantados em 13 setores industriais apontam que 82% das oportunidades de economia de energia na indústria estão em processos térmicos, porém o foco governamental está relacionado ao consumo de energia elétrica. Isso mostra que existe uma deficiência quanto às prioridades nos programas governamentais de eficiência energética. As indústrias respondem por 35,7% de toda energia consumida no país, enquanto os setores residenciais, comercial e público respondem por apenas 14% do consumo total e o restante dividido em outros setores (SEBASTIÃO *et al.*, 2013).

Atualmente o setor cerâmico vem se destacando no cenário produtivo nacional, pois segundo dados apresentados pela Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (ANFACER), em 2021 foram produzidos 1048 milhões de m², consolidando o Brasil como terceiro maior produtor mundial, segundo maior consumidor e sétimo maior exportador mundial de produtos cerâmicos (ANFACER, 2022).

Alguns processos térmicos industriais requerem uma demanda energética significativa e geralmente estão associados a perdas de calor consideráveis. A implementação de medidas inovadoras para a melhoria da eficiência energética revela-se como um campo de investigação para atingir não só a redução no consumo de energia, mas também a redução da emissão de CO₂. Peng *et al.*, (2012) em seu estudo identificaram os processos de queima e secagem como os principais responsáveis pelas emissões de gás carbônico (CO₂) na indústria cerâmica, uma vez que, são adotados principalmente combustíveis fósseis para alimentá-los. Seguindo esta perspectiva, a adoção de uma gestão energética consistente, além de práticas relacionadas a promoção de ecoeficiência e uso de combustíveis alternativos oriundos de fontes renováveis são relevantes para melhorar a eficiência energética e promover a sustentabilidade na indústria (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Sebastião, Fernandes e Nandi (2013) ponderam que um fator que merece destaque está relacionado ao elevado custo para produção de produtos cerâmicos, sendo o processo de queima, um dos mais caros, onde a baixa eficiência dos queimadores, aliados ao alto teor de umidade presente na madeira, afetam diretamente a qualidade final dos produtos e o consumo de combustível para geração de energia térmica.

Neste estudo será dado enfoque ao setor de cerâmica vermelha devido à sua importância no polo ceramista da cidade de Campos dos Goytacazes, situado no norte do estado do Rio de Janeiro. A Arte Cerâmica Sardinha, indústria alvo deste estudo, localizada no distrito de São Sebastião de Campos, contém em sua estrutura quatro fornos do tipo abóboda, que consomem cerca de 39 m³ de madeira por queima, totalizando cerca de 1872 m³ de madeira consumidos anualmente.

Levando-se em consideração o elevado gasto de madeira pela companhia, o presente estudo busca avaliar a redução do consumo de biomassa através da secagem da mesma. Sabe-se que atualmente em seu processo produtivo a armazenagem da madeira é feita em um pátio a céu aberto sem um processo controlado de pré-secagem, acarretando a baixa eficiência de queima.

A madeira é um biocompósito natural que possui uma estrutura hierárquica complexa composta principalmente por celulose, hemicelulose e matriz de lignina. Esses polímeros constituem tipos distintos de células de diferentes tamanhos e escalas de comprimento. A umidade pode existir dentro desses tipos de células em duas formas básicas que são água líquida situada na luz da célula e cavidades celulares chamadas água livre e água ligada dissolvida ou absorvida dentro das paredes das células higroscópicas (XU *et al.*, 2017).

O teor de umidade presente nos biocombustíveis pode ser considerado como um parâmetro importante de medida para se otimizar sua combustão. Os biocombustíveis como madeira, lenha e serragem variam em teor de umidade e tem sido um grande problema medir este parâmetro com precisão. Pode-se dizer que o teor de umidade afeta o processo de combustão e, parte da energia gerada é gasta para evaporar a água proveniente da umidade no biocombustível, já que a água não participa da reação química de combustão, apenas absorve energia à medida que evapora. Por este motivo, plantas industriais conduzem o gás de combustão para a secagem do combustível (NYSTRÖM; DAHLQUIST, 2004).

O teor de umidade é inversamente proporcional à densidade da madeira, ou seja, quanto maior a quantidade de água, menor a quantidade de outros elementos químicos da madeira/ celulose, hemicelulose e lignina. Sendo assim, a densidade é um importante parâmetro para avaliação da qualidade da madeira. No entanto, tal variável é muito complexa e resulta de inúmeros fatores tais como dimensão das fibras, espessura da parede celular, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira do cerne e alborno e arranjo dos elementos anatômicos (SILVEIRA; REZENDE; VALE, 2013).

Um dos problemas relacionados ao teor de umidade presente na biomassa é que a temperatura de chama durante sua queima decresce com o aumento do teor de umidade do combustível. Ao jogar combustível com alta umidade no queimador pode ocasionar uma alteração súbita da temperatura surgindo uma área de combustão incompleta que acarretará concentrações elevadas de CO nos gases de combustão (NYSTRÖM; DAHLQUIST, 2004).

Estudos sobre a utilização da madeira como combustível mostram que a combustão direta da madeira é o processo mais simples e econômico para se obter energia. Tal fato pode ser confirmado, pela ampla utilização deste biocombustível nas indústrias cerâmicas. No entanto, o rendimento energético de um processo de combustão da madeira depende, sobretudo, da sua composição química, onde os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais variam de acordo com a espécie da madeira utilizada no processo de queima (QUIRINO; ABREU, 2005).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o processo de geração de energia térmica dos fornos cerâmicos em busca de melhorias no processo de queima, com o intuito de reduzir do consumo de combustível e

consequentemente diminuir o custo operacional da produção da cerâmica vermelha através da secagem da madeira.

1.2.2 Objetivos específicos

Diante do objetivo principal, tem-se como objetivos específicos:

- Avaliar o teor de umidade presente na madeira da forma que é extraída e armazenada;
- Calcular o ganho densidade energética da lenha através da sua secagem;
- Estimar a redução de custo com consumo de lenha aplicando a secagem.
- Identificar os métodos de secagem da biomassa de acordo com a literatura científica;

1.3 Justificativa

O aumento da competitividade entre as empresas cerâmicas no Brasil e a necessidade de atualização dos processos produtivos, em muitas indústrias ainda artesanais, como na Arte Cerâmica Sardinha, alvo deste estudo, demanda a este segmento a adoção de novas tecnologias e equipamentos a fim de propiciar melhorias técnicas e econômicas ao processo. No entanto, o baixo valor agregado dos produtos desestimula investimentos em equipamentos, tecnologias e qualificação de mão de obra, uma vez que, custos com melhorias, em muitos casos, sobrepõem os lucros proporcionados por elas. Sendo assim, vê-se cada vez mais necessário utilizar soluções eficientes e de baixo custo que sejam capazes de trazer benefícios técnicos e financeiros ao setor (ROCHA; PALMA, 2012).

A utilização da biomassa como fonte de energia tem aumentado consideravelmente nos últimos anos e tal fato está diretamente relacionado a uma redução no emprego dos combustíveis fósseis, que favorecem a utilização dos recursos de cada região, contribuindo para a diminuição do impacto no clima e no meio ambiente (MAKSIMUK *et al.*, 2021). Estima-se que até 2050 a bioenergia forneça 30% da energia demandada no mundo (GUO; SONG; BUHAIN, 2015), neste contexto, evidencia-se a importância da madeira, por ser um produto renovável e mais acessível que as outras fontes de matéria-prima, como os combustíveis fósseis e outros materiais de construção (ferro, aço e alumínio) (CIRILO *et al.*, 2021).

O gasto com insumos para geração de energia térmica compõe o segundo maior custo na indústria de cerâmica vermelha, ficando aquém apenas da mão-de-obra. Os fornos

cerâmicos requerem grande quantidade de combustíveis para geração de energia térmica durante a queima dos produtos cerâmicos, visto que o interior dos fornos cerâmicos deve alcançar temperaturas elevadas.

A Arte Cerâmica Sardinha, utiliza predominantemente o *Eucalypto urograndis*, como combustível em seus fornos cerâmicos e, tem um gasto de aproximadamente, R\$ 3.315,00 por queima, variando de acordo com o alto teor de umidade presente na mesma e condições de operação dos fornos. Sendo assim, justifica-se a realização deste estudo, uma vez que, o processo prévio de secagem aumenta o potencial térmico destes biocombustíveis e consequentemente melhora a eficiência da combustão nos queimadores dos fornos, gerando assim, redução de custo com estes insumos.

Diferentes trabalhos, tais como de Nasseti (2010), Sebastião, Fernandes e Nandi (2013), Mezquita *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2020), buscaram proporcionar em seus estudos melhorias no processo de queima da indústria cerâmica, no entanto, não foram encontradas pesquisas com enfoque na secagem da madeira visando a melhoria da eficiência energética dos fornos, sendo este o objeto de estudo da presente pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, foram abordados os conceitos teóricos de suporte ao entendimento da problemática assumida neste estudo. Foi realizada uma pesquisa sistemática, fundamentada em trabalhos, pesquisas científicas e livros, abordando tópicos relacionados à indústria cerâmica, processo produtivo cerâmico, teor de umidade presente na madeira e métodos de secagem da biomassa. A metodologia utilizada para tal pesquisa será apresentada no capítulo seguinte.

2.1 Indústria cerâmica

Os materiais de construção mecânica sólidos são classificados em três grupos: metálicos, cerâmicos e poliméricos, de acordo com a organização atômica e, principalmente, com as propriedades químico-físicas geradas na produção de cada grupo de material. Por seus estados de matéria encontrar-se com arranjos atômicos próximos, a estruturação física destes materiais é firme, rígida e mostra significativa autodefinição estrutural (SILVA; MAIA, 2016).

No decorrer do curso evolutivo humano, a "tecnologia" era inicialmente limitada apenas na formação e modelagem de materiais naturais existentes. A produção de novos materiais como a cerâmica apresenta-se como a primeira revolução tecnológica na história da humanidade que ocorreu há 9000 anos. Foi resultado da combinação de duas experiências: a pirotecnia para queima de calcário e a modelagem de argila crua. Com a utilização deliberada de alta temperatura e aquecimento de longa duração, foi possível alterar as propriedades físico-químicas da argila bruta e, portanto, produzir um novo material resistente e durável, a cerâmica (MANIATIS, 2009).

O termo cerâmica originou-se da palavra grega "*keramos*", que significa "terra queimada" e é utilizado para designar materiais inorgânicos e não metálicos, feitos da mistura de matérias primas que são esmagadas em pó, moldadas por prensagem e calcinadas em alta temperatura (até 1250° C) para formar uma cerâmica (TURHAN; ARIKAN; DEMIREL, 2011). Neste sentido, define-se matéria prima cerâmica como uma matéria principal, com propriedades que após transformações térmicas, dão origem ao material cerâmico (FERRAZ *et al.*, 2012). Os materiais mais importantes que se enquadram nesta categoria, até os últimos cinquenta anos eram conhecidos como cerâmicas tradicionais, sendo a argila sua principal matéria prima (CALLISTER, 2002).

De modo geral, materiais cerâmicos se compõem por elementos metálicos e também não metálicos, logo, fisicamente, comportam-se como maus condutores de eletricidade e calor, sendo amplamente duros, frágeis e quebradiços. E além disto, mostram-se mais resistentes a altas temperaturas e a ambientes agressivos do que metais e os polímeros (SILVA; MAIA, 2016).

A utilização dos materiais cerâmicos vai desde utensílios gerais básicos e tradicionais da realidade humana como louças, porcelanas, tijolos, telhas, azulejos, vidros e espelhos a componentes protetivos como cerâmicas de alta temperatura para estufas, refratários e até aplicações na indústria aeroespacial. Conseqüentemente, sua aplicação socioambiental é diversa. Várias são as estruturas e insumos que recaem sob as características das cerâmicas. Sua composição principal é argila, como composto terroso/fino e água, que fomenta a plasticidade inicial para moldar o produto pretendido. Tem-se, ainda, como componentes esporádicos, cimento, óxidos, nitretos e carbetos e componentes minerais rochosos como, por exemplo, quartzo, feldspato, caulim, talco, dolomita, carbonato de cálcio e bentonita (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

A argila é uma matéria prima amplamente utilizada em uma série de produtos cerâmicos, as razões para isto são: a) apresenta plasticidade; b) apresenta resistência mecânica após queima adequada para uma série de aplicações; c) possibilita a aplicação de técnicas de processamento simples; e d) está disponível em grandes quantidades (VIEIRA; HOLANDA; PINATTI, 2000).

De acordo com Padilha (2007) a argila foi o primeiro material inorgânico a adquirir propriedades completamente novas como resultado de uma operação intencional realizada por seres humanos. Uma das propriedades que as argilas apresentam é o favorecimento de inertização de resíduos. Outra vantagem é que o processo térmico potencializa reações químicas entre resíduos incorporados na argila e os demais componentes de massa (ALMEIDA; FRANCO; TAVARES, 2015).

O setor cerâmico é muito abrangente e heterogêneo, sendo dividido em subsetores segundo inúmeros fatores, tais como, matérias primas, propriedades e áreas de utilização. Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM), em geral, a seguinte classificação pode ser empregada: cerâmica vermelha, placa cerâmica, cerâmica branca, materiais refratários, isolantes térmicos, fritas e corantes, abrasivos, vidro, cimento e cal e, ainda cerâmica avançada (ABCERAM, 2022). Dentre estas classificações a cerâmica vermelha, é o objeto de estudo desta pesquisa devido a sua importância no cenário nacional e regional.

2.1.1 Cerâmica vermelha

A argila cerâmica está associada à história da humanidade, sendo um dos primeiros materiais a ser utilizado na produção de utensílios essenciais de uso diário. Argilas comuns são utilizadas na produção industrial de materiais de construção e artesanal de olaria e terracota, e normalmente apresentam uma tonalidade avermelhada, resultando na cerâmica de “barro vermelho”, diferenciando-se das argilas especiais que cozem tendenciosamente com um tom claro (FERRAZ *et al.*, 2012). Apresenta a nomenclatura “vermelha” em função da presença de compostos ferrosos que manifestam coloração avermelhada ao produto final (SEBRAE, 2015). Na Figura 1, observa-se os produtos cerâmicos mais comercializados no Brasil.



Figura 1 - Produtos cerâmicos mais comercializados no Brasil

Fonte: Sebrae (2015).

A indústria cerâmica vermelha tem como principal produto os tijolos cerâmicos, sendo que os tijolos com as dimensões 09 x 19 x 19 cm são a dimensão padrão de todo o segmento de produção. As telhas e tubos de saneamento básico conhecidos como tubos de argila também são produzidos por este setor, que busca constantemente alternativas para manter os negócios (ANICER, 2021).

As argilas utilizadas na cerâmica vermelha apresentam granulometria muito fina, característica esta que lhes conferem, com a matéria inorgânica incorporada, diferentes graus de plasticidade quando adicionada determinadas porcentagens de água, além da resistência a seco (CABRAL JÚNIOR *et al.*, 2008).

2.1.2 Processo produtivo da cerâmica vermelha

A indústria da cerâmica vermelha é responsável pela transformação da argila através de um processo industrial específico que lhe dá forma e resistência mecânica, bem como baixa absorção de água (SILVA; MÉXAS; QUELHAS, 2017). Caracteriza-se por duas etapas distintas: a primária (que envolve exploração e transporte de matéria-prima, a argila) e a transformação (para elaboração do produto final). Independente destas fases serem ou não executadas pela mesma empresa, estão diretamente relacionadas e interferem no desempenho da cadeia produtiva (IDROGO; BEZERRA; ACUNÃ, 2019).

O processo produtivo de cerâmica vermelha é padronizado em todas as empresas brasileiras, alterando somente as tecnologias utilizadas pelas mesmas. Segundo Normey-Rico, Müller e Bristol (2003) o processo de fabricação dos produtos cerâmicos tradicionais, tais como, tijolos, telhas, porcelanas e azulejos, desenvolvem-se normalmente em fases sucessivas, começando com a seleção de matérias primas que devem formar parte da composição de partida (argilas, caulins, feldspatos, quartzos e carbonatos), prosseguindo para cada fase de refinamento e preparação da matéria prima.

A argila, matéria prima utilizada para produção de artefatos cerâmicos é encontrada de forma abundante na natureza. É extraída com o auxílio de retroescavadeiras e transportadas até as cerâmicas em caminhões, com o intuito de assegurar o abastecimento da cerâmica e garantir um bom funcionamento da produção a argila é descarregada e armazenada a céu aberto, próximo à linha de produção (GALASSI; TAVARES, 2013).

A preparação é a fase na qual ocorre a umidificação, que nada mais é do que uma mistura que é realizada entre a massa e uma quantidade de água que é utilizada para facilitar a homogeneização, deixando a argila mais maleável, projeto bastante realizado na comercialização industrial (BARBOSA; COSTA; SANTOS, 2016).

Posteriormente ocorre o processo de moagem, realizado para quebrar a argila em partes menores para que os grãos estejam homogêneos e compatíveis com o caixão alimentador (NATREB, 2020). A moagem é o procedimento no qual um produto é submetido a trituração com o objetivo de diminuir o tamanho de suas partículas. É a primeira etapa produtiva industrial da formação do componente cerâmico. Previamente a moagem ocorre também a extração do barro ou argila os quais cada cerâmica requer uma modalidade específica, de acordo com sua produção, fundamento e característica de uso (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006). Nesta etapa ocorre as análises de composição granulométrica, teor de argila, teor de umidade e pureza, que influenciam na caracterização final do produto

(FERRAZ *et al.*, 2012). Já na fase de desintegração ocorre a trituração dos torrões provenientes do processo de alimentação, e em seguida, a argila é misturada com água formando o “traço” ideal para produção de tijolos cerâmicos (NATREB, 2020).

A matéria prima se caracteriza entre as etapas de laminação e extrusão, uma vez que, durante este intervalo a massa receberá dosagens diferentes conforme o produto que será produzido (ARAGÃO; CHÁVEZ; SALES, 2010). Na extrusora a argila é forçada por bocal, a fim de que este defina continuamente a seção transversal da mesma. Sendo assim, dá-se origem a uma peça contínua a ser cortada, ainda úmida, no comprimento desejado. As telhas são as únicas peças que passam pelo processo de prensagem. Os blocos cortados na etapa de extrusão seguem em uma esteira até a prensa onde adquirem o formato de telha (SILVA; MAIA, 2016).

A próxima etapa é a secagem e tem como finalidade eliminar parte da umidade dos produtos. Este processo ocorre de forma lenta e pode ser feito ao natural ou por equipamentos chamados secadores, intermitentes ou contínuos, que alcançam temperaturas de 50°C até 150°C (ABCERAM, 2022). Segundo Coutinho (2006) é uma etapa importante na fabricação de cerâmica vermelha e consiste basicamente no transporte de líquido de um sólido poroso para a fase gasosa insaturada. O autor pondera que por ser uma etapa crítica na fabricação de produtos de cerâmica vermelha, a secagem deve ocorrer de forma criteriosa. Geralmente, a secagem de produtos cerâmicos ocorre em duas etapas: na primeira vaporiza-se a água concentrada na superfície e na segunda, a água que está situada no interior dos poros e nos interstícios dos grãos chega à superfície da peça em forma de vapor (SANTOS, 2001).

Após a secagem, as peças são transportadas para os fornos específicos de cada produto, em temperaturas sempre entre 750 e 900° C (ARAGÃO; CHÁVEZ; SALES, 2010). Os fornos geralmente utilizados na indústria cerâmica vermelha são classificados em três grupos de acordo com o ciclo de operação: fornos intermitentes (Abóbada, Paulistinha e Plataforma); fornos semi-contínuos (Hoffmann) e fornos contínuos (Túnel) (COUTINHO, 2006).

Santos (2001) pondera que a queima é a principal etapa do processo produtivo de cerâmicas vermelhas e, se for bem conduzida, dará origem a peças com baixa quantidade de defeitos. Durante esta etapa, os produtos cerâmicos são submetidos a tratamento térmico e sofrem inúmeras reações e transformações físico-químicas que alteram suas propriedades mecânicas.

Na retirada dos produtos dos fornos, os mesmos são inspecionados e posteriormente transportados para o estoque. Dessa maneira, os produtos ficam armazenados até que sejam

expedidos (ARAGÃO; CHÁVEZ; SALES, 2010). O fluxograma a seguir ilustra as etapas do processo de fabricação da cerâmica vermelha.

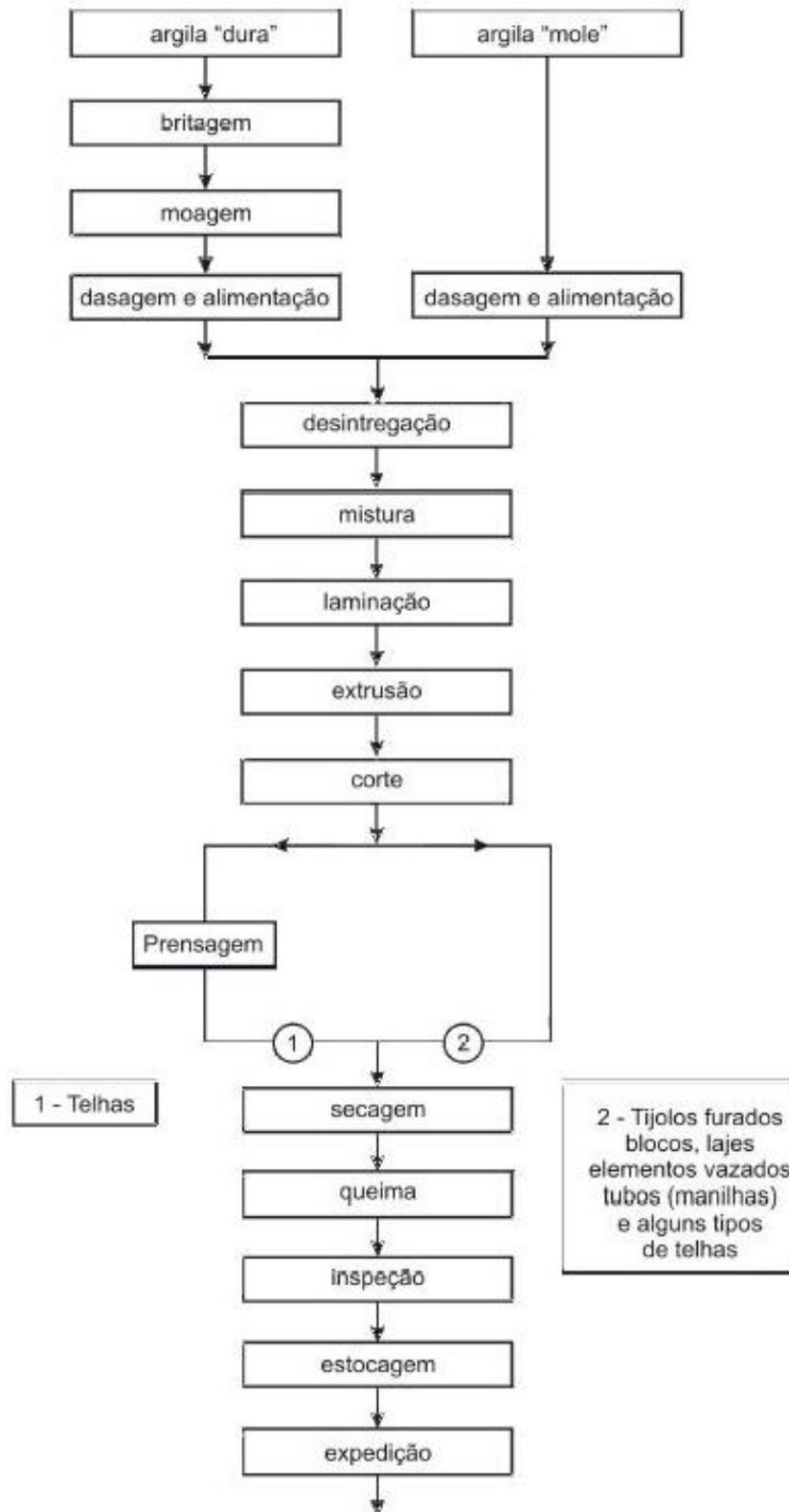


Figura 2- Processo produtivo de fabricação da cerâmica vermelha

Fonte: ABCERAM (2021).

2.1.3 Indústria cerâmica no Brasil

A indústria cerâmica é uma importante atividade econômica para o Brasil e apresenta uma produção rudimentar e prejudicial ao meio ambiente. Apesar da grande variedade de produtos que podem ser fabricados a partir da cerâmica, a produção é praticamente a mesma em todas as regiões brasileiras, sendo: preparação para mistura, moldagem, secagem e processamento térmico (queima) no forno (ABRAHÃO; CARVALHO, 2017).

No Brasil, o desenvolvimento do setor de cerâmica vermelha foi impulsionado a partir da década de sessenta, através da implementação de políticas públicas habitacionais, por meio da criação do Sistema Financeiro da Habitação e do Banco Nacional da Habitação. Após a década de setenta, sustentada por uma demanda contínua, ocorre a modernização e expansão da indústria cerâmica nacional. No decorrer da ampliação do setor, houve incorporação de processos inovadores e o lançamento de novos produtos, tendo-se por extensão o crescimento e a diversificação da produção de minerais para a indústria cerâmica brasileira (CABRAL JÚNIOR *et al.*, 2008).

A indústria de cerâmica vermelha compreende materiais empregados na construção civil e alguns de uso doméstico e afins. Encontra-se em todo o território nacional segundo dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), variando entre fábricas de pequeno, médio e grande porte. Do número total de aproximadamente 6903 fábricas de cerâmicas, 4346 fábricas produzem tijolos cerâmicos, 2547 produzem telhas e 10 produzem tubos de argila para saneamento básico, sendo, a produção mensal estimada de quatro bilhões de unidades de tijolos cerâmicos, um bilhão e trezentas mil unidades de telhas e 325,5 km de tubos de argila (ANICER, 2022), conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre o número total de empresas e produtos cerâmicos

	Nº aproximado de empresas	% aproximado por área	Prod./Mês (nº de peças)	Consumo – Ton/Mês (Matéria prima: argila)
Tijolos	4346	63%	4.000.000.000	7.800.000
Telhas	2547	36%	1.300.000.000	2.500.000
Tubos	10	0,1%	325,5 km	-

Fonte: ANICER (2022).

De acordo com a Tabela 1, 63% das empresas cerâmicas produzem tijolos, 36% produzem telhas e 0,1% produzem tubos para saneamento básico. Para atender tal demanda o

setor emprega 293 mil pessoas diretamente e cerca de 900 mil indiretamente, como um faturamento anual em torno de R\$ 18 bilhões de reais (ANICER, 2022).

Cabral Júnior *et al.* (2008) ressaltam que se trata de um setor com uma estrutura empresarial diversificada onde coexistem pequenas empresas familiares artesanais, também conhecidas como olarias, cerâmicas de pequeno e médio porte que apresentam deficiências na mecanização e gestão, e empresas de grande porte, levando-se em conta sua escala de produção. Segundo Oliveira *et al.* (2015) no Brasil há predomínio de pequenas e médias empresas familiares que utilizam processos de produção tradicionais e levam em consideração apenas a experiência, não científica. Sendo assim, há uma grande deficiência de mão de obra qualificada, mecanização e avanços tecnológicos e soluções focadas em competitividade.

Ressalta-se que com a constante evolução da mecanização e aumento da produção, além do surgimento de novas empresas e técnicas de processamento, a modernização tecnológica é fundamental para alcançarem melhor desempenho na produção de cerâmica vermelha, conquistando assim o mercado, nos termos de competitividade e produtividade. Dado o crescimento da produção ao longo dos vários anos, são as mudanças tecnológicas que favorecem o aumento da produção e vantagem competitiva (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

2.1.4 Polo cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ

O município de Campos dos Goytacazes (Figura 3), localizado no norte do estado do Rio de Janeiro, região sudeste do Brasil, destaca-se como o segundo maior parque industrial de cerâmica vermelha do país e um dos maiores da América do Sul, com mais de 100 empresas ativas que produzem predominantemente blocos e tijolos para construção civil (AZEVEDO *et al.*, 2018). Com uma área de aproximadamente 4.032,487 km², Campos possui cerca de 511.168 habitantes e é o maior município do estado (IBGE, 2021). Atualmente, a economia do município tem como destaque indústrias açucareiras e cerâmicas. A área de concentração das cerâmicas encontra-se à margem direita do Rio Paraíba do Sul, ao longo da estrada RJ-216 que liga Campos ao Farol de São Tomé no litoral (RAMOS, 2006).

região, visando a melhoria dos seus processos através do compartilhamento de informações e interrelações de compra e venda (BODART; TERRA AZEVEDO FILHO, 2012).

Um fator fundamental para o desenvolvimento da atividade cerâmica no município de Campos dos Goytacazes se dá por sua localização próximo as jazidas de argila. As argilas encontradas na região de Campos são originárias de processos de sedimentação de material sílicoargiloso da carga de suspensão do Rio Paraíba do Sul em suas cheias regulares (COUTINHO, 2006).

No polo cerâmico de Campos são encontrados, basicamente, cinco tipos de argilas constantemente exploradas para fabricação de cerâmica vermelha. Segundo Vieira; Pinheiro (2011) as argilas arenosas são denominadas de “fracas” ou “magras”, e as argilas menos arenosas são denominadas de “fortes” ou “gordas”. Para Almeida *et al.* (2010) a argila encontrada na região possui propriedades caulínicas que através da composição química se mostrou ideal para produtos da cerâmica vermelha além de obter valores exigidos dentro da norma.

O alto teor de plasticidade encontrado nas argilas de Campos dos Goytacazes faz com que se utilize uma quantidade maior de água para se chegar a uma massa uniforme, porém, com esse aumento surgem outros problemas durante o processo de fabricação das peças cerâmicas, como por exemplo, na extrusão das peças e na etapa de secagem que aumentam os riscos de defeitos e prolongamento das peças, impactando diretamente na produtividade e no consumo energético (BORLINI *et al.*, 2006).

Ramos, Alves e Alexandre (2006) ressaltam que há uma disparidade tecnológica entre as indústrias cerâmicas presentes no polo campista. A minoria detém processos produtivos atualizados (fornos túneis, secadores e outras estruturas automatizadas), enquanto a maior parte das empresas trabalham com um sistema rudimentar.

Os processos de queima utilizados para a fabricação de produtos cerâmicos, são em sua maioria, baseados na queima da madeira e óleos combustíveis acarretando algumas restrições, tais como: oscilações no poder calorífico, poluição e degradação do meio ambiente. Segundo o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2008) a atividade cerâmica deve ter uma atenção especial aos problemas ambientais ocasionados pela sua queima, resultantes da produção de cinzas, óxidos de enxofre, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio, que causam chuva ácida e danificam a camada de ozônio.

A madeira é o principal combustível utilizado pelas cerâmicas campistas (COUTINHO, 2006) e provavelmente, o mais antigo utilizado pela humanidade (MACHADO; GOMES; MELLO, 2010). No entanto, apresenta baixo poder calorífico e

elevado teor de umidade, o que impacta negativamente na qualidade das peças produzidas e eleva os custos de manejo, transporte e produção (SEBRAE, 2008).

Sabendo-se que os últimos anos foram marcados pela competitividade e constante ameaça as pequenas e médias empresas, prevê-se uma reestruturação do setor produtivo das indústrias cerâmicas campistas, uma vez que, as mesmas têm direcionado seu foco para o controle das etapas de fabricação, tais como: seleção e preparo de matérias-primas, processos de conformação, prensagem, secagem e queima.

Segundo Xavier *et al.* (2009) os materiais produzidos pelas indústrias cerâmicas de Campos apresentam alguns problemas quando expostos às condições climáticas locais. Isto ocorre nos cerâmicos sem proteção mecânica externa das paredes e em telhados com pequenas declividades. Os principais problemas observados são: alvenaria de vedação deteriorada, telhas com gotejamentos, trincas aparentes etc.

Um desafio constante enfrentado pelas cerâmicas campistas tem sido à busca constante por melhoria no processo produtivo, objetivando um aumento na qualidade final das peças e ganhos de produtividade e competitividade, tanto no mercado interno quanto no mercado externo. As dificuldades enfrentadas estão diretamente relacionadas com a falta de investimentos, tecnologias, materiais, logística etc. (RAMOS; ALVES; ALEXANDRE, 2006).

Outro desafio enfrentado pelas empresas cerâmicas de Campos dos Goytacazes é a baixa capacidade de inovação, limitando o seu desempenho empresarial. Tal contexto se faz presente em todos os domínios da inovação, que vai desde a concepção da ideia a manufatura do produto e lançamento no mercado, não descartando melhorias ou novas estratégias na estrutura organizacional. Tal deficiência é resultante de inúmeros fatores, dentre os quais se destacam: falta de profissionalização da mão de obra, falta de visão inovadora da alta gestão das empresas, baixa cooperação intraorganizacional, falta de incentivos e programas que auxiliem as indústrias a buscar e investir em inovações tecnológicas (ROCHA; PALMA, 2012).

2.2 Fornos cerâmicos

Os fornos utilizados para queima de produtos cerâmicos evoluíram junto com a necessidade de um mercado cada vez mais competitivo e exigente. Possuem tamanhos que variam de acordo com o tipo de produto fabricado e da produção desejada. Independente de suas dimensões, tais equipamentos possuem como características a utilização de combustíveis

com alto poder calorífico, paredes refratárias, queima a altas temperaturas – acima de 800° C e conseqüentemente, liberação de gases resultantes da combustão e temperaturas elevadas (NICOLAU *et al.*, 2012).

Os tipos de fornos utilizados nas indústrias cerâmicas influenciam diretamente nas perdas de produção devido a imperfeições ocasionadas pelo tipo de queima, resultando em produtos de má qualidade e conseqüentemente, afetando o faturamento da empresa. Em um estudo realizado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2016) os fornos mais utilizados pelas indústrias cerâmicas brasileiras são: intermitentes – 70%; semi-contínuos – 28% e contínuos – 2%.

Fornos intermitentes são utilizados por indústrias cerâmicas de pequeno porte devido ao seu menor custo inicial, já fornos semi-contínuos são utilizados predominantemente por médias empresas e estas também utilizam fornos intermitentes de maior capacidade ou maior quantidade de fornos por empresa. Nos últimos anos vem sendo desenvolvidos no Brasil os fornos túneis de pequena capacidade e baixo custo de construção adequados à maioria das plantas de produção no país e às capacidades de aquisição das empresas (ABDI, 2016).

Nos fornos intermitentes os blocos a serem aquecidos são colocados em uma determinada posição onde permanecem estáticos até alcançarem uma determinada temperatura e, em seguida, são resfriados até alcançarem a temperatura ambiente. Os principais tipos são: abóboda, plataforma, chama reversível, circulares, paulistinha, campanha e caieira (SPOSTO *et al.*, 2007).

Para Henriques Júnior *et al.* (2015) os fornos do tipo abóboda são amplamente utilizados na indústria de cerâmica vermelha no Brasil mesmo que apresentem baixo desempenho térmico. Segundo os autores “Estima-se que representem hoje 40% dos fornos empregados nas indústrias de cerâmica vermelha do país, com tendência estável de participação, sendo decrescente nas zonas de produção de tecnologia mais avançada e crescente nas regiões produtivas mais carentes em tecnologia” (HENRIQUES JÚNIOR *et al.*, 2015, p. 19). A Figura 4 ilustra um forno tipo abóboda que é o objeto de estudo desta pesquisa.

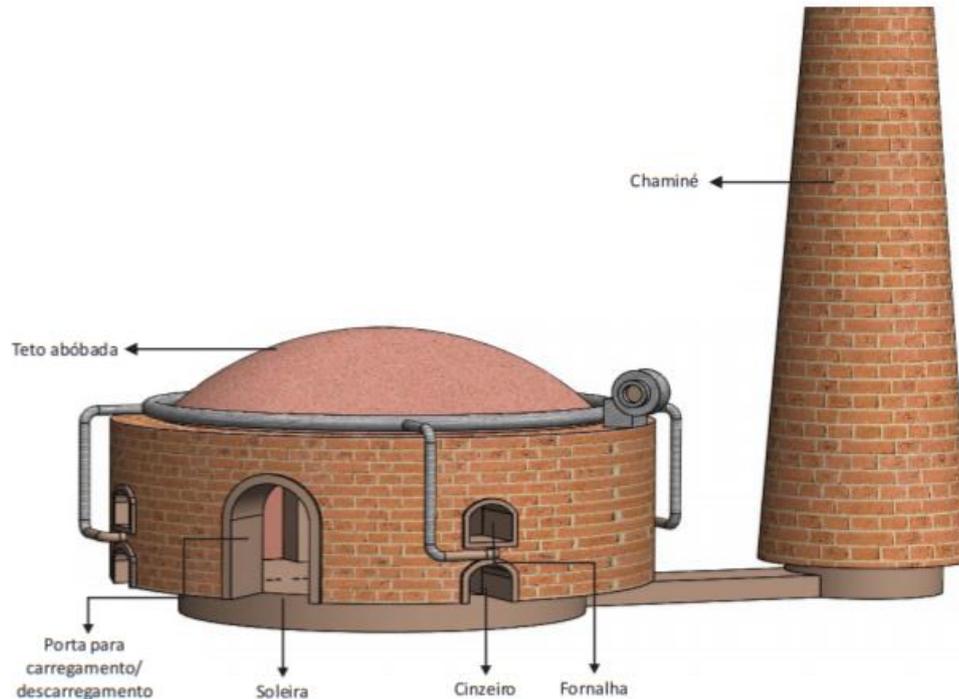


Figura 4 - Forno intermitente tipo abóboda

Fonte: Henriques Júnior *et al.* (2015).

Por conta da disposição geométrica deste forno e da característica de transferência interna de dos gases quentes é possível obter uma melhor distribuição do calor no interior do mesmo proporcionando uma queima mais uniforme. Estes fornos também podem ter um formato retangular, conhecidos pela nomeação de Corujinha e também formatos de igreja. Também são chamados de Catarina, quando apresentam duas seções triangulares internas e, na ausência de crivos, quando os gases saem pelos orifícios no canto do forno (HENRIQUES JÚNIOR *et al.*, 2015).

No forno tipo abóboda o combustível é lançado em fornalhas onde o mesmo é queimado gerando calor e esse calor é sugado através de um sistema de exaustão conectado a base do forno por um túnel. O calor ou gases gerados com a queima são lançados na carga interna do forno por uma abertura entre a fornalha e a abóboda e, em seguida, esses gases saem pelo piso interno do forno denominado crivos. Dessa maneira, o calor atravessa as peças, vindo de cima para baixo, proporcionando o cozimento das peças (GARCIA SOBRINHO; DIAS, 2018).

Por se tratar de um forno intermitente, o forno abóboda leva bastante tempo para se aquecer e resfriar, ou seja, tem grande inércia térmica. Levando-se em consideração as perdas de calor por radiação e convecção pelas paredes laterais, teto (abóboda) e portas de

alimentação de combustível, o rendimento energético de tal forno não é muito elevado (HENRIQUES JÚNIOR *et al.*, 2015).

De modo geral, os fornos desta modalidade apresentam consumo específico de madeira variando entre 1,15 e 1,6 estéreis por milheiro, que resulta em um consumo específico de energia na faixa de 536 a 860 kcal/kg e eficiência térmica média de 38%, perda de 2% até 5% e um ciclo de queima de 20 até 40 horas (HENRIQUES JÚNIOR, 2015).

Conforme ressaltado pela Agência de Desenvolvimento Industrial a utilização de fornos intermitentes ainda é muito comum nas indústrias brasileiras de cerâmica vermelha. Suas principais vantagens são: necessidade de pouco espaço para instalação quando comparado a fornos túneis, simplicidade e facilidade em sua construção, baixo custo inicial e facilidade em seu manuseio, maior flexibilidade da produção e fácil manutenção e adaptação conforme a demanda do mercado (SPOTO *et al.*, 2007). Em contrapartida, a utilização deste tipo de forno também apresenta desvantagens, tais como: baixo rendimento térmico, aquecimento irregular, dificuldade para automação da produção e necessidade de vários colaboradores para o seu funcionamento (KAWAGUTI, 2004).

Os fornos semi-contínuos (tipo Hoffmann) apresentam rendimento térmico razoável, sendo econômicos em termos operacionais, com boa produtividade e fácil manuseio, no entanto, apresentam um alto custo de construção (ABDI, 2016). Sua tecnologia permite um melhor controle de queima, sendo construído por câmaras, tendo aproveitamento de gases de escape. A queima se dá câmara por câmara, ou seja, enquanto uma está queimando, as posteriores estão aquecendo aproveitando o calor da queima e as anteriores estão resfriando, com o uso de ar ambiente. Neste tipo de forno são utilizados apenas óleo combustível e gás natural como matriz energética (ISHIDA *et al.*, 2018). Como exemplo deste tipo de forno, a Figura 5 apresenta uma visualização gráfica do mesmo.

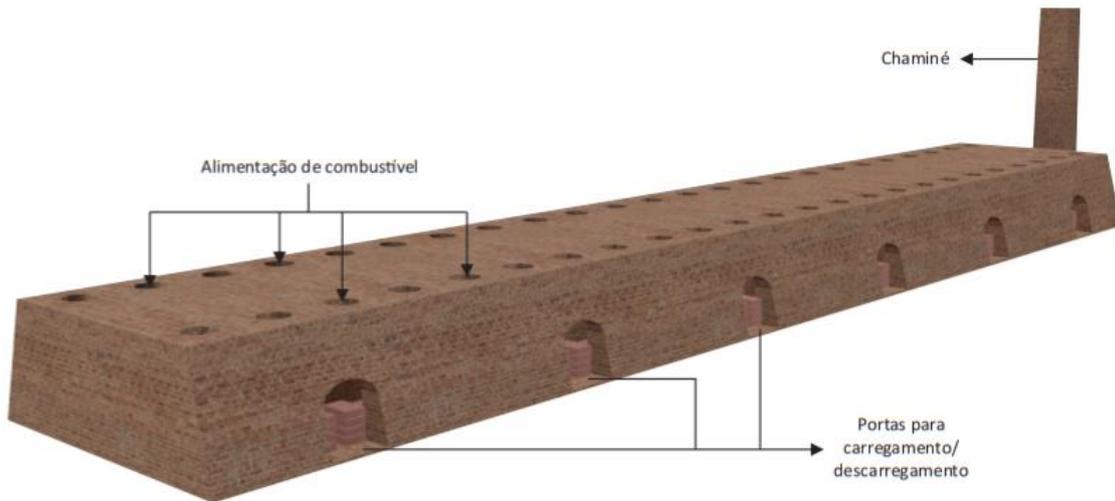


Figura 5 - Forno Hoffmann

Fonte: Henriques Júnior *et al.* (2015).

Na operação de um forno tipo Hoffmann não poderá faltar combustível para queimar, uma vez que, a falta do mesmo pode quebrar o ritmo do forno e comprometer sua estabilidade térmica, consumo energético e qualidade de produção. Conforme o avanço da velocidade da chama, é possível verificar que o consumo do mesmo aumenta ou diminui, ou seja, quanto mais rápido estiver o avanço do fogo menos combustível o forno consumirá. Ao contrário dos fornos contínuos, esse tipo de forno está mais presente em empresas de médio e grande porte com produção estimada entre 500 e 1.500 milheiros/mês ou 1.000 e 3.000 ton./mês (ABDI, 2016). Paiva Filho *et al.* (2004) ressaltam que fornos Hoffmann não apresentam os mesmos níveis de qualidade e eficiência dos fornos túneis, uma vez que, sua construção inviabiliza níveis de automação mais sofisticados.

Já os fornos contínuos (tipo túnel) são aqueles cujo funcionamento se dá quando o processo de queima ocorre de forma contínua sem a interrupção para carregamento ou descarga das peças cerâmicas. Tem como principal característica o seu elevado comprimento, onde as peças cerâmicas são transportadas com lentidão por toda a extensão do forno, de forma que o pré-aquecimento, queima e resfriamento são feitos de maneira contínua (GOMEZ *et al.*, 2020). Vale ressaltar que neste tipo de forno o resfriamento ocorre até a temperatura ambiente e a peça é retirada por uma porta diferente da qual entrou, que geralmente fica localizada ao final do forno. A Figura 6 esquematiza esse tipo de forno.

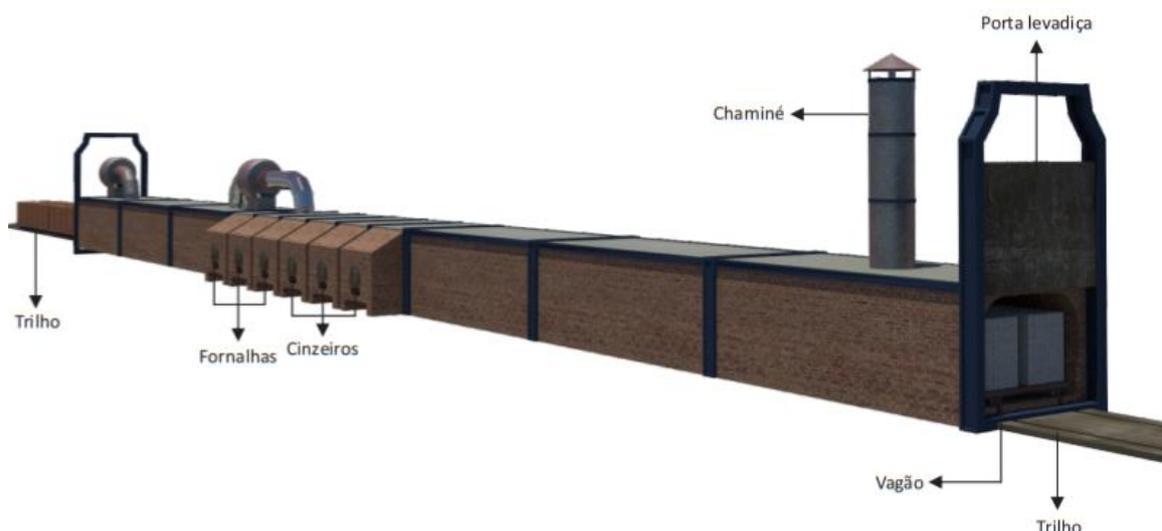


Figura 6 - Forno túnel

Fonte: Henriques Júnior *et al.* (2015)

Sistematicamente, as vagonetes (pequenos vagões que saem do forno), quando carregados, avançam até atingir a zona de queima, empurrados por outros vagonetes que se introduzem a intervalos de tempo regulares. Os produtos entram pela extremidade de enforna e saem pela outra totalmente queimados, sendo aquecidos gradativamente até atingir as temperaturas essenciais de produção de cerâmica vermelha. Após, são resfriados, paulatinamente, até a temperatura ambiente para que sejam retirados dentro da outra ponta do processo de queima do forno (MAIA, 2012).

Conforme ressaltado por Gomez *et al.* (2020) o forno túnel pode ser dividido em três zonas: pré-aquecimento, queima e resfriamento. O produto cerâmico entra cru por uma das extremidades e deixa o forno na saída oposta, na zona de resfriamento.

Sobre a operação do forno túnel Henriques Júnior *et al.* (2015, p. 60) enfatizam que:

Na primeira zona, os produtos montados em vagonetas ou carrinhos sofrem um preaquecimento, percorrendo uma curva de temperatura até cerca de 300°C. O pré-aquecimento da carga crua se dá pela passagem em contracorrente dos gases de combustão vindos da queima na parte central do forno. Estes gases quentes trocam calor com a carga e vão para a chaminé, geralmente localizada sobre o teto junto da entrada do forno (zona de preaquecimento). Em seguida, as vagonetas entram na zona de queima, onde estão dispostos os queimadores (dispostos lateralmente ou no teto). Nessa fase, a temperatura do produto passa de 300°C para 750/900°C, conforme o tipo de argila processada. Por fim, na terceira e última zona, os produtos começam o ciclo de resfriamento até a saída do forno. Neste trecho há o insuflamento de ar frio ambiente, como também ocorre a extração de ar quente que pode atender ao secador e/ou servir como ar de combustão na zona de queima.

Segundo Gomez *et al.* (2020) as principais vantagens de se utilizar fornos túneis no processo produtivo de cerâmicas vermelhas são: maior rendimento térmico, menor ciclo de queima, controle e aproveitamento dos gases de exaustão, aquecimento mais homogêneo e menor necessidade de mão de obra. Em contrapartida, suas desvantagens são: apresenta uma concepção mais complexa, menor flexibilidade de produção, custo de construção mais elevado, tempo de construção mais elevado, parada da produção para manutenção e baixa reação às flutuações de mercado e sua demanda.

Embora fornos intermitentes sejam predominantemente utilizados por indústrias cerâmicas brasileiras, fornos contínuos, normalmente necessitam de metade do combustível que seria utilizado por fornos intermitentes para queimar a mesma quantidade de peças cerâmicas com uma mesma curva de queima. Para Henriques *et al.* (2015) há algumas boas práticas para o uso eficiente de energia, tais como: utilizar material plenamente seco, utilizar combustível de boa qualidade seja ele líquido, gasoso ou sólido, utilizar alimentação contínua de combustível, controlar curva de queima através de termopares e recuperar calor do resfriamento.

Segundo Nandi *et al.* (2015) antes de se escolher um forno específico alguns fatores devem ser levados em consideração para facilitar e garantir a escolha, e não ter problemas futuros com prejuízos e desperdícios na produção, como por exemplo: volume de produção, consumo de combustível, consumo de energia elétrica, mão de obra necessária, grau de manutenção e gastos com manutenção. A Rede Campos Cerâmica (2021) pondera para empresas com produção estimada entre 20 e 30 milheiros de tijolos por dia, por exemplo, fornos intermitentes são eficientes mediante investimento mais baixo para sua construção. Já empresas com maiores demandas, o investimento em fornos de produção contínua é o mais indicado.

2.3 Processo de queima

O processo de queima é uma etapa fundamental na obtenção de produtos cerâmicos, uma vez que, nesta etapa acontecem alterações físico-químicas responsáveis pela alteração das propriedades mecânicas do material como a perda de massa, a possibilidade de formação de novas fases cristalinas, formação da fase vítrea e a sinterização dos grãos. Nesta etapa as peças cerâmicas são submetidas a um tratamento térmico com elevadas temperaturas que variam em torno de 800 °C a 1000°C em fornos contínuos ou intermitentes (NICOLAU, 2012).

Os fornos são alimentados por diferentes combustíveis, como por exemplo, a lenha, pó de serra, rejeitos da madeira, óleo ou carvão mineral, gás natural, entre outros. No entanto, nas indústrias brasileiras ainda predomina a utilização da madeira, seja ela nativa ou proveniente de reflorestamento.

Conforme citado na subseção anterior, a fase de aquecimento e resfriamento devem acontecer de forma controlada, uma vez que, o material sofre uma série de reações em diferentes intervalos de temperatura. A Tabela 2 identifica as reações e as temperaturas que as mesmas ocorrem.

Tabela 2 - Temperatura de reações

T (°C)	Reações
100	Secagem final do material ou evaporação da água higroscópica
110 – 200	Separação da água (zeolítica) que acompanha alguns minerais argilosos
350 – 600	Decomposição da matéria orgânica ou componentes carbonosos do corpo (liberação de CO ₂)
~ 500	Separação da água de cristalização
573	Transformação alotrópica do quartzo de ($\alpha \rightarrow \beta$) com variação de volume
~ 600	Liberação de flúor, dependendo da composição mineralógica da pasta
700 – 800	Decomposição e separação dos minerais micáceos
800 – 950	Decomposição dos carbonatos (liberação de CO ₂)
800 – 1100	Decomposição de sulfuretos e sulfatos
700 - T _{máx}	Reações químicas e físicas de cozedura: variações dimensionais, redução de porosidade, aumento da resistência mecânica

Fonte: Adaptado de Campante e Seabra (2002).

De acordo com Pinheiro e Holanda (2010), a temperatura de queima é um parâmetro que influencia fortemente as propriedades mecânicas do produto cerâmico. Para os autores a maioria das empresas cerâmicas brasileiras não utilizam uma temperatura de queima adequada na fabricação de seus produtos, resultando em produtos de baixa qualidade. No entanto, durante o processo de queima um conjunto de reações físico-químicas, dependentes da temperatura de queima se processam no interior da massa cerâmica argilosa. Vale ressaltar que a temperatura da queima se constitui na atualidade como um importante parâmetro tecnológico na indústria de cerâmica vermelha, com implicações econômicas, energéticas e ambientais.

O processo de queima de produtos cerâmicos segue um ciclo pré-determinado, também conhecido como curva de queima. Esta curva determina a taxa de aquecimento,

temperatura em que a queima ocorre e a taxa de resfriamento, determinadas pelas características termoquímicas e geométricas das peças. Define-se tal curva em função da preocupação de se obter o material desejado, de forma que sua integridade seja mantida. Além da qualidade, o aspecto econômico influencia na determinação da curva de queima, uma vez que, um tempo excessivo de queima gera um aumento no consumo de energia, atraso na produção e aumento nos gastos da empresa (KAWAGUTI, 2004). A Figura 7 ilustra qualitativamente uma curva de queima em um forno abóboda de acordo com o estudo realizado por Nicolau (2004).

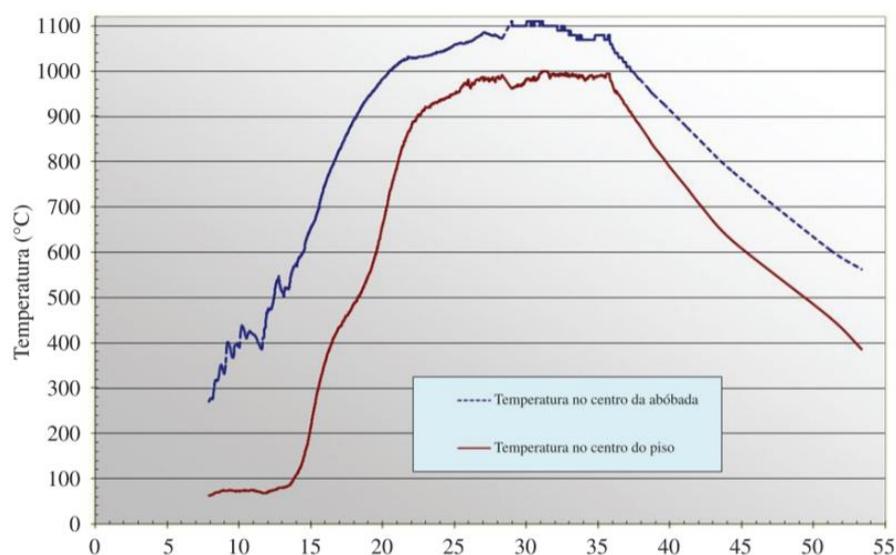


Figura 7 - Curva de queima de forno tipo abóboda

Fonte: Nicolau (2004).

Cada peça cerâmica apresenta uma curva de queima específica, determinada empiricamente e que deve ser respeitada dentro dos limites que assegurem as características cristalográficas desejadas. Como cada empresa possui um catálogo de produtos feitos com diferentes tipos de matérias primas e diferentes níveis de controle de secagem, não é possível haver apenas uma única curva de queima de fabricação, sendo a mesma adaptada conforme a necessidade da empresa (KAWAGUTI, 2004).

Segundo Dutra *et al.* (2009) definir a velocidade da queima (temperatura x tempo de queima) é um fator fundamental quando se visa a qualidade final do produto e economia do consumo de energia. Temperatura e tempo mal dimensionados resultam em peças sobre queimadas (com alto consumo de energia) ou peças cruas (com propriedades inapropriadas).

A ampla utilização de curvas de queima otimizadas permite que as reações de fusão e cristalização dos inúmeros componentes da massa e do esmalte que constituem o produto

cerâmico sejam realizadas de forma adequada. Tais reações contribuem para a obtenção de suportes cerâmicos com absorção de água e retração dentro das especificações pré-estabelecidas que resultam em peças cerâmicas com características melhoradas e com valorização estética da superfície esmaltada (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

2.4 Teor de umidade

A madeira é um biocompósito natural que possui uma estrutura hierárquica complexa composta principalmente por celulose, hemicelulose e matriz de lignina. Esses polímeros constituem tipos distintos de células de diferentes tamanhos e escalas de comprimento. A umidade pode existir dentro desses tipos de células em duas formas básicas que são água líquida situada na luz da célula e cavidades celulares chamadas água livre e água ligada dissolvida ou absorvida dentro das paredes das células higroscópicas. Conceitualmente, a água ligada parece estar intimamente associada às paredes celulares por ligações de hidrogênio, ao passo que a água líquida na luminosidade celular e nas cavidades celulares está sujeita a uma força mais fraca chamada de forças capilares (XU *et al.*, 2017).

A quantidade de água presente na madeira é expressa pelo teor de umidade (θ) e é definido pela relação entre a massa de água presente na madeira e a massa seca da madeira do forno, expressa em porcentagem (VAN MEEL *et al.*, 2011):

$$\theta = \frac{w_m - w_0}{w_0} \quad (1)$$

Onde, w_m é a massa da madeira molhada, e w_0 a massa seca da madeira no forno, definida como a massa constante obtida após a secagem em uma estufa mantida a 103 ± 2 ° C. As paredes celulares trocam umidade com o ar que fica ao redor da madeira e um equilíbrio é estabelecido entre a água ligada e o vapor de água no ar circundante. O fator de umidade relativa do ar (RH) pode ser definido como (VAN MEEL *et al.*, 2011):

$$RH = \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

Onde, p é a pressão de vapor parcial no ar e p_0 é a pressão de vapor saturado na temperatura do ar dada.

Embora esse método seja frequentemente utilizado para determinação do teor de umidade, tem seu limite devido à dificuldade de remoção de toda a água higroscópica e componentes voláteis em alguns casos (JIN *et al.*, 2014). Como uma técnica instantânea para estimar o teor de umidade da madeira, medidores elétricos do tipo condutância e medidores de umidade do tipo dielétrico têm sido amplamente utilizados industrialmente por muitos anos. No entanto, a precisão do método é afetada por variáveis inerentes à madeira e variáveis externas (XU *et al.*, 2017).

De acordo com Silveira, Rezende e Vale (2013), o teor de umidade é inversamente proporcional à densidade da madeira, ou seja, quanto maior a quantidade de água, menor a quantidade de outros elementos químicos da madeira, celulose, hemicelulose e lignina. Sendo assim, a densidade é um importante parâmetro para avaliação da qualidade da madeira. No entanto, tal variável é muito complexa e resulta de inúmeros fatores tais como dimensão das fibras, espessura da parede celular, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira do cerne e alborno e arranjo dos elementos anatômicos.

A densidade básica pode ser definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado da madeira ou através do método de máximo teor de umidade, em pequenas amostras. Sendo este último método simples e requerer apenas a determinação da massa saturada e da massa seca da madeira, uma vez que a densidade da madeira é constante ($1,53 \text{ g/cm}^3$). Comparações feitas entre os métodos citados acima para obtenção da densidade básica mostraram que não há diferença significativa entre eles, não havendo interferência também no corpo de prova, conforme identificado na Figura 8 (FOELKEL *et al.*, 1971).

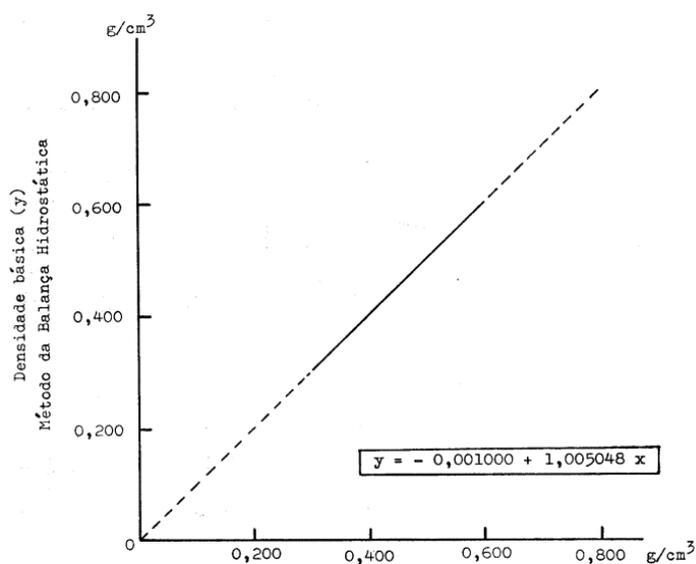


Figura 8 - Densidade básica x Método do máximo teor de umidade

Fonte: Foelkel *et al.* (1971).

Larson *et al.* (2001) pondera que a densidade da madeira talvez seja o método mais antigo utilizado para analisar a qualidade da madeira e suas propriedades de resistência. Conforme ressaltado por Foelkel *et al.* (1971) a densidade é um importante fator na determinação das propriedades físicas e mecânicas que caracterizam diferentes espécies de madeiras, diferentes árvores de uma determinada espécie e diferentes regiões de uma mesma espécie.

Sabe-se que quase todas as propriedades físicas e mecânicas da madeira são fortemente influenciadas por seu teor de umidade. Além disso, a distribuição não homogênea de umidade dentro do gradiente de umidade resultante da madeira levaria a tensões internas, instabilidade dimensional e outros defeitos (PANG, 2007).

Segundo Nystrom e Dahlquist (2003), o teor de umidade presente nos biocombustíveis pode ser considerado como um parâmetro importante de medida para se otimizar sua combustão. Os biocombustíveis como madeira, lenha e serragem variam em teor de umidade e tem sido um grande problema medir este parâmetro com precisão. Pode-se dizer que o teor de umidade afeta o processo de combustão, uma vez que, parte da energia gerada é gasta para evaporar a água proveniente da umidade no biocombustível, já que a água não participa da reação química de combustão, apenas absorve energia à medida que evapora. Por este motivo, plantas industriais conduzem o gás de combustão para a secagem do combustível.

A madeira é um biocombustível que cresce naturalmente com propriedades altamente dependentes do teor de umidade e, diferem em três características: longitudinal, radial e tangencial. Uma mudança no teor de umidade da madeira leva a uma mudança dimensional, que também depende da direção do material. Essas mudanças dimensionais são chamadas de inchaço (aumento do MC) conhecido como processo de infiltração e encolhimento (diminuição do MC) conhecido como processo de secagem (AUTENGRUBER *et al.*, 2020).

No geral, as mudanças nas dimensões da seção transversal são, muito maiores do que as longitudinais. Devido a essa expansão não uniforme, as rachaduras podem ser causadas pelas tensões resultantes. Em geral, a água pode estar presente em três estados diferentes na madeira: a água livre e o vapor de água podem ser encontrados no lúmen e a água ligada presente na parede celular, conforme citado por Xu *et al.* (2017) e reafirmado por Autengruber *et al.* (2020). Essas três fases da água estão interagindo umas com as outras. Água ligada na parede celular e vapor de água, bem como água livre no lúmen, tentam atingir um estado de equilíbrio, também denominado como o teor de umidade de equilíbrio (EMC) (KANOPKA; KALISKE, 2018).

Um dos problemas relacionados ao teor de umidade presente na biomassa é que a temperatura da chama decresce como aumento do teor de umidade do combustível. Ao jogar combustível com alta umidade no queimador pode ocasionar uma alteração súbita da temperatura surgindo uma área de combustão incompleta que acarretará concentrações elevadas de CO nos gases de combustão (NYSTROM; DAHLQUIST, 2003).

Estudos sobre a utilização da madeira como combustível mostram que a combustão direta da madeira é o processo mais simples e econômico para se obter energia. Tal fato pode ser confirmado, pela ampla utilização deste biocombustível nas indústrias cerâmicas campistas. No entanto, o rendimento energético de um processo de combustão da madeira depende sobretudo da sua composição química, onde os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais variam de acordo com a espécie e é de extrema importância para a escolha da madeira a ser utilizada no processo de queima (QUIRINO *et al.*, 2005).

2.4.1 Teor de umidade x poder calorífico

Para se obter um aproveitamento racional da madeira é de suma importância que suas propriedades energéticas sejam conhecidas. Um parâmetro amplamente utilizado para avaliar o poder energético dos combustíveis é o poder calorífico (PROTÁSIO *et al.*, 2011) definido segundo Quirino *et al.* (2005) como a quantidade de energia liberada na forma de calor pela combustão de uma unidade da madeira. Müzel *et al.* (2014) ressaltam que quanto mais alto for o poder calorífico, maior será a energia contida.

O poder calorífico divide-se em Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI). O PCS pode ser definido como aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante o processo é condensada e o calor latente do vapor de água não é perdido (PROTÁSIO *et al.*, 2011). Tal parâmetro pode ser obtido através de equipamentos apropriados, também conhecidos como calorímetros (MÜZEL *et al.*, 2014). Já o PCI pode ser definido como a energia disponível por unidade de massa de combustível após dedução das perdas resultantes da evaporação da água (QUIRINO *et al.*, 2005).

Algumas características da madeira influenciam diretamente o valor do seu poder calorífico, ou seja, quanto menor o teor de umidade presente na madeira, maior será a produção de calor por unidade de massa, assim como, maior densidade da madeira, geram mais poder calorífico por unidade de volume (MÜZEL *et al.*, 2014). Em outras palavras, pode-se dizer que o poder calorífico é inversamente proporcional à umidade da madeira

(Figura 9). Isso ocorre porque, durante o processo de combustão, parte da energia liberada durante a queima é utilizada para mudança do estado físico da água (referente à umidade) de líquido para gasoso (vaporização) (LIMA; ABDALA; WENZEL, 2008). Segundo Vale *et al.* (2000) o teor de umidade da madeira não deve ser superior a 25%, uma vez que, reduz o PCS.

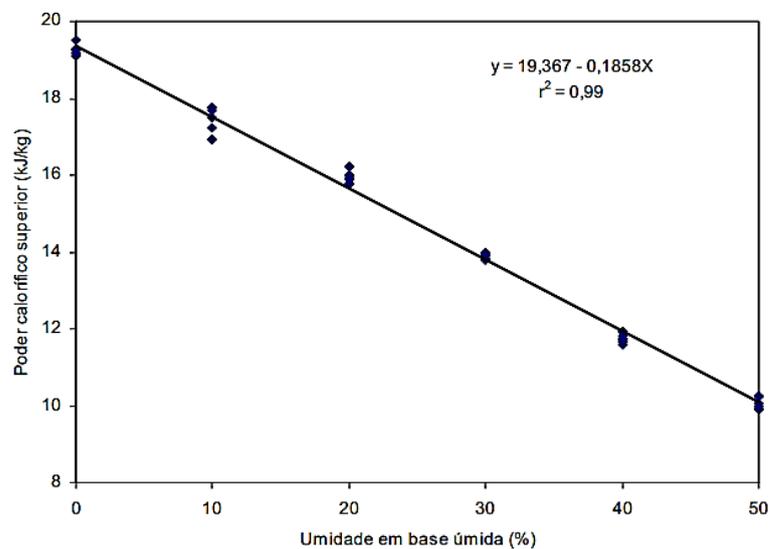


Figura 9 - Poder calorífico x umidade da madeira (*Eucalipto Benthamii*)

Fonte: Lima, Abdala e Wenzel (2008).

A partir do método de correlação ilustrado na Figura 9, Lima, Abdala e Wenzel (2008) ressaltam que a madeira com 0% de umidade apresentou poder calorífico de 19.264 kJ.kg-1 enquanto, com 50% de umidade, o poder calorífico caiu para 10.078 kJ.kg-1. Tal fato confirma que, quando a queima da madeira for realizada com 50% de umidade, somente 52% de toda sua energia será aproveitada. Entretanto, sabe-se que dificilmente madeiras com 0% de umidade serão encontradas, uma vez que, a umidade de equilíbrio da madeira fica entre 22% e 30% (LIMA; ABDALA; WENZEL, 2008).

2.5 Madeira

A madeira é um material renovável, sustentável e de fácil manuseio que tem sido utilizado como combustível a milhares de anos. É composta por células alongadas, a maioria das quais são orientadas na direção longitudinal do caule. Essas células são conectadas umas às outras por meio de aberturas e variam em sua forma de acordo com a sua função. As funções exibidas por estas células são em sua maioria, fornecer resistência mecânica as

árvores, desempenhar a função de transportar líquidos em seu interior e armazenar alimento (LOWDEN; HULL, 2013).

Com a diversidade de produtos de madeira e suas respectivas utilizações em diversos setores, a mesma, atualmente é um dos materiais mais utilizados, seja na fabricação de produtos ou como fonte de combustível, porém é preciso que sejam avaliados e previstos com eficiência o seu ciclo de vida. Atualmente a variedade de materiais provenientes da madeira apresenta novos produtos que processados proporcionam diversas características convenientes em relação a sua forma, dimensão, aspectos e principalmente características físicas e mecânicas (RODRIGUES, 2018).

Segundo Wiemann (2010) toda madeira é composta por celulose, lignina, hemicelulose e pequenas quantidades (geralmente inferiores a 10%) de substâncias desconhecidas contidas em sua estrutura celular. Variações nas características e proporções destes componentes tornam as madeiras pesadas ou leves, rígidas ou flexíveis, sendo assim, a escolha da madeira apenas por espécie pode, em inúmeros casos, ser adequada. No entanto, para utilizar a madeira da melhor forma possível e com maior eficácia, características específicas ou propriedades físicas das mesmas devem ser consideradas.

Por ser um material orgânico e de estrutura complexa e heterogênea, a madeira é altamente higroscópica e necessária para a umidade do ambiente à sua volta. A troca de umidade entre a madeira e o ar depende da umidade relativa do ar e da quantidade atual de água presente no interior da madeira. Esta relação tem influência nas propriedades e desempenho da madeira e, muitos dos desafios da utilização da madeira como biocombustível resultam de alterações no teor de umidade ou abundância de umidade no interior da madeira (GLASS; ZELINKA, 2010).

Lowden e Hull (2013) ressaltam que quando a madeira é aquecida, a mesma sofre degradação térmica e combustão. Para compreender e alterar o comportamento da madeira ao fogo, é necessário conhecer o teor de umidade presente no seu interior e seus processos de decomposição. Inúmeras técnicas de análise térmica e avaliação de inflamabilidade são utilizadas para este propósito, como por exemplo, análise termogravimétrica, calorimetria de cone e teste de queima única. Os resultados de tais testes dependem de inúmeros parâmetros, incluindo mudanças na composição do gás, temperatura, taxa de aquecimento e tamanho da forma da amostra.

2.5.1 *Eucalypto urograndis*

O gênero *Eucalyptus* se inclui atualmente na lista de árvores exóticas do Brasil com ampla cobertura do seu território, originário da Austrália, pertencente à família das myrtaceas¹, são descritas mais de 700 espécies, muito utilizada pela indústria de celulose por apresentar rápido desenvolvimento, possui porte arbóreo, este espécime é composto em sua grande maioria por híbridos, que passaram pelo processo de modificação genética, visando o melhoramento das mesmas em relação as suas características, para melhor adaptação ao meio, atingindo resistência a agentes patogênicos, além de alta produtividade (BALIEIRO, 2013).

De acordo com Montanari *et al.* (2007), uma das principais espécies de eucalipto utilizadas nos reflorestamentos brasileiros é *Eucalyptus urograndis*, clone um híbrido interespecífico proveniente do cruzamento do *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, que apresenta boas características quanto à adaptação aos diferentes sítios florestais e, além disso, é mais produtivo e/ou apresenta melhor característica da madeira.

Para Barbosa (2018), a produção de mudas é uma das fases mais importantes para o estabelecimento dos povoamentos florestais. A nutrição adequada das mesmas e o uso de substrato de cultivo apropriado são fatores essenciais para assegurar boa adaptação e crescimento após plantio. O conhecimento do crescimento das plantas em viveiro, quando são variados os fatores de produção (água, luz, temperatura e substratos) é importante para produzirem mudas de boa qualidade em quantidade suficientes e a um menor custo.

Dentre os fatores que influenciam na produção de mudas de espécies florestais, destaca-se, principalmente o substrato utilizado, pois reflete diretamente na qualidade do produto. Por isso, a busca constante de melhor produtividade dos reflorestamentos e a qualidade da muda tem sido abordada em vários trabalhos de pesquisa, cuja finalidade é definir os melhores substratos para a produção de mudas com a qualidade desejável (COSTA, 2011).

2.5.2 Processo de queima de madeira

A madeira quando submetida à ação do calor, está sujeita a variações físico-químicas. O gradiente térmico provocado pelo aquecimento diferencial do material induz a transferência de massa e, conseqüentemente, a secagem do material. Porém, quando as temperaturas forem elevadas, ocorrerá a despolimerização da madeira com liberação de gases voláteis inflamáveis

ou não, a combustão do material lenhoso, a carbonização e a combustão incandescente do carbono fixo (SARDINHA *et al.*, 2002).

Para Szücs (1998), a combustão é a transformação térmica em presença de oxigênio ou ar, em quantidade suficiente para promover sua decomposição completa por uma fonte externa de calor. Quando esta transformação não tem o aporte suficiente de oxigênio, ou o aporte é controlado, ocorre a carbonização, cujo resíduo sólido é o carvão.

Diversos estudos foram realizados sobre a queima da madeira, mostrando que o processo de decomposição e a temperatura na qual ela ocorre são dependentes, significativamente, da espécie da madeira, dos anéis de crescimento e do teor de umidade do material. As reações químicas no interior do material são complexas, com reações endotérmicas e exotérmicas ocorrendo simultaneamente tanto no tempo como no espaço.

Segundo Rodrigues (2018), durante o aquecimento da madeira, muitos compostos orgânicos voláteis são produzidos e liberados, tais como álcoois, resinas, terpenos. São eles que participam na reação em cadeia durante o processo de combustão da madeira. No início do aquecimento, quando a temperatura da madeira está acima de 100 °C, as ligações químicas de seus componentes começam a se romper. Entre 100 °C e 200 °C há liberação de água, óxidos de carbono e vestígios de produtos biológicos.

Geralmente, o processo de queima da madeira é dividido em cinco fases, com suas respectivas faixas de temperaturas, de acordo com o Quadro 1 a seguir (SARDINHA *et al.*, 2002):

Quadro 1 - Fases da queima da madeira

Fase	Temperatura	Fenômeno
I	Até 200 ° C	Processo denominado pirólise lenta; Liberação de vapor d'água e gases; A madeira não se igniza; Existência de algumas reações exotérmicas de oxidação; Mudança de cor;
II	200 a 280 ° C	Aumento da reação química e eliminação de gases; Ocorrência de reações exotérmicas primárias sem inflamação; Temperatura considerada como a temperatura de ignição; Fase conhecida como pirólise rápida;
III	280 a 380 ° C	Produto de grandes quantidades de destilados, principalmente ácidos acéticos e metanol; O resíduo final dessa fase já é carvão vegetal, mas que ainda apresenta compostos volatizáveis em sua estrutura; Fase exotérmica;
IV	380 a 500 ° C	Redução da emissão de gases; Produção de ácido acético, metanol, alcatrão e diversas substâncias gasosas condensáveis; A perda de massa é da ordem de 70% em relação a massa original; Fase exotérmica;
V	Acima de 500 ° C	Térmico da carbonização e início da gaseificação do carvão; O carvão é o resíduo principal; No interpor da madeira permanece a temperatura das fases I, II e III; Fase exotérmica.

Fonte: Adaptado de Sardinha *et al.* (2002).

Para White (2006), as primeiras mudanças físico-químicas surgem a partir de 50 °C. As reações exotérmicas iniciam-se entre 150 °C e 160 °C e aumentam com a elevação da temperatura. Acima de 200 °C, esses fenômenos se refletem na perda acelerada de massa, a qual coincide com a redução da resistência mecânica da madeira decorrente do aumento da temperatura.

Os polímeros da madeira apresentam estabilidade térmica diferenciada em função da rede cristalina de cada um. A queima da celulose ocorre a temperaturas entre 200 °C e 280 °C, com uma queima progressiva que inclui despolimerização e desidratação. Nas temperaturas superiores a 280 °C ocorre uma rápida volatilização dos componentes químicos. A queima da madeira da hemicelulose ocorre entre 160 °C e 260 °C, sendo o primeiro carboidrato da madeira a se degradar, devido a sua estrutura heterogênea, à natureza não cristalina de sua estrutura e a seu baixo peso molecular em relação aos outros polímeros da madeira. Durante a queima da hemicelulose, a cristalinidade da celulose aumenta temporariamente e não há

geração de gases combustíveis. A lignina é termicamente mais resistente que os demais carboidratos que compõem a madeira. Sua degradação térmica está situada entre 225 °C e 450 °C, com a presença de reações exotérmicas. Em torno de 200 °C ocorrem reações de desidratação. Entre 150 °C e 300 °C ocorre o rompimento das ligações de carbono e, em torno de 300 °C, as ligações laterais alifáticas começam a romper fora do anel aromático (FIGUEROA; MORAES, 2009, p. 3).

Segundo Figueroa e Moraes (2009), a queima desses polímeros se reflete em perda de massa. Para taxa de aquecimento lenta e atmosfera inerte, a maior perda de massa da celulose ocorre entre 300 °C e 400 °C, a da hemicelulose entre 250 °C e 350 °C, e a da lignina entre 250 °C e 450 °C. Até 600 °C, a perda de massa alcança mais de 80%, 95% e 60% para a celulose, a hemicelulose e a lignina respectivamente.

2.5.3 Tipos de secagem da madeira

Dentre os diversos materiais utilizados pelo ser humano, a madeira apresenta alto destaque devido às suas propriedades físicas e mecânicas que permitem sua utilização em variada gama de aplicações e ambientes. No entanto, a madeira costuma sofrer alterações em função do seu teor de umidade. Em razão disso, faz-se necessário promover a secagem da madeira antes de seu uso no processo industrial (FRANZOI, 1997).

Para Mendes *et al.* (1998), a secagem é considerada uma operação de grande importância na manufatura de produtos, garantindo melhor padrão de qualidade e maior valor agregado ao produto. A secagem da madeira representa uma etapa importante em todo processo realizado na indústria da madeira e por isso deve merecer especial atenção. Se a retirada da umidade for bem realizada, a indústria se beneficiará das suas diversas vantagens, caso contrário, diversos problemas podem danificar a matéria prima.

Segundo Tomaselli e Klitzke (2000) a secagem da madeira apresenta algumas vantagens, tais como: reduz o peso e conseqüentemente o custo de transporte e manuseio da madeira, aumenta a resistência mecânica da madeira, reduzindo o efeito de contração e inchamento quando em condições normais de uso, reduz os riscos de ataques de fungos machadores, melhora a capacidade de impregnação da madeira por tintas, vernizes e cola, melhorar as propriedades de isolamento térmico e elétrico do material.

Com isso, é de suma relevância levar em consideração a forma mais eficiente de secagem da madeira, visto que, esse processo se inicia assim que a árvore é cortada, como contém umidade, precisa ser controlada. Existem alguns tipos de secagem, como por exemplo, secagem natural (ao ar livre), secagem forçada ao ar e secagem em estufa.

A secagem ao ar livre é caracterizada pela exposição de pilhas de tábuas em áreas externas. Nesta forma, as tábuas são empilhadas e espaçadas entre si de modo a permitir que o ar circule entre as peças. Esse tipo de secagem natural é comumente utilizado em empresas que visam a pré-secagem da madeira, de modo a otimizar o tempo de secagem em estufa (MENDES *et al.*, 1998). A Figura 10 demonstra como ocorre o processo de secagem da madeira ao ar livre.



Figura 10 - Secagem da madeira ao ar livre

Fonte: Zen *et al.* (2019).

Segundo Zen *et al.* (2019), o método ao ar-livre é de baixo custo, mas requer um longo tempo para obter a umidade necessária. Na secagem ao ar livre, as tábuas de *Eucalyptus urograndis* são deixadas expostas ao clima local, como temperatura, umidade e circulação de ar. No início do processo de secagem, a perda de água é muito mais rápida, pois a madeira tem maior umidade.

Vargas (2022) analisou secagem externa da madeira de *Eucalyptus urograndis* concluiu que:

O uso de lajes de concreto sobre a estaca, evitando que as tábuas se movimentassem e lutassem durante a secagem, foi um fator chave na redução do número de empenamentos. Os fragmentos encontrados na parte central inferior da pilha apresentam alto teor de umidade, indicando que a altura da base utilizada foi insuficiente para garantir a troca de ar úmido encontrado nessas regiões. O tempo médio para passar do PSF (Ponto de Saturação de Fibras) e chegar até 23% de umidade pode ser de 65 dias, dependendo do clima da região (VARGAS, 2022, p. 23).

A secagem forçada tem a característica de se basear no uso de ventiladores presentes em pátios, muitas vezes acompanhados de sistemas de aquecimento, que objetivam diminuir o tempo de secagem das madeiras empilhadas (MENDES *et al.*, 1998). Segundo Franzoi (1997), a secagem em estufa consiste na utilização de uma câmara ou túnel onde a madeira passa por um processo mais específico de secagem, conforme mostrado na Figura 11.



Figura 11 - Secagem da madeira em estufa

Fonte: Contraco (2022).

Comparada com a secagem natural, a secagem em estufa traz algumas vantagens importantes como: menor tempo para finalizar o processo, maior controle e maior capacidade de obtenção de teores de umidade mais baixos. Nos últimos anos a tecnologia vem contribuindo com o aumento da produtividade da secagem de madeiras em estufa, reduzindo significativamente os tempos de secagem sem perder a qualidade da madeira (FRANZOI, 1997).

Zenid (2009) explica que a madeira de *Eucalyptus urograndis* é considerada de difícil secagem, podendo ocorrer defeitos como quedas, colisões e rachaduras. De fato, a madeira de eucalipto é semelhante a outras madeiras, devendo ser cuidadosamente considerada isoladamente e em suspensão. A incapacidade de penetrar no eucalipto tende a se deteriorar, enquanto os gradientes de umidade tendem a rachar, os erros geralmente aumentam com o aumento da temperatura. Esta é uma importante razão pela qual a madeira de *Eucalyptus urograndis* é conhecida por sua secagem lenta e propensa a deformidades, que podem ser potencializadas pela liberação de pressões de crescimento.

3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a forma pela qual a pesquisa é classificada, bem como a descrição das etapas necessárias para atingir o objetivo geral deste estudo.

3.1 Classificação da pesquisa

A pesquisa consiste em um “procedimento reflexivo sistemático, controlado e crítico, que permite descobrir novos fatos ou dados, relações ou leis, em qualquer campo do conhecimento” (ANDER-EGG, 1978, p. 28). Deste modo, pode ser classificada de diferentes formas podendo ser dividida de acordo com: sua natureza (básica ou aplicada); abordagem aplicada ao problema (qualitativa ou quantitativa); objetivos (exploratória, descritiva ou explicativa); e procedimentos técnicos (bibliográfica, documental, experimental, levantamento ou *ex-post-facto*) (FERNANDES *et al.*, 2018).

Segundo Nascimento (2016) a pesquisa básica tem como principal objetivo gerar novos conhecimentos para o avanço da ciência, busca gerar verdades, ainda que temporárias e relativas de interesses mais amplos. Entretanto, a mesma não tem compromisso de aplicação prática dos resultados. Por outro lado, a pesquisa aplicada dedica-se à geração de conhecimento para solução de problemas específicos e, é dirigida pela busca da verdade para determinada aplicação prática em situação particular.

Em relação a abordagem aplicada ao problema, a pesquisa pode ser classificada em qualitativa e quantitativa. A pesquisa qualitativa caracteriza-se por ser interpretativa, baseada em experiências, situacional e humanística, sendo assim, não requer a utilização de métodos e técnicas estatísticas. Já a pesquisa quantitativa é caracterizada pelo uso da quantificação, tanto na coleta quanto no tratamento das informações, utilizando-se de técnicas estatísticas. De modo geral, a pesquisa quantitativa é passível de ser medida escala numérica (FERNANDES *et al.*, 2018).

Quanto à finalidade, a pesquisa pode ser classificada como exploratória, explicativa e descritiva (GIL, 2010). A pesquisa descritiva busca conhecer diversas situações e relações que ocorrem na vida social, política, econômica e demais aspectos comportamentais do ser humano, tanto do indivíduo tomado isoladamente como dos grupos e comunidades mais complexas (CERVO; BERVIAN, 2011). Andrade (2007, p. 114) enfatiza que nas pesquisas descritivas, “os fatos são observados, registrados, analisados, classificados e interpretados, sem que o pesquisador interfira neles. Isto significa que os fenômenos do mundo físico e

humano são estudados, mas não manipulados pelo pesquisador”. Por outro lado, pesquisas exploratórias tem como objetivo facilitar a familiaridade do pesquisador com o objeto da pesquisa, para permitir a construção de hipóteses ou tornar a questão mais clara, assim, permite o aprimoramento de ideias, ou a descoberta de intuições. Por fim, a pesquisa explicativa tem o uso mais restrito, uma vez que, empregam o método experimental da pesquisa e, são dotadas de complexidade, servindo para identificar atributos ou fatores que determinam a ocorrência de fenômenos (NASCIMENTO, 2016).

Por último, a pesquisa pode ser classificada de acordo com os procedimentos técnicos utilizados, sendo classificada em bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso ou *ex-post facto*. A pesquisa bibliográfica pode ser definida como um apanhado geral sobre os principais trabalhos já realizados, revestidos de importância, por serem capazes de fornecer dados atuais e relevantes relacionados com o tema (LAKATOS; MARKONI, 2003). A pesquisa documental diferencia-se da pesquisa bibliográfica pelo fato desta utilizar materiais que ainda não receberam tratamento analítico. Na pesquisa experimental estabelece-se um objeto de estudo, seleciona variáveis que podem influenciá-lo, define mecanismos e formas de controle e de observação dos efeitos causados pelas variáveis selecionadas sobre o objetivo pesquisado (NASCIMENTO, 2016). O levantamento é caracterizado por obter dados ou informações sobre as características ou opiniões de um determinado grupo de pessoas, utilizando um questionário como instrumento de pesquisa (FONSECA, 2002). O estudo de caso, por sua vez investiga um fenômeno considerando seu contexto, ou seja, realiza uma análise sob a conjuntura real. E por fim, a pesquisa *ex-post-facto* consiste na investigação a partir dos fatos passados, ou seja, o pesquisador não possui controle direto sobre as variáveis independentes, pois suas manifestações já ocorreram ou não são manipuláveis (FERNANDES *et al.*, 2018).

A partir do exposto, esta pesquisa classifica-se em: aplicada (dedica-se a solução de um problema específico); quantitativa (quantifica variáveis); exploratória (busca familiarizar-se com o problema a ser estudado); e estudo de caso (realizada um estudo detalhado do objeto de pesquisa).

3.2 Etapas do procedimento metodológico

O desenvolvimento do presente estudo foi dividido em 6 etapas (Figura 12): revisão de literatura, definição do objeto de pesquisa, levantamento de dados da madeira utilizada na queima, levantamento de dados do forno, secagem da madeira, e, por fim, análises e testes.

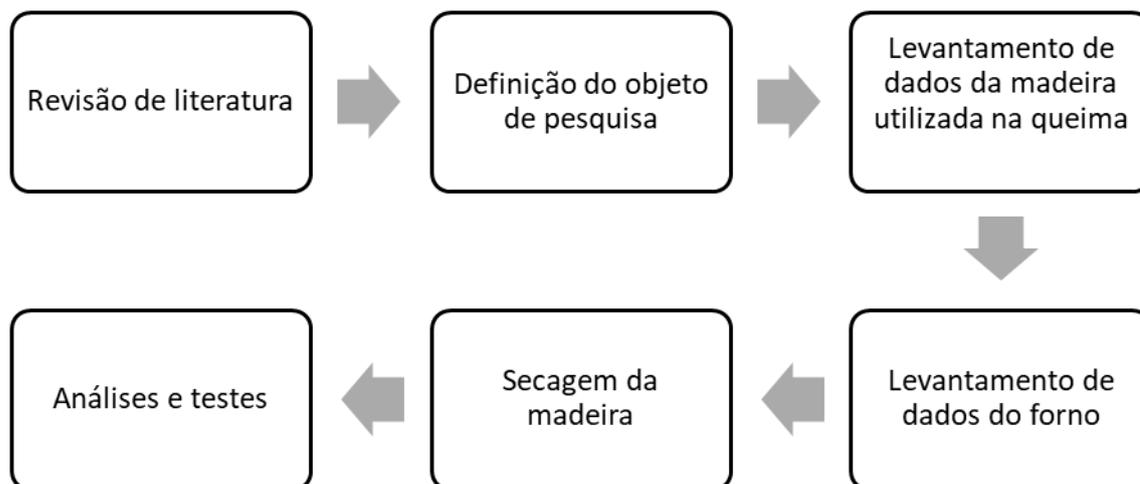


Figura 12 - Etapas da metodologia

Fonte: O autor (2022).

3.2.1 Revisão de literatura

Sabe-se que a revisão de literatura é a primeira etapa a ser realizada pelo pesquisador em direção à produção de um projeto. Sendo assim, a revisão de literatura pode ser definida como a junção de ideias de diferentes autores sobre determinado tema, ou seja, é a documentação feita pelo pesquisador sobre a pesquisa que o mesmo está se propondo a fazer. Tradicionalmente, dois aspectos são associados à revisão de literatura quando se busca respostas sobre um problema de pesquisa: a) análises de pesquisas anteriores sobre a temática e b) a discussão do referencial teórico sobre o tema (BRIZOLA; FANTIN, 2016).

3.2.1.1 Objetivos de pesquisa

Neste estudo, a revisão bibliográfica foi realizada com o intuito de atender a três objetivos:

- Conhecimento da indústria cerâmica, com ênfase na cerâmica vermelha, levando-se em consideração sua importância econômica no território nacional e regional;
- Compreensão do funcionamento do processo produtivo, enfatizando o funcionamento dos fornos cerâmicos;

- Entendimento dos processos de secagem da madeira e como o mesmo pode aumentar o seu poder calorífico.

3.2.1.2 Definição dos temas-chave

Após a definição dos objetivos que norteiam a revisão bibliográfica, foram definidos cinco temas-chave para dar seguimento ao estudo. Segundo Garcia, Gattaz e Gattaz (2019) por serem ferramentas fundamentais para a indexação nas bases de dados, eles atuam como porta de acesso aos textos. Portanto, através da escolha de temas ou palavras-chave, a mesma permite a filtragem de informações em bases de dados de maneira eficiente, sendo assim, os temas chaves definidas nesta revisão bibliográfica foram:

- Cerâmica vermelha;
- Processo de queima;
- Teor de umidade;
- Secagem da madeira;
- Eficiência energética.

3.2.1.3 Definição das *Strings* de busca

Uma vez definidos os temas-chave, foram criados termos que representam cada um e, a partir deles, foram criadas *Strings* de busca para facilitar as pesquisas e seleção de artigos. As *Strings* de busca são lógicas utilizadas com o intuito de facilitar as pesquisas, de forma que, seu conteúdo seja disposto de acordo com os termos especificados e suas variações. Desta forma, é essencial verificar quais termos apresentam real impacto na identificação de estudos relevantes e, sobretudo, eliminar termos que reduzem a precisão da pesquisa e não agregam estudos relevantes e de impacto ao projeto que está sendo desenvolvido (NAPOLEÃO, 2019).

Os termos (T) que representam os termos-chave para facilitar a pesquisa são identificados a seguir:

- T1 = (“*clay*” OR “*clay ceramic*” OR “*red clay ceramic*” OR “*clayey ceramic*”);
- T2 = (“*burning*” OR “*burning process*” OR “*burning stage*” OR “*burning phase*”);

- T3 = (“*humid*” OR “*moisture content*”);
- T4 = (“*drying*” OR “*firewood*” OR “*biomass*” OR “*wood drying*”);
- T5 = (“*efficiency*” OR “*calorific efficiency*”).

Posteriormente, a partir da elaboração dos termos-chave são definidas as *Strings* de busca, que contribuirão para a filtragem dos conteúdos:

- S1 = (T1 AND T2 AND T3 AND T4 AND T5);

Exemplificando: (("clay" OR "clay ceramic" OR "red clay ceramic" OR "clayey ceramic") AND TITLE-ABS-KEY ("burning" OR "burning process*" OR "burning stage" OR "burning phase") AND TITLE-ABS-KEY ("humid" OR "moisture content") AND TITLE-ABS-KEY ("drying" OR "firewood" OR "biomass" OR "wood drying") AND TITLE-ABS-KEY ("efficiency" OR "calorific efficiency")).

- S2 = (T1 AND T2 AND T3 AND T4);
- S3 = (T1 AND T2 AND T4 AND T5);
- S4 = (T1 AND T3 AND T4 AND T5);
- S5 = (T2 AND T3 AND T4 AND T5);
- S6 = (T1 AND T2);
- S7 = (T1 AND T3);
- S8 = (T1 AND T4);
- S9 = (T1 AND T5);
- S10 = (T2 AND T3);
- S11 = (T2 AND T4);
- S12 = (T2 AND T5);
- S12 = (T3 AND T4);
- S13 = (T3 AND T5);
- S14 = (T4 AND T5).

3.2.1.4 Aplicação do método de pesquisa

Nesta pesquisa foram utilizadas as bases de dados Scopus[®] e Scielo, tal escolha justifica-se pelo fato destas bases serem o maior banco de dados de resumos e citações de literaturas revisadas, tais como periódicos e livros (ELSEVIER, 2020). As bases foram

utilizadas em conjunto de forma que fosse garantida uma boa sondagem dentro e fora do território brasileiro, compreendendo o estado da arte no âmbito mundial. Após as pesquisas, foram encontradas as seguintes quantidades de documentos para cada uma das *Strings* criadas.

- $S1 = 3$
- $S2 = 6$
- $S3 = 11$
- $S4 = 38$
- $S5 = 124$
- $S6 = 1.229$
- $S7 = 6.814$
- $S8 = 9.517$
- $S9 = 10.936$
- $S10 = 1.418$
- $S11 = 18.525$
- $S12 = 9.687$
- $S13 = 11.621$
- $S14 = 72.266$

O diagrama de Venn possibilita a visualização de propriedades e de relações entre um número finito de conjuntos (MARTINS, 2014). Para melhor entendimento, os resultados encontrados a partir das *Strings* de buscas estão dispostos no formato definido por Venn, conforme demonstrado na Figura 13.

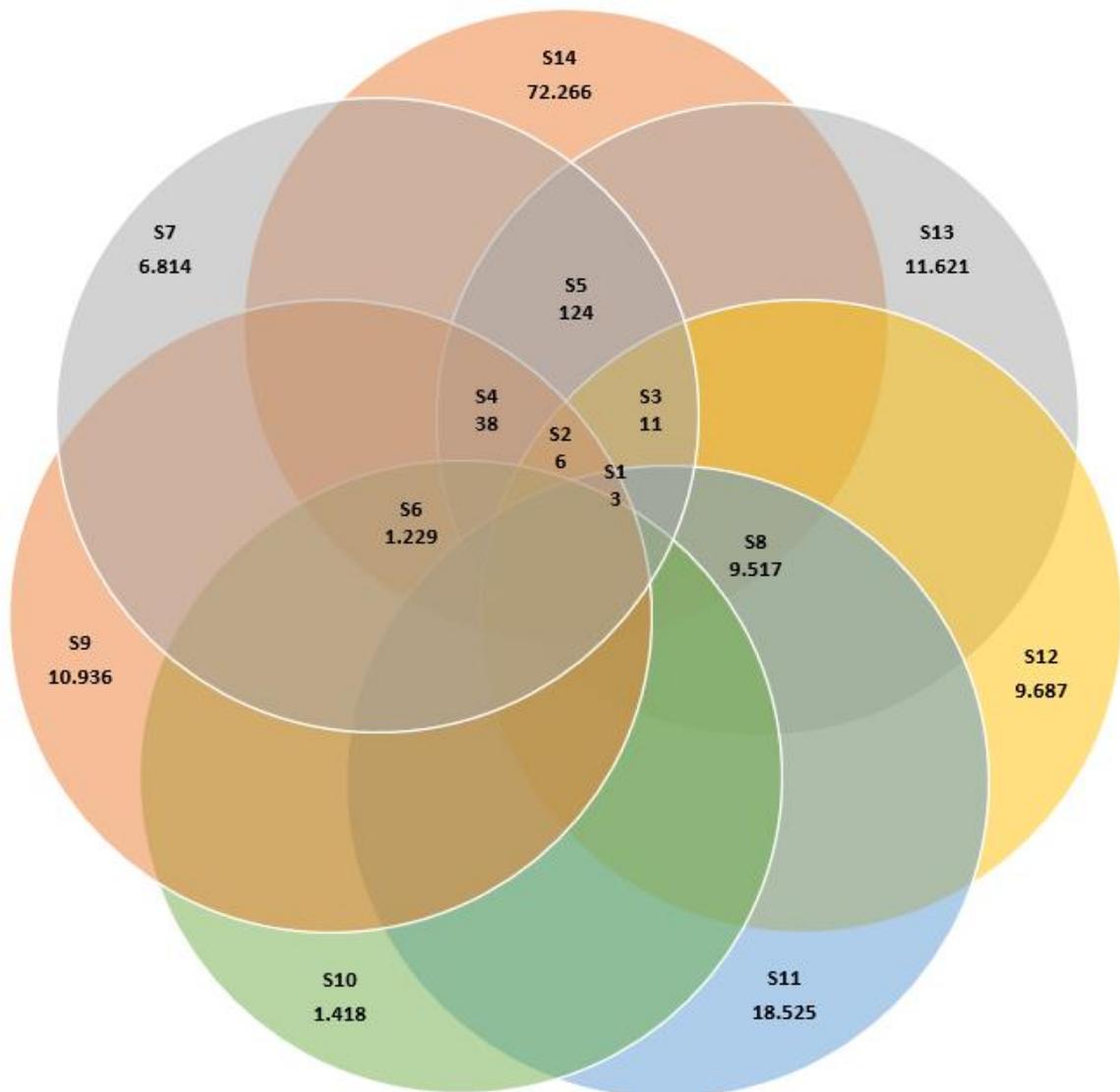


Figura 13 - Diagrama de Venn para as *strings* de busca

Fonte: O autor (2022).

Conforme observado na Figura 13, foram encontrados apenas 3 documentos associando todos os termos de busca, no entanto, os trabalhos não abordam o problema de pesquisa proposto neste estudo. Posteriormente, precedeu-se análise dos títulos, palavras-chave e resumos dos artigos. Observou-se que, em relação a indústria cerâmica, os estudos estão voltados predominantemente para a melhoria da etapa da queima, uma vez que, é nesta etapa que são conferidas as peças cerâmicas suas características técnicas e estéticas finais.

Além dos artigos encontrados por meio da busca relatada, também foram realizadas pesquisas de publicações acadêmicas relacionadas aos temas-chaves e *strings* de busca no *Google Acadêmico*, bem como relatórios do setor cerâmico nacional e regional elaborados por

órgãos oficiais como o ABCERAM, ANICER, ANFACER, RCC, dentre outros, na plataforma de pesquisa *Google*.

3.2.2 Definição do objeto de pesquisa

A partir do referencial teórico aqui apresentado e compreensão do cenário cerâmico e de sua importância na economia brasileira e regional, foram realizadas visitas técnicas a empresa Arte Cerâmica Sardinha, situada no distrito de São Sebastião, no município de Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro. Através de entrevistas não estruturadas e observação assistemática pôde-se observar todo o embasamento teórico sendo colocado em prática. Durante as visitas, o processo de queima cerâmico, bem como as temperaturas dispostas nos fornos ao longo das queimas e o armazenamento das madeiras utilizadas para tal finalidade, foram detalhadamente observados e estudados, sendo assim, as variáveis já controladas pelo sistema foram acompanhadas e os detalhes do processo produtivo de como são implementados na empresa atualmente foram compreendidos.

Ao final das visitas técnicas observou-se que as madeiras utilizadas como combustíveis para alimentar os fornos cerâmicos são armazenadas ao ar livre (Figura 14), ficando à mercê das condições climáticas. Ressalta-se que as madeiras não recebem nenhum tipo de tratamento ou secagem prévia antes de serem introduzidas nos fornos, diminuindo assim, sua eficiência energética e conseqüentemente, aumentando seu consumo.



Figura 14 - Pátio de armazenagem da madeira

Fonte: O autor (2022).

Antes da realização da queima, as toras são transportadas do pátio para as laterais dos fornos e organizadas em suporte de 2,7 m³ cada para controle da quantidade de madeira consumida por queima, conforme identificado na Figura 15.



Figura 15 - Suportes de toras para controle de quantidade de madeira queimada

Fonte: O autor (2021).

3.2.3 Levantamento de dados dos fornos

A empresa Arte Cerâmica Sardinha, objeto deste estudo possui em sua estrutura, quatro fornos tipo abóboda (Figura 16), sendo três deles alimentados com madeira de eucalipto e um com madeira e pó de serra. Dessa forma, a análise é direcionada para eficiência da combustão nos fornos que utilizam o eucalipto, visto que compõe aproximadamente 90% do processo produtivo.



Figura 16 – Forno abóboda

Fonte: O autor (2022).

O forno abóboda utilizado neste estudo foi construído com tijolos maciços comuns e apresenta duas portas opostas para inserção e retirada dos produtos cerâmicos e, quatro fornalhas feitas com tijolos refratários (Figura 17) dispostas 90° entre si nas quais são colocadas três toras por hora do início ao final do processo de queima dos produtos cerâmicos. A exaustão dos gases gerados pelo forno é feita na parte inferior, através de uma depressão causada por uma chaminé, sendo assim, o fluxo de gases quentes é o inverso do que seria o natural (fluxo inverso – de cima para baixo). A abertura desta comporta determina aspectos decisivos para a eficiência do processo de queima, tais como, deslocamento dos gases provenientes da queima e a necessidade de alimentação.



Figura 17 - Fornalhas

Fonte: O autor (2022).

O comportamento térmico do forno intermitente tipo abóboda em estudo, é obtido por meio de seis termopares, tipo K. Na porta 1 estão instalados três termopares: C0 (superior), M1 (meio), M4 (inferior), enquanto na porta 2 existem apenas dois: M2 (meio) e C3 (superior), e por fim, na parte superior da abóboda encontra-se instalado um termopar (T9). Estes termopares estão conectados a um indicador de temperatura, responsável pelo monitoramento da evolução da mesma no interior do forno, conforme observado na Figura 18. Durante a visita técnica foram obtidas as curvas de temperatura do forno, sendo estas apresentadas na seção 4.2.



Figura 18 - Posicionamento dos termopares instalados no forno em estudo

Fonte: Adaptado de Henriques Junior *et al.* (2015)

Conforme ressaltado anteriormente, a empresa Arte Cerâmica Sardinha conta com mais três fornos intermitentes tipo abóboda e um forno do tipo paulistinha. A empresa produz diferentes tipos de produtos cerâmicos, tais como, tijolo maciço, cobogó, plaquetas, ladrilhos e blocos de vedação, dentre os quais, o tijolo maciço apresenta maior demanda, correspondendo a cerca de 80% do faturamento da empresa.

3.2.4 Levantamento de dados da madeira utilizada na queima

Em visita técnica realizada no dia 13 de abril de 2022 nas instalações da empresa foi constatado que cada queima requer 39 m^3 de madeira como combustível para o forno que permaneça em funcionamento até que todos os termopares apresentem temperatura igual ou superior a $700 \text{ }^\circ\text{C}$. Este processo de queima dura em torno de 96 horas.

A madeira utilizada pela empresa e coletada para realização deste estudo foi a espécie *Eucalypto urograndis*, compradas da empresa Aracruz Celulose, localizada no município de Aracruz, Espírito Santo, Brasil. Para dar seguimento a pesquisa, um tratamento estatístico baseado na norma NBR 7190 (BRASIL, 1997) é aplicado para se estimar o valor médio de teor de umidade presente nas madeiras utilizadas nos fornos cerâmicos. Conforme descrito na norma NBR 7190 (BRASIL, 1997) as amostras foram coletadas do estoque de forma aleatória. A Figura 19 mostra as toras extraídas do pátio.



Figura 19 - Toras de Amostragem

Fonte: O autor (2021).

O teor de umidade presente na madeira utilizada como combustível nos fornos cerâmicos é estimado através de medidas de quantidade de água livre e água de impregnação contidas nos corpos de prova da amostra de madeira coletada no estoque da empresa. A água de constituição química só pode ser removida através da carbonização ou queima da biomassa gerando de perda significativa de biomassa para combustão e não compões o objetivo deste estudo que tem o interesse de investigar o ganho em poder calorífico do biocombustível através de sua secagem.

Para se medir o teor de umidade com confiabilidade e da maneira correta os procedimentos são baseados na norma NBR 7190 (BRASIL, 1997). O procedimento está descrito a seguir.

3.2.4.1 Corpos de prova

Os corpos de prova são cortados em pequenos blocos de 5 centímetros de comprimento, 2 centímetros de largura e 3 centímetros de altura no centro do material de coleta obedecendo os seguintes parâmetros:

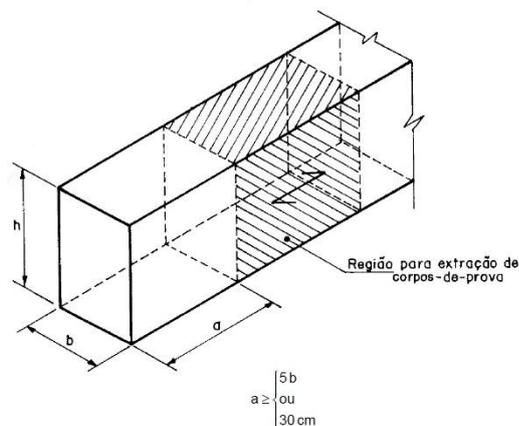


Figura 20 - Esquema para extração dos corpos de prova (NBR 7190)

Fonte: NBR 7190 (1997).

A Figura 21 mostra o corte feito em uma das toras da amostra coletada para extração da região de coleta dos corpos de prova. Para tal procedimento foi utilizado a serra circular.



Figura 21 - Esquema para extração dos copos de prova (NBR 7190)

Fonte: O autor (2022).

Cada corpo de prova deve ter 5 centímetros de comprimento e sua seção transversal deve ser um retângulo de 2 centímetros de largura e 3 centímetros de altura conforme apresentado na Figura 22.

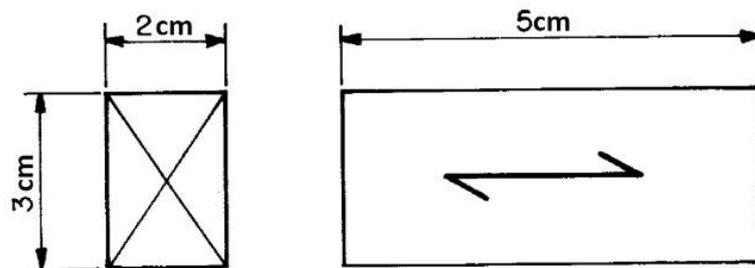


Figura 22 - Dimensões dos copos de prova

Fonte: NBR 7190 (1997).

Os corpos de provas foram extraídos com o auxílio de uma plaina e uma serra de fita. O procedimento é ilustrado na Figura 23. E posteriormente os corpos de prova foram lixados e embalados a vácuo (Figura 24) para passarem pelo processo de pesagem e secagem, dando seguimento ao estudo.

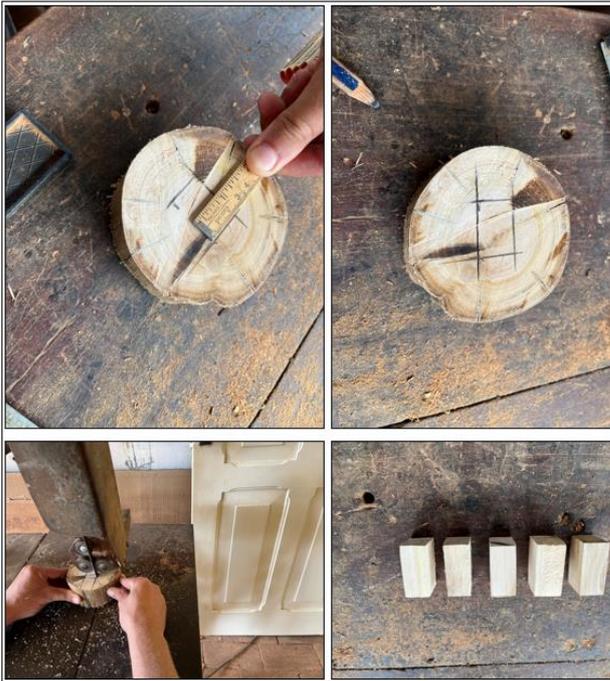


Figura 23 - Extração dos copos de prova

Fonte: O autor (2022).

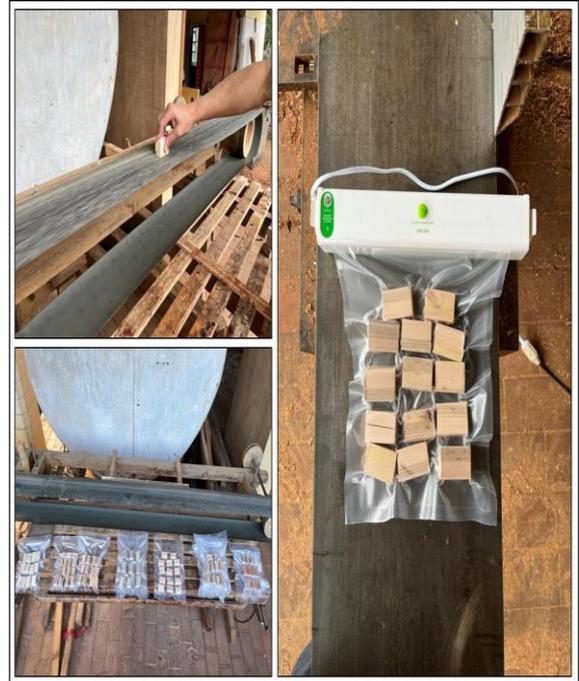


Figura 24 - Lixamento e embalagem dos corpos de prova

Fonte: O autor (2022).

3.2.5 Processo de secagem da madeira

Para realização deste estudo foram selecionados 30 corpos de prova (identificados como 1, 2, 3, 4, etc.) para se estimar o teor de umidade médio presente na madeira, utilizada como combustível para os fornos cerâmicos tipo abóboda. A massa de cada corpo de prova é medida com auxílio de uma balança de precisão digital com precisão de 0,01 gramas (Figura 23) conforme descrito na norma NBR 7190 (BRASIL, 1997). Esta massa inicial corresponde a massa úmida dos corpos de prova, ou seja, sem nenhum tratamento, da mesma forma que é utilizada atualmente no processo produtivo da cerâmica.

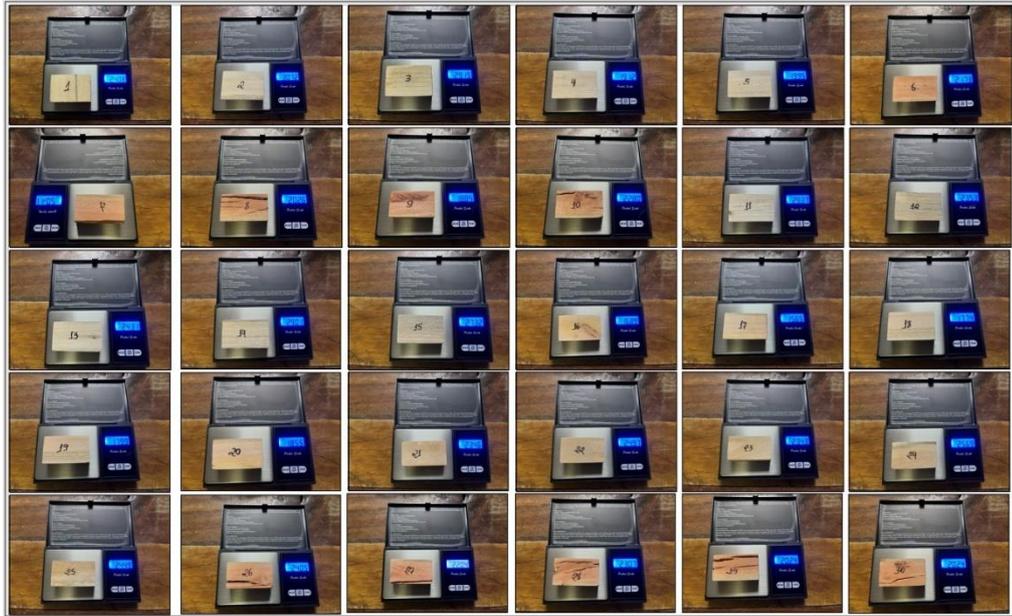


Figura 25 - Pesagem dos corpos de prova úmidos

Fonte: O autor (2022).

Posteriormente os corpos de prova foram levados para um forno elétrico para secagem (Figura 26). A norma NBR 7190 (BRASIL, 1997) recomenda que a secagem seja feita entre 101°C e 105°C de temperatura durante intervalos de seis horas. A cada seis horas os corpos de prova foram retirados da estufa e pesados novamente na balança de precisão até que a redução de massa de cada componente fosse considerada irrelevante, ou seja, menor ou igual a 0,5%.



Figura 26 - Secagem dos corpos de prova

Fonte: O autor (2021).

As figuras de 27 a 31 demonstram as etapas de pesagem periódica dos corpos de prova após seis horas de secagem. O procedimento foi repetido até que se completasse trinta horas no forno.



Figura 27 - Pesagem dos corpos de prova após 6 horas de secagem

Fonte: O autor (2022).

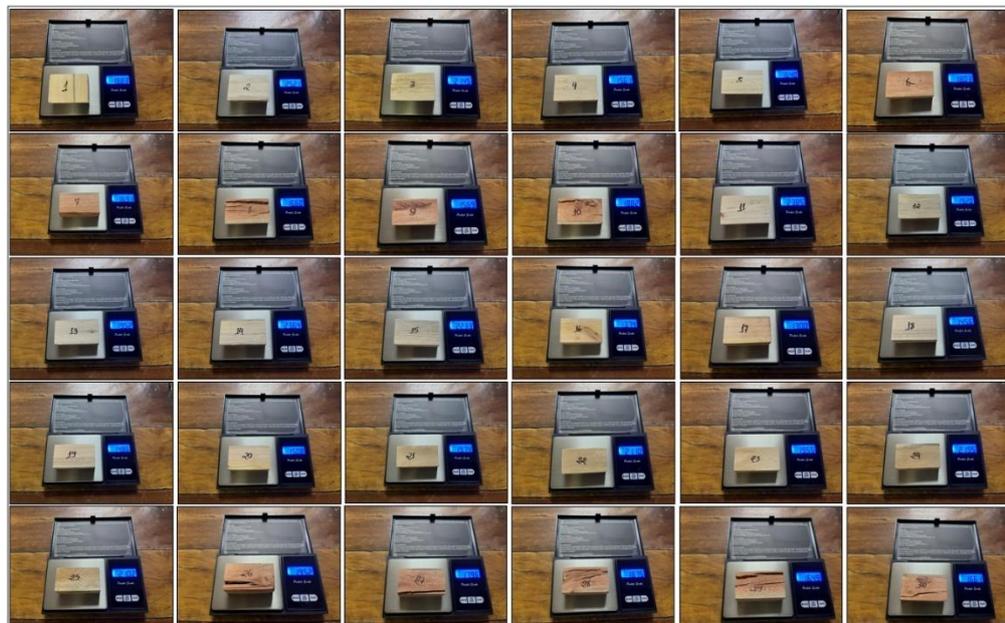


Figura 28 - Pesagem dos corpos de prova após 12 horas de secagem

Fonte: O autor (2022).



Figura 29 - Pesagem dos corpos de prova após 18 horas de secagem

Fonte: O autor (2022).

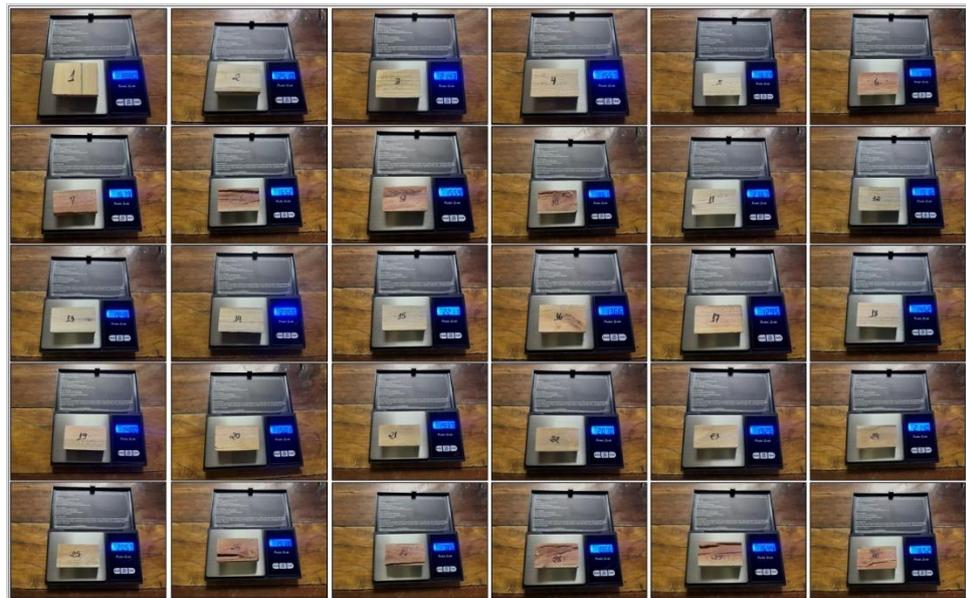


Figura 30 - Pesagem dos corpos de prova após 24 horas de secagem

Fonte: O autor (2022).

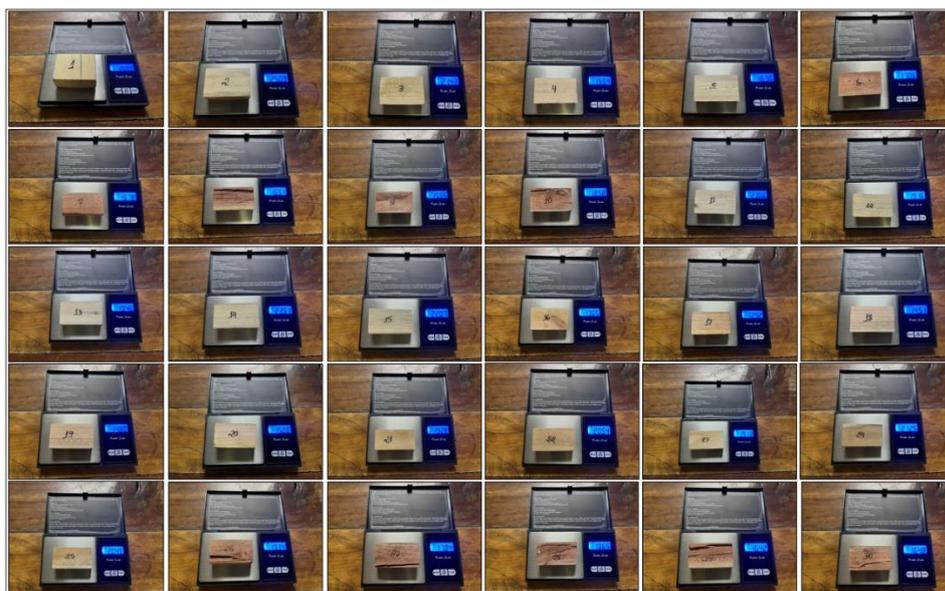


Figura 31 - Pesagem dos corpos de prova após 30 horas de secagem

Fonte: O autor (2022).

No final do processo de pode-se obter os dados de umidade removida de cada elemento para estimativa estatística do teor de umidade do lote de lenha. Os corpos foram numerados de um a trinta de os valores obtidos no experimento serão mostrados nos resultados deste trabalho.

3.2.5.1 Levantamento de dados do forno utilizado para secagem da madeira

Foi utilizado um forno elétrico doméstico da marca Philco (Figura 26), modelo PFE17P preto, com dimensões externas de 257 x 403 x 287 mm, capacidade interna de 17 L, peso de 2,8 kg e, seletor de temperatura de até 230° C com quatro modos de seleção de resistência: inferior, superior, inferior e superior. Apresenta também, *timer* de 60 minutos, interior galvanizado e potência útil de 1200 W. Ressalta-se que por conter um timer de 60 minutos a cada hora de secagem era necessário acionar o *timer* novamente, para que as seis horas de secagem não obtivessem interrupção.

3.2.6 Teor de umidade

Obtidos os dados de massa inicial (pré-secagem) e massa final (pós-secagem), é possível calcular através da Equação 3, estabelecida pela NBR 7190 (BRASIL, 1997), o

percentual de água removida do material, ou seja, o teor de umidade que estava presente no corpo.

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_s} \quad (3)$$

Esta equação é utilizada para calcular o teor de umidade na base seca. Já a equação 4 permite obter o teor de umidade na base úmida.

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_i} \quad (4)$$

Onde, m_i é massa inicial da madeira em gramas antes da secagem, m_s a massa final da madeira em gramas após a secagem e U o teor de umidade presente na madeira.

Os resultados dos cálculos de teor de umidade são avaliados para classificar a amostra de acordo com o Quadro 2:

Quadro 2 - Classificação da madeira em relação ao teor de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente (U_{amb})	Umidade de equilíbrio da madeira (U_{eq})
1	$\leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: NBR 7190 (1997).

As massas pré e pós-secagem são medidas através de uma balança de precisão com exatidão de 0,01 gramas de acordo com a norma NBR 7190 (BRASIL, 1997), conforme exposto acima.

Os valores de teor de umidade obtidos a partir dos corpos de prova foram inseridos na equação 5, estabelecida pela NBR 7190 (BRASIL, 1997) para estimativa do teor de umidade médio do lote de madeira utilizado pela empresa cerâmica. Se o número de corpos de prova for ímpar o maior valor obtido será excluído. Os valores inseridos na equação 4 devem estar em ordem crescente de acordo com a norma.

$$U_m = \left[2 \times \left(\frac{U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} \right) - U_{\frac{n}{2}} \right] \times 1,1 \quad (5)$$

Dessa forma, aplicando esta equação na amostra contendo 30 corpos de prova, os quinze menores valores de teor de umidade compuseram o cálculo da estimativa da média de umidade do lote de lenha disposto no pátio da companhia cerâmica.

Após obter-se uma estimativa razoável do teor de umidade média da madeira usada como combustível para os fornos cerâmicos, o próximo passo é avaliar a sensibilidade de ganho energético de redução de custo da energia térmica em relação ao teor de umidade da biomassa.

A densidade energética, que reflete o potencial térmico do biocombustível, é obtida a partir da Equação 6 (MOREIRA, 2012):

$$DE = \frac{DB \times \left[(PCS - 324) \times \frac{(100 - U)}{100} - 6 \times U \right]}{FE \times 10^6} \quad (6)$$

Sendo:

DE: Densidade energética

DB: Densidade básica

PCS: Poder calorífico superior

FE: Fator de empilhamento

De acordo com a modelagem apresentada acima, percebe-se que a densidade energética da madeira depende do seu teor de umidade. Dessa forma, é possível estimar o ganho em energia térmica quando se realiza a redução do teor de umidade da lenha através de algum processo prévio de secagem.

Este experimento foi realizado (MOREIRA, 2012) para a espécie de *Eucalypto urograndis*, objeto de estudo deste trabalho, e a curva DE x U será apresentada no próximo capítulo.

O custo da energia, que reflete os gastos com a obtenção de energia térmica para aquecimento dos fornos cerâmicos, é obtida a partir da Equação 7 (MOREIRA, 2012):

$$CE = \frac{(Preço \times FE \times 10^6)}{DB \times \left[(PCS - 324) \times \left(\frac{100 - U}{100} \right) - 6 \times U \right]} \quad (7)$$

Sendo:

CE: Custo da energia

FE: Fator de empilhamento

DB: Densidade básica

PCS: Poder calorífico superior

U: Teor de umidade

De acordo com a modelagem apresentada acima, percebe-se que custo da madeira depende do seu teor de umidade. Dessa forma, é possível estimar a economia financeira para a empresa quando se realiza a redução do teor de umidade da lenha através de algum processo prévio de secagem.

Estes cálculos foram realizados (MOREIRA, 2012) para a espécie de eucalipto urograndis, objeto de estudo deste trabalho, e a curva CE x U será apresentada no próximo capítulo.

Para reforçar a significativa influência da umidade do biocombustível no potencial energético e no custo para de gerar energia térmica a partir dele, pode-se observar a sensibilidade do poder calorífico em relação ao teor de umidade mostrado anteriormente na figura 9 em um estudo realizado para outro tipo de espécie de madeira que reportou a relação descrita pela equação 8.

$$Y = - 0,1858 X + 19,367 \quad (8)$$

Sendo:

Y: Poder calorífico superior

X: Teor de umidade na base úmida

Os resultados obtidos a partir da aplicação do método descrito neste capítulo será apresentado a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos dados obtidos após secagem dos corpos de prova

A secagem da madeira é um entrave em sua utilização, principalmente para produção de peças cerâmicas. A ausência do controle da secagem e, conseqüentemente queima de madeiras com elevados teores de umidade resultam no decréscimo da produtividade dos fornos cerâmicos, redução da eficiência energética da conversão e aumento das emissões de gases durante a decomposição térmica da madeira (SIQUEIRA, 2021). Na maioria das indústrias a secagem da madeira é realizada de forma natural, ao livre, devido ao menor custo envolvido, no entanto, demanda longos períodos (>120 dias) para que a umidade esteja próxima ao recomendado (<30%) (ZANUNCIO *et al.*, 2013), sendo o ideal, submeter a queima madeiras com o menor teor de umidade possível.

Alternativas para secagem da madeira foram desenvolvidas ao longo dos anos. Os secadores convencionais, desumidificadores e secadores a vácuo são relatados por Jankowky (1995) e já consolidados tecnologicamente. Além deste, estufas solares (STANGERLIN *et al.*, 2012), fornos convencionais, micro-ondas e túneis de secagem contínua (CAVALCANTE; NAVEIRO, 2014; TALGATTI *et al.*, 2020; SIQUEIRA, 2021) são alternativas desenvolvidas e alvo de inúmeras pesquisas.

Este estudo optou pela secagem em forno convencional e, o procedimento de secagem durou 30 horas conforme descrito nos métodos deste estudo. O Quadro 3 apresenta os valores da massa de cada corpo de prova antes da primeira secagem, e os quadros de 4 a 8 apresentam os valores de massa obtidos e os percentuais de umidade extraídos a cada seis horas de secagem na estufa.

Quadro 3 - Pesagem dos corpos de prova antes da secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Antes da Secagem			
Corpo de Prova	Massa Úmida (Gramas)	Corpo de Prova	Massa Úmida (Gramas)
1	24,08	16	16,89
2	30,72	17	15,65
3	29,15	18	17,74
4	19,12	19	17,99
5	19,95	20	18,55
6	21,73	21	23,46
7	20,41	22	24,97
8	20,26	23	23,43
9	18,85	24	25,69
10	22,80	25	24,49
11	29,37	26	24,05
12	23,53	27	22,04
13	24,31	28	23,07
14	29,01	29	20,24
15	27,32	30	20,24

Fonte: O autor (2022).

Observa-se que as amostras 2, 3, 11, 14, 15, 24 apresentavam massa úmida (gramas) superior a 25 gramas (g), sendo respectivamente, 30,72 g, 29,15 g, 29,37 g, 29,01 g, 27,32 g e 25,69 g. As demais amostras deste estudo apresentaram massa úmida entre 15 e 25 gramas. Talgatti *et al.* (2020) ressaltam que as características das amostras exercem influência direta nos resultados obtidos e devem ser levadas em conta em todos os programas de secagem, seja ao ar livre ou em fornos convencionais. A densidade aparente da madeira no gênero *Eucalyptus* varia entre 0,40 e 1,20 g/cm³, podendo ser classificada como leve, média e pesada de acordo com o valor obtido (GONÇALEZ *et al.*, 2014). A madeira do híbrido *Eucalypto urograndis* apresenta valores médios de fibras (0,90 mm) e de densidade básica (0,510 g/cm³) dentro do esperado para o gênero *Eucalyptus* (BHAT *et al.*, 1990). Há de se esperar que a madeira com maior densidade básica tenha células anatômicas com paredes celulares mais espessas e menos espaços internos para circulação da água, refletindo na demora e dificuldade da secagem (ZANUNCIO *et al.*, 2016).

De acordo com Siqueira (2021) a secagem da madeira é influenciada por inúmeros fatores, alguns inerentes ao método de secagem, outros à própria madeira, o que objetiva a homogeneização ou redução destes para a obtenção de resultados eficientes. A massa específica da madeira, é uma das principais propriedades para escolha de espécies utilizadas como combustíveis em fornos cerâmicos.

No Quadro 4 são mostrados o teor de umidade retirado da amostra após 6 horas de secagem, bem como, a massa e a variação das mesmas. Tal resultado foi verificado pela razão da massa inicial e a encontrada após o período de secagem.

Quadro 4 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 6 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 6 Horas de Secagem							
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Varição da Massa (%)	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Varição da Massa (%)
1	18,90	27,41%	21,51%	16	14,01	20,56%	17,05%
2	25,97	18,29%	15,46%	17	13,20	18,56%	15,65%
3	21,79	33,78%	25,25%	18	14,84	19,54%	16,35%
4	15,86	20,55%	17,05%	19	15,11	19,06%	16,01%
5	16,63	19,96%	16,64%	20	15,37	20,69%	17,14%
6	18,53	17,27%	14,73%	21	20,49	14,49%	12,66%
7	17,38	17,43%	14,85%	22	21,91	13,97%	12,25%
8	16,81	20,52%	17,03%	23	20,35	15,14%	13,15%
9	16,00	17,81%	15,12%	24	22,91	12,13%	10,82%
10	19,32	18,01%	15,26%	25	21,89	11,88%	10,62%
11	24,64	19,20%	16,10%	26	20,00	20,25%	16,84%
12	19,42	21,16%	17,47%	27	18,26	20,70%	17,15%
13	19,77	22,96%	18,68%	28	19,07	20,98%	17,34%
14	24,24	19,68%	16,44%	29	16,75	20,84%	17,24%
15	23,21	17,71%	15,04%	30	17,00	19,06%	16,01%

Fonte: O autor (2022).

Nota-se que após as primeiras 6 (seis) horas de secagem o maior teor de umidade retirado foi verificado na Amostra 3 com 33,7%. Dentre as demais amostras apenas 11 apresentaram teor de umidade superior a 20%, sendo: 1 (27,41%), 4 (20,55%), 8 (20,52%), 12 (21,16%), 13 (22,96%), 16 (20,56%), 20 (20,69%), 26 (20,25%), 27 (20,70%), 28 (20,98%) e 29 (20,84%). O teor de umidade inicial interfere na velocidade de secagem. Amostras com alto de teor de umidade inicial levam mais tempo para secar, conforme observado por Oliveira e Sales (2005), corroborando com os primeiros resultados encontrados neste estudo.

A variação observada entre o teor de umidade das amostras pode ser considerada normal, uma vez que, as amostras foram obtidas de 6 (seis) toras diferentes que não possuíam controle de estocagem no pátio, transporte até o forno e condições climáticas. O teor de umidade médio encontrado entre as 30 amostras está de acordo com o gênero da madeira utilizada neste estudo, sendo, *Eucalyptus urograndis* que apresenta um teor de umidade satisfatório de até 40% (LOPES *et al.*, 2017).

Vital (1985) em seu estudo analisou a secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis*, aos 5 anos de idade, em Viçosa – MG e constataram que as toras com diâmetro superior a 12 cm apresentaram teor de umidade superior a 50%, enquanto, toras com menores

tamanhos apresentaram umidade entre 16 e 27%. Este estudo corrobora com os dados aqui obtidos, onde, e o teor de umidade após o processo de secagem de 6 horas variou entre 10% e 35%.

Pertuzzatti *et al.* (2017) ponderam que com a redução do teor de umidade as propriedades mecânicas da madeira aumentam, podendo ser justificado pela elevação do adensamento e da rigidez das paredes celulares, bem como, da porcentagem de material lenhoso, originado pela perda de água e contração da madeira.

O Quadro 5 apresenta o teor de umidade retirado dos corpos de prova após 12 horas de secagem, bem como, a massa e sua variação. Goulart e Magossi (2019) ponderam que o teor de umidade não é uma característica específica da madeira, no entanto, o estudo desta variável é indispensável por tratar-se de um parâmetro que afeta o comportamento da madeira, durante as fases de processamento, secagem e preservação.

Quadro 5 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 12 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 12 Horas de Secagem							
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Variação da Massa (%)	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Variação da Massa (%)
1	18,83	27,88%	0,37%	16	13,74	22,93%	1,93%
2	25,21	21,86%	2,93%	17	13,00	20,38%	1,52%
3	21,45	35,90%	1,56%	18	14,56	21,84%	1,89%
4	15,61	22,49%	1,58%	19	14,86	21,06%	1,65%
5	16,40	21,65%	1,38%	20	15,08	23,01%	1,89%
6	18,03	20,52%	2,70%	21	19,74	18,84%	3,66%
7	16,91	20,70%	2,70%	22	21,10	18,34%	3,70%
8	16,60	22,05%	1,25%	23	19,55	19,85%	3,93%
9	15,69	20,14%	1,94%	24	21,95	17,04%	4,19%
10	18,82	21,15%	2,59%	25	21,02	16,51%	3,97%
11	23,85	23,14%	3,21%	26	19,52	23,21%	2,40%
12	19,20	22,55%	1,13%	27	17,96	22,72%	1,64%
13	19,52	24,54%	1,26%	28	18,75	23,04%	1,68%
14	23,64	22,72%	2,48%	29	16,49	22,74%	1,55%
15	22,33	22,35%	3,79%	30	16,61	21,85%	2,29%

Fonte: O autor (2022).

Levando-se em consideração os dados obtidos após 12 horas de secagem nota-se que apenas a amostra 3 apresentou um teor de umidade superior a 35% e, unicamente, a amostra 1 apresentou variação da massa inferior e 0,5%, sendo necessário, realizar a secagem das amostras por mais 6 horas. Oliveira *et al.* (2017) em seu estudo, avaliaram 5 temperaturas (50°, 75°, 100°, 125° e 150° C) na secagem de toras de *Eucalyptus urophylla* e observaram o aumento da taxa de secagem em função do aumento de temperatura. Os maiores valores de

taxa de secagem foram alcançados em temperaturas de 125 e 150 ° C, sendo 1,64 e 1,67 % hora⁻¹. Com base neste estudo, quanto maior a temperatura, maior a velocidade de secagem, uma vez que, o calor é a fonte por meio do qual as moléculas de água na madeira adquirem energia cinética necessária para evaporação.

Seguindo a NBR 7190 (BRASIL, 1997) as amostras foram submetidas a mais 6 horas de secagem no forno. O Quadro 6 traz as informações da massa das amostras, bem como teor de umidade e, por fim, variação da massa. Sendo o último, o parâmetro considerado para que o processo de secagem continue por mais 6 horas, ou seja dado por encerrado.

Quadro 6 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 18 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 18 Horas de Secagem							
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Varição da Massa (%)	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Varição da Massa (%)
1	18,81	28,02%	0,11%	16	13,68	23,46%	0,44%
2	25,11	22,34%	0,40%	17	12,97	20,66%	0,23%
3	21,44	35,96%	0,05%	18	14,52	22,18%	0,27%
4	15,58	22,72%	0,19%	19	14,83	21,31%	0,20%
5	16,38	21,79%	0,12%	20	15,01	23,58%	0,46%
6	17,97	20,92%	0,33%	21	19,46	20,55%	1,42%
7	16,80	21,49%	0,65%	22	20,79	20,11%	1,47%
8	16,52	22,64%	0,48%	23	19,36	21,02%	0,97%
9	15,60	20,83%	0,57%	24	21,58	19,05%	1,69%
10	18,67	22,12%	0,80%	25	20,70	18,31%	1,52%
11	23,68	24,03%	0,71%	26	19,38	24,10%	0,72%
12	19,16	22,81%	0,21%	27	17,87	23,34%	0,50%
13	19,50	24,67%	0,10%	28	18,67	23,57%	0,43%
14	23,57	23,08%	0,30%	29	16,44	23,11%	0,30%
15	22,16	23,29%	0,76%	30	16,52	22,52%	0,54%

Fonte: O autor (2022).

Observa-se que, no Quadro 6, apenas a amostra 3 continuou apresentando um teor de umidade superior a 35%, em contrapartida, sua variação de massa foi inferior a 0,10%. Após as 18 horas de secagem foi identificado que apenas as amostras 7, 9, 10, 11, 15, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 30 apresentaram variação de massa superior a 0,5%, e, as demais, apresentaram variação de massa inferior a 0,5%. Conforme estabelecido pela NBR ABNT 7190 (BRASIL, 1997) as amostras foram submetidas a mais 6 horas de secagem, uma vez que, a variação de massa deve ser inferior a 0,5% por duas medições consecutivas.

Trevisan *et al.* (2008) ressaltam que as causas da alteração deste parâmetro podem ser diretas ou indiretas, podendo ocorrer pela modificação de outras características da própria madeira, em detrimento da espécie ou pela influência do meio ambiente em que ela se desenvolve ou é armazenada. Bodig e Jayne (1982) em seu estudo notaram que podem ocorrer

variações significativas da massa da madeira, principalmente em espécies do mesmo gênero e, até mesmo, entre diferentes partes da mesma árvore. Em contrapartida, Malan e Hoon (1992) verificaram em seu estudo que a massa específica básica da madeira cresce no sentido medula-casca, apresentando valores médios maiores nas regiões próximas a casca.

O Quadro 7 apresenta os valores da massa, bem como, variação da mesma e teor de umidade das amostras submetidas a 24 horas de queima. Conforme visto anteriormente, o processo só deve ser interrompido quando as amostras apresentarem variação de massa inferior a 0,5% por duas vezes consecutivas, para que o estudo seja dado como encerrado.

Quadro 7 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 24 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 24 Horas de Secagem							
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Variação da Massa (%)	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Variação da Massa (%)
1	18,80	28,09%	0,05%	16	13,66	23,65%	0,15%
2	25,10	22,39%	0,04%	17	12,95	20,85%	0,15%
3	21,43	36,02%	0,05%	18	14,52	22,18%	0,00%
4	15,57	22,80%	0,06%	19	14,80	21,55%	0,20%
5	16,37	21,87%	0,06%	20	15,01	23,58%	0,00%
6	17,88	21,53%	0,50%	21	19,37	21,12%	0,46%
7	16,79	21,56%	0,06%	22	20,70	20,63%	0,43%
8	16,52	22,64%	0,00%	23	19,25	21,71%	0,57%
9	15,59	20,91%	0,06%	24	21,40	20,05%	0,83%
10	18,61	22,51%	0,32%	25	20,57	19,06%	0,63%
11	23,67	24,08%	0,04%	26	19,38	24,10%	0,00%
12	19,16	22,81%	0,00%	27	17,85	23,47%	0,11%
13	19,48	24,79%	0,10%	28	18,66	23,63%	0,05%
14	23,55	23,18%	0,08%	29	16,44	23,11%	0,00%
15	22,11	23,56%	0,23%	30	16,52	22,52%	0,00%

Fonte: O autor (2022).

Observa-se que no Quadro 6, apenas 12 amostras não apresentaram variação de massa inferior a 0,5% e, nesta etapa, apenas as amostras 23, 24 e 26. Neste sentido, todas as amostras foram submetidas a mais 6 horas de secagem, para verificar se as amostras citadas acima realmente não atenderiam ao esperado pela NBR 7190 (BRASIL, 1997). Valcorte (2021) ressalta que as madeiras do gênero *Eucalyptus* são de difícil secagem, justificando a necessidade de um longo período para execução deste experimento. Já, Zen *et al.* (2019) afirmam que o comportamento das madeiras da espécie de *Eucalyptus urograndis* durante a remoção da água é único e diferente das demais espécies. Em função disso, muitas indústrias optam por outras espécies de madeira para serem utilizadas como combustível. Em contrapartida, para que as espécies deste gênero sejam mais bem aproveitadas, a secagem da

madeira ao ar livre ou em fornos e estufas, apresenta-se como alternativa para melhoria e eficiência energética.

Outro ponto a ser destacado é que, após 24 horas de secagem, apenas as amostras 1 e 3 apresentaram um teor de umidade superior a 27%, sendo, respectivamente 28,09% e 36,02%. No entanto, apenas na amostra 1 verificou-se a variação de massa, passando de 0,11% para 0,05% e, na amostra 3 a mesma permaneceu inalterada quando comparada a última análise. As demais amostras apresentaram um teor de umidade entre 19% e 25%. Para Jankowsky (1995) o tempo entre o início da secagem da madeira e a obtenção da umidade desejada depende de fatores que envolvem as características entre as diferentes espécies, entre cerne e alburno da mesma espécie, como a umidade relativa da atmosfera que a circunda, o teor de extrativos, a altura e o comprimento da pilha, o pátio e as condições climáticas.

No Quadro 8 são identificados os valores de massa, bem como sua variação e, o teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 30 horas de secagem. Donato (2013) pondera que qualquer material lenhoso recolhido recentemente no pátio de armazenamento apresenta uma quantidade considerável de água, que, para utilização na maioria dos casos, deve ser em parte removida. Sua concentração, no entanto, depende da espécie, da idade da árvore e da posição no tronco.

Quadro 8 - Valores de massa e teor de umidade na base seca dos corpos de prova após 30 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 30 Horas de Secagem							
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Varição da Massa (%)	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Seca	Varição da Massa (%)
1	18,80	28,09%	0,00%	16	13,65	23,74%	0,07%
2	25,09	22,44%	0,04%	17	12,92	21,13%	0,23%
3	21,43	36,02%	0,00%	18	14,51	22,26%	0,07%
4	15,54	23,04%	0,19%	19	14,8	21,55%	0,00%
5	16,36	21,94%	0,06%	20	15,00	23,67%	0,07%
6	17,86	21,67%	0,11%	21	19,28	21,68%	0,46%
7	16,78	21,63%	0,06%	22	20,54	21,57%	0,77%
8	16,51	22,71%	0,06%	23	19,13	22,48%	0,62%
9	15,55	21,22%	0,26%	24	21,25	20,89%	0,70%
10	18,58	22,71%	0,16%	25	20,45	19,76%	0,58%
11	23,66	24,13%	0,04%	26	19,34	24,35%	0,21%
12	19,16	22,81%	0,00%	27	17,84	23,54%	0,06%
13	19,46	24,92%	0,10%	28	18,65	23,70%	0,05%
14	23,51	23,39%	0,17%	29	16,42	23,26%	0,12%
15	22,07	23,79%	0,18%	30	16,48	22,82%	0,24%

Fonte: O autor (2022).

Após 30 horas de secagem das amostras apenas os corpos de prova 22, 23, 24 e 25 apresentaram valores acima de 0,5%. Então, com o intuito de redução de recurso, esforço e tempo de experimento a secagem foi encerrada com trinta horas na estufa, visto que apenas 4 corpos de prova ainda não tiveram redução de massa abaixo do percentual estabelecido pela NBR 7190 (BRASIL, 1997) e não teria influência significativa nos resultados.

Oliveira e Sales (2005) ressaltam que a densidade e a estrutura anatômica da madeira também interferem na velocidade de secagem. As espécies com vasos e traqueídes mais abertos e abundantes favorecem a circulação da umidade e propiciam secagem mais rápida. As coníferas, no geral, secam mais rapidamente que as dicotiledôneas, o que pode ser constatado, especialmente para espécies *Pinus elliottii* e *E. urograndis*, com respectivamente, o menor e o maior tempo de secagem.

Cavalcante e Naveiro (2014) argumentam que apesar de inovadora a utilização de fornos e micro-ondas na secagem de madeira, a mesma apresenta desvantagens, sendo a mais acentuada a exigência de maior exatidão no cumprimento dos planos de conservação e manutenção observados para o funcionamento dos fornos. Vale ressaltar que, criteriosamente a condução do processo de secagem, em função principalmente das elevadas temperaturas utilizadas, além da emissão de radiação, pode acarretar um investimento mais intenso na manutenção dos fornos e no treinamento de mão de obra.

Em contrapartida, sabe-se que em condições normais, os fornos convencionais possuem níveis de segurança bastante altos. Além disso, a madeira não retém as radiações emitidas pelo forno, pois a única função é o aquecimento das moléculas de água para posterior secagem, e o que fica após o desligamento do forno é o calor. Por isso, a segurança dos aparelhos novos ou em bom estado de conservação e em uso, é a garantia de uma secagem conduzida dentro dos padrões e sem danos ao condutor do experimento (CAVALCANTE; NAVEIRO, 2014).

Com os valores de massa úmida apresentados no Quadro 4 e massa seca apresentados no Quadro 9, obtém-se o valor do teor de umidade médio do lote de lenha através da equação 5 descrita na metodologia deste estudo.

Inicialmente, antes da secagem o somatório das massas dos trinta corpos de prova era de 679,11 gramas. Após trinta horas na estufa o somatório das massas atingiu o valor de 550,62 gramas, ou seja, 128,49 gramas da massa de todos os corpos de prova eram água que evaporaram durante a secagem. Esta quantidade de água representa 23,23% da massa dos corpos de prova.

Aplicando o cálculo estatístico pela equação 5 proposta pela norma NBR 7190 (BRASIL, 1997) obtém-se o valor médio do teor de umidade do lote de lenha que alcançou 22,62%. Este valor representa o teor de umidade médio na base seca do lote de biomassa utilizado como combustível para os fornos cerâmicos. De forma análoga, obtém-se os valores de teor de umidade na base úmida e estão representadas nos Quadros de 9 a 13.

Quadro 9 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 6 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 6 Horas de Secagem					
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida
1	18,90	21,51%	16	14,01	17,05%
2	25,97	15,46%	17	13,20	15,65%
3	21,79	25,25%	18	14,84	16,35%
4	15,86	17,05%	19	15,11	16,01%
5	16,63	16,64%	20	15,37	17,14%
6	18,53	14,73%	21	20,49	12,66%
7	17,38	14,85%	22	21,91	12,25%
8	16,81	17,03%	23	20,35	13,15%
9	16,00	15,12%	24	22,91	10,82%
10	19,32	15,26%	25	21,89	10,62%
11	24,64	16,10%	26	20,00	16,84%
12	19,42	17,47%	27	18,26	17,15%
13	19,77	18,68%	28	19,07	17,34%
14	24,24	16,44%	29	16,75	17,24%
15	23,21	15,04%	30	17,00	16,01%

Fonte: O autor (2022).

Quadro 10 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 12 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 12 Horas de Secagem					
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida
1	18,83	21,80%	16	13,74	18,65%
2	25,21	17,94%	17	13,00	16,93%
3	21,45	26,42%	18	14,56	17,93%
4	15,61	18,36%	19	14,86	17,40%
5	16,40	17,79%	20	15,08	18,71%
6	18,03	17,03%	21	19,74	15,86%
7	16,91	17,15%	22	21,10	15,50%
8	16,60	18,07%	23	19,55	16,56%
9	15,69	16,76%	24	21,95	14,56%
10	18,82	17,46%	25	21,02	14,17%
11	23,85	18,79%	26	19,52	18,84%
12	19,20	18,40%	27	17,96	18,51%
13	19,52	19,70%	28	18,75	18,73%
14	23,64	18,51%	29	16,49	18,53%
15	22,33	18,27%	30	16,61	17,93%

Fonte: O autor (2021).

Quadro 11 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 18 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 18 Horas de Secagem					
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida
1	18,81	21,89%	16	13,68	19,01%
2	25,11	18,26%	17	12,97	17,12%
3	21,44	26,45%	18	14,52	18,15%
4	15,58	18,51%	19	14,83	17,57%
5	16,38	17,89%	20	15,01	19,08%
6	17,97	17,30%	21	19,46	17,05%
7	16,80	17,69%	22	20,79	16,74%
8	16,52	18,46%	23	19,36	17,37%
9	15,60	17,24%	24	21,58	16,00%
10	18,67	18,11%	25	20,70	15,48%
11	23,68	19,37%	26	19,38	19,42%
12	19,16	18,57%	27	17,87	18,92%
13	19,50	19,79%	28	18,67	19,07%
14	23,57	18,75%	29	16,44	18,77%
15	22,16	18,89%	30	16,52	18,38%

Fonte: O autor (2022).

Quadro 12 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 24 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 24 Horas de Secagem					
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida
1	18,80	21,93%	16	13,66	19,12%
2	25,10	18,29%	17	12,95	17,25%
3	21,43	26,48%	18	14,52	18,15%
4	15,57	18,57%	19	14,80	17,73%
5	16,37	17,94%	20	15,01	19,08%
6	17,88	17,72%	21	19,37	17,43%
7	16,79	17,74%	22	20,70	17,10%
8	16,52	18,46%	23	19,25	17,84%
9	15,59	17,29%	24	21,40	16,70%
10	18,61	18,38%	25	20,57	16,01%
11	23,67	19,41%	26	19,38	19,42%
12	19,16	18,57%	27	17,85	19,01%
13	19,48	19,87%	28	18,66	19,12%
14	23,55	18,82%	29	16,44	18,77%
15	22,11	19,07%	30	16,52	18,38%

Fonte: O autor (2022).

Quadro 13 - Valores de massa e teor de umidade na base úmida dos corpos de prova após 30 horas de secagem

Pesagem dos Corpos de Prova Após 30 Horas de Secagem					
Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida	Corpo de Prova	Massa Seca (Gramas)	Teor de Umidade na Base Úmida
1	18,80	21,93%	16	13,65	19,18%
2	25,09	18,33%	17	12,92	17,44%
3	21,43	26,48%	18	14,51	18,21%
4	15,54	18,72%	19	14,8	17,73%
5	16,36	17,99%	20	15,00	19,14%
6	17,86	17,81%	21	19,28	17,82%
7	16,78	17,79%	22	20,54	17,74%
8	16,51	18,51%	23	19,13	18,35%
9	15,55	17,51%	24	21,25	17,28%
10	18,58	18,51%	25	20,45	16,50%
11	23,66	19,44%	26	19,34	19,58%
12	19,16	18,57%	27	17,84	19,06%
13	19,46	19,95%	28	18,65	19,16%
14	23,51	18,96%	29	16,42	18,87%
15	22,07	19,22%	30	16,48	18,58%

Fonte: O autor (2022).

Através da análise estatística do teor de umidade dos corpos de prova na base úmida, foi possível estimar um valor médio de 18,77% através da Equação 5 apresentada no capítulo metodológico deste estudo.

Utilizando os mesmos dados com os quais obteve-se o teor de umidade médio na base seca, é possível calcular o teor de umidade médio na base úmida e estimar o ganho energético pela secagem da madeira através do ganho do seu poder calorífico. Para tal, utiliza-se os dados dos Quadros 9 a 13 aplicados na equação 8 proposta por Lima, Abdala e Wenzel (2008) descrita na Figura 9. Vale lembrar que o experimento mostrado na figura 9 foi realizado com uma espécie de madeira é diferente da *urogradis*. Neste experimento foi utilizado o eucalipto *benthamii*. Então, de fato há um erro quando se aplica o teor de umidade na base úmida estimado para o lote de lenha obtido a partir do eucalipto *urograndis* na equação 8 que foi obtida a partir de estudos com eucalipto *benthamii*. Porém, é razoável aceitar que o erro neste processo de analogia seja mínimo, visto que, como será mostrado a frente nas figuras 31 e 32, as duas espécies de madeira em questão são as que apresentam a sensibilidade da densidade energética e do custo da energia em relação ao teor de umidade mais próximos. Estima-se então com um erro mínimo que com a secagem completa da lenha pode-se obter 3,49 kJ/kg de ganho energético durante a queima da lenha, o que representa um aumento de 21,96% no poder calorífico superior.

Os resultados encontrados de teor de umidade inicial e final para a madeira seca em forno estão de acordo com os dados obtidos por Duarte *et al.* (2015) e Zen *et al.* (2019). Santos *et al.* (2003) recomenda que para um teor de umidade da madeira entre 20 e 40% seria mais eficiente a secagem convencional.

A secagem é uma etapa importante no processo da industrialização da madeira, tendo como finalidade melhorar a qualidade do material. No entanto, é um processo oneroso havendo a necessidade da redução dos seus custos, por meio de métodos que demandem menos investimentos (SILVA *et al.*, 2021). Tomczak *et al.* (2020) ponderam que na secagem natural não há controle de variáveis, garantindo longos períodos para se atingir o teor de umidade adequado, compensatoriamente, apresenta um baixo custo de instalação, por não necessitar de equipamentos sofisticados para a realização do processo.

Rasmussen (1968), Hildebrand (1970) e Pratt (1974) ressaltam em seus estudos que para uma efetiva utilização da secagem ao ar livre é necessário se atentar para a dependência dos fatores madeira, do pátio de secagem e das condições climáticas. Dentre estas intempéries o que pode ser controlado facilmente é o pátio de secagem, que através de cuidados na escolha do local, preparo das pilhas, distâncias entre base das pilhas e solo, espaçamento entre

as pilhas, entablicamento correto e proteção das pilhas, até como forma de garantir a qualidade do material, tornando o processo mais econômico e menos dispendioso (SANTOS, 2002).

Na secagem artificial é possível obter velocidades maiores de secagem e teor de umidade menor em um curto espaço de tempo, tendo em vista que faz uso de sistemas de aquecimento e circulação forçada do ar, no entanto, os elevados custos com instalação, manutenção e consumo de energia de estufas convencionais tornam o processo inviável (SILVA *et al.*, 2021).

Com isso, a secagem da madeira no interior dos fornos cerâmicos torna-se uma alternativa para a redução de custos e investimentos operacionais. Essa pode ser realizada utilizando diretamente os gases dos fornos, os quais têm maior potencial térmico. Sebastião *et al.* (2013) ponderam que outro aliado a este propósito são as questões ambientais, visando à redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂), seja por questões legais ou por cotação da tonelada (ton) de CO₂ no mercado de carbono.

Talgatti *et al.* (2020) ressaltam que a secagem da madeira utilizando fornos é recente no Brasil, carecendo de mais pesquisas para melhorar o conhecimento e divulgação da tecnologia. Para Torgovnikov e Viden (2010) as tecnologias da secagem em fornos vêm sendo utilizadas tanto em pesquisas científicas quanto em processos industriais com o objetivo de tornar a secagem da madeira mais rápida e com qualidade elevada, reduzindo os defeitos decorrentes das tensões de crescimento, proporcionando o aumento da permeabilidade em toras e em madeira serrada, além da facilidade de tratamentos preservativos de espécies refratárias ou de difícil impregnação.

4.2 Análise dos dados obtidos no forno cerâmico

O processo de queima no forno intermitente tipo abóboda passa por duas etapas distintas:

- 1ª etapa: Chamada de pré-aquecimento, não se utiliza lenha. O forno é pré-aquecido com ar quente de outro forno que ainda possui calor residual após sua utilização. Esse processo dura de 48 horas a 60 horas (meta). Quando o termopar do teto da abóboda atinge 150°C o pré-aquecimento é finalizado e inicia-se a segunda etapa (queima da lenha);
- 2ª etapa: Nesta etapa, inicia-se a introdução do combustível (lenha). Esta etapa tem duração que varia entre 96 horas (meta) e 130 horas. Quando os termopares M1 e M2 (localizados a ¼ da altura do forno) alcançam 700°C e o termopar T9 (teto da

abóboda) atinge 900°C, o fornecimento de lenha é interrompido e o forno inicia o processo de resfriamento. O termopar T9 alcança a temperatura de 900°C antes dos termopares M1 e M2 chegarem a 700°C. Porém, o processo de queima continua até que os M1 e M2 cheguem a 700°C para que toda cerâmica ao longo da altura do forno tenha sido queimada. A temperatura do termopar T9 não deve ultrapassar 915°C, pois temperaturas a partir desse valor comprometem a qualidade dos produtos cerâmicos localizados na parte superior do forno.

A última queima realizada pela Arte Cerâmica Sardinha foi entre os dias sete e doze de abril de 2022 e, na última visita técnica realizada na empresa obteve-se os dados referentes a essa queima, conforme demonstrado no Quadro 14.

Quadro 14 - Dados da última queima realizada na Arte Cerâmica Sardinha

Horário	Tempo de Queima (horas)	Temperatura M1 (°C)	Temperatura M2 (°C)	Temperatura Média M1 e M2 (°C)	Temperatura M4 (°C)	Temperatura C3 (°C)	Temperatura C0 (°C)	Temperatura Média C3 e C0 (°C)	Temperatura T9 (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Consumo de Lenha (metros cúbicos)
				0				0			39,00
				0				0			
				0				0			
Término do pré-aquecimento	65:00			0				0			
Início da queima com lenha	00:00	80	75	77,5	60	85	85	85	90		
	02:00	80	75	77,5	60	90	90	90	150		
	04:00	80	75	77,5	65	95	95	95	180		
	06:00	85	80	82,5	65	105	105	105	235		
	08:00	85	80	82,5	65	115	115	115	265		
	10:00	95	80	87,5	70	130	130	130	290		
	12:00	95	85	90	65	150	150	150	315		
	14:00	95	85	90	65	180	170	175	325		
	16:00	100	85	92,5	65	200	195	197,5	355		
	18:00	100	90	95	65	225	220	222,5	350		
	20:00	100	90	95	65	245	245	245	360		
	22:00	105	90	97,5	70	265	270	267,5	370		
	24:00	105	95	100	70	280	285	282,5	370		
	26:00	110	100	105	75	290	300	295	400		
	28:00	115	105	110	80	310	320	315	420		
	30:00	125	115	120	85	335	350	342,5	410		
	32:00	125	125	125	85	350	360	355	410		
	34:00	130	130	130	85	355	355	355	410		
	36:00	135	150	142,5	95	375	395	385	600		
	40:00	205	185	195	110	415	435	425	515		
	42:00	235	210	222,5	125	440	460	450	635		
	44:00	250	230	240	135	455	480	467,5	680		
	46:00	270	245	257,5	150	470	495	482,5	730		
	48:00	295	260	277,5	170	420	515	467,5	795		
	50:00	310	275	292,5	180	500	525	512,5	795		
	52:00	335	295	315	200	515	545	530	820		
	54:00	355	310	332,5	210	530	555	542,5	750		
	56:00	370	330	350	225	530	580	555	790		
	58:00	375	335	355	240	550	630	590	880		
	60:00	390	370	380	250	590	655	622,5	780		
	62:00	415	390	402,5	265	615	690	652,5	770		
	66:00	445	405	425	290	650	715	682,5	750		
	69:00	465	425	445	320	675	725	700	740		
	72:00	490	435	462,5	345	710	765	737,5	800		
	74:00	495	445	470	360	735	785	760	800		
	76:00	495	450	472,5	365	760	790	775	770		
	78:00	500	455	477,5	375	775	815	795	770		
	80:00	510	465	487,5	390	800	840	820	770		
	83:00	520	475	497,5	400	815	855	835	780		
	86:00	545	485	515	415	835	865	850	785		
	90:00	615	505	560	425	845	870	857,5	770		
	93:00	675	530	602,5	435	845	880	862,5	780		
	96:00	725	570	647,5	445	850	885	867,5	780		
	99:00	770	625	697,5	465	860	890	875	790		
	102:00	790	670	730	475	860	890	875	800		
	104:00	795	705	750	495	865	885	875	790		
	107:00	780	745	762,5	520	865	870	867,5	770		
	110:00	800	770	785	560	835	875	855	770		
	114:00	785	770	777,5	630	830	865	847,5	790		
	116:00	785	770	777,5	660	830	865	847,5	820		
	118:00	790	795	792,5	680	830	865	847,5	790		
	121:00	785	850	817,5	690	830	870	850	790		
	124:00	780	790	785	700	825	875	850	760		
Tempo Total (pré aquecimento + queima)	189:00										

Fonte: O autor (2022).

De acordo com os dados apresentados no Quadro 14, a primeira etapa da queima, intitulada de pré-aquecimento teve duração de aproximadamente 65 horas, e o início da queima com lenha durou aproximadamente 124 horas, levando um tempo total entre os dois processos de 189 horas, em uma temperatura média M1 e M2 que variou entre 77,5° e 817,5°, C3 e C0 85° 867,5°, e T9 entre 90° e 880°, possuindo um consumo médio de lenha de 39 m³.

Neste tipo de forno foi observada a evolução da quantidade de calor no decorrer do aquecimento do forno. Somando as várias parcelas das quantidades de calor perdido pelas faces do forno, para as diferentes temperaturas, obteve-se o valor total do calor por cada superfície, durante o aquecimento.

Após levantamentos dos dados do processo de queima na empresa, elaborou-se uma curva de temperatura do forno abóboda intermitente, onde foi possível visualizar como é demorado o processo para que o forno atinja a temperatura necessária para queima das peças cerâmicas com a madeira úmida, sem nenhum tratamento prévio. A curva de temperatura do forno em estudo está demonstrada na Figura 32.

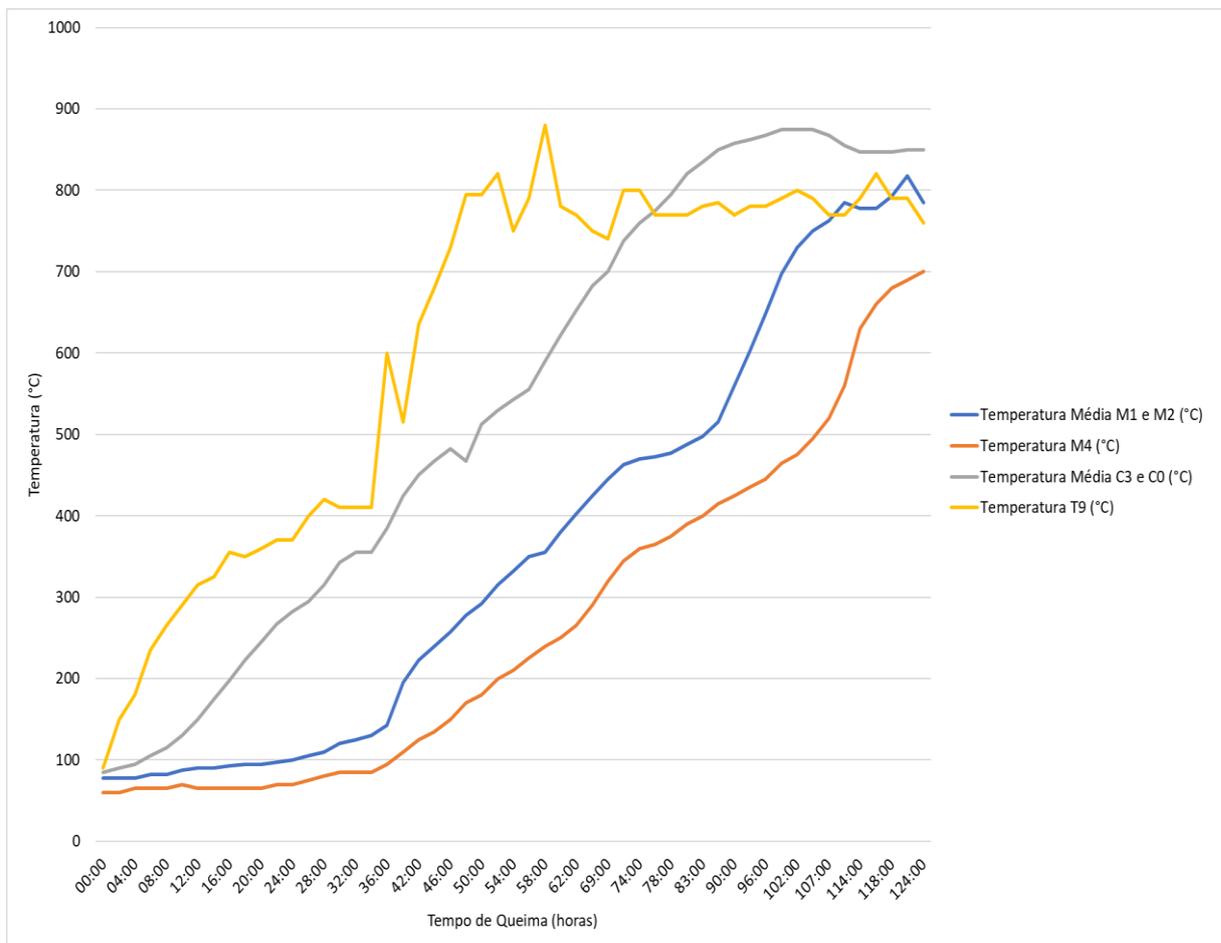


Figura 32 - Curva de temperatura do forno abóboda

Fonte: O autor (2022).

Na Figura 30 percebe-se que em todo o tempo de queima basicamente a temperatura se inicia em pouco menos de 100° C e há um pico de crescimento em todos os níveis de posicionamento dos termopares dos fornos entre 500° e 600°C. Contudo, em T9 houve na mesma temperatura um aumento, declínio e novamente aumento. Percebe-se que, ao alcançar a temperatura entre 800° e 900° T9 ainda permanece com oscilações de pico e declínio, chegando a temperatura máxima de 880°, sendo que, C3 e C0 obteve temperatura a temperatura máxima de 867,5° C.

Através da observação da Figura 30, pode-se verificar que existe um incremento do calor perdido com o aumento da temperatura do interior do forno. Percebe-se também que há uma quantidade de calor perdido conforme a altura do forno. No caso do teto, o calor perdido sofre oscilações. A linha de tendência existente no gráfico serviu para fazer uma extrapolação da quantidade de calor perdido para as diferentes temperaturas do interior do forno. No mesmo gráfico pode-se observar que não existem diferenças significativas entre as quantidades de calor perdido pelas superfícies do forno.

4.3 Análise da influência do teor de umidade na densidade energética e no custo da energia

Geralmente a lenha é comercializada em volume (m^3), então seu potencial térmico pode ser expresso através da densidade energética por unidade de volume e é obtido através da Equação 6 apresentada na metodologia deste trabalho.

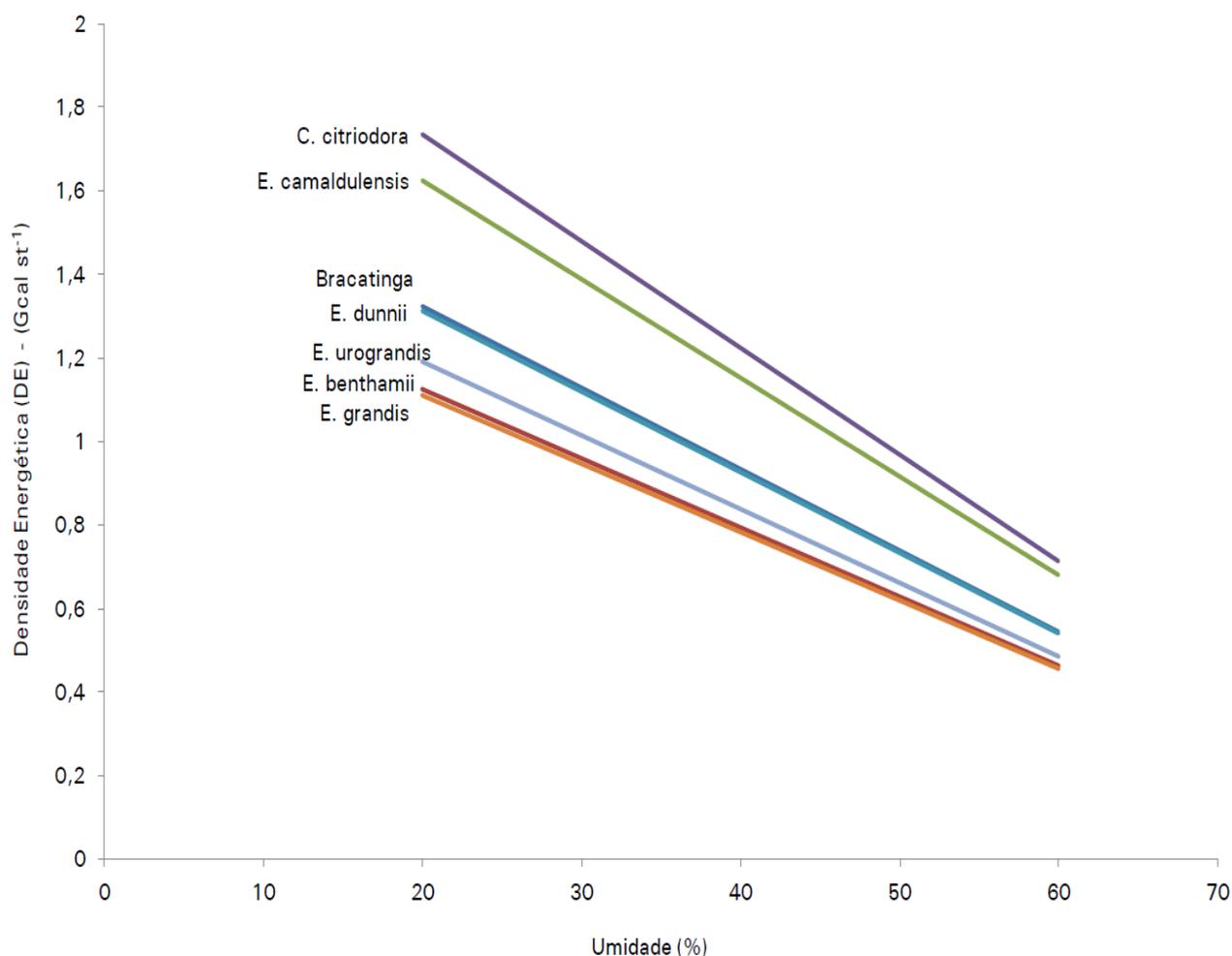
Os valores de densidade básica e poder calorífico superior médio das espécies de eucalipto estão apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Densidade básica x Poder calorífica das espécies de Eucalipto

Espécie florestal	DB (kg m ⁻³)	PCS (kcal kg ⁻¹)
<i>Eucalyptus benthamii</i>	477 ^(a)	4681 ^(a)
<i>E. camaldulensis</i>	630 ^(a)	5085 ^(a)
<i>Corymbia citriodora</i>	730 ^(a)	4718 ^(a)
<i>E. dunnii</i>	550 ^(a)	4732 ^(a)
<i>E. grandis</i>	475 ^(a)	4650 ^(a)
<i>E. urograndis</i>	526 ^(a)	4523 ^(a)
<i>Mimosa scabrella</i>	560 ^(b)	4700 ^(b)

Fonte: Moreira (2012).

A Figura 33 mostra a sensibilidade da densidade energética em relação ao teor de umidade da madeira para várias espécies de madeira.

**Figura 33** - Densidade energética x Teor de umidade

Fonte: Moreira (2012).

Observa-se que a relação densidade energética x teor de umidade pode ser representada por retas para cada uma das espécies. Dessa forma, obtendo a função polinomial de primeiro grau que descreve a reta da espécie *urograndis* utilizada como combustível pela companhia cerâmica em estudo, pode-se estimar o ganho em energia através de sua secagem. Expandindo a reta do *Eucalypto urograndis* até a umidade zero, e aplicando a umidade média estimada do lote de lenha da Cerâmica Sardinha, observa-se um ganho de aproximadamente 35% em densidade energética com a secagem total do insumo.

Os gastos com consumo de madeira para geração de energia térmica para os fornos podem ser expressos através do custo da energia. Este parâmetro pode ser obtido através da Equação 7 apresentada na metodologia deste trabalho.

A Figura 34 mostra a sensibilidade do custo da energia em relação ao teor de umidade da madeira.

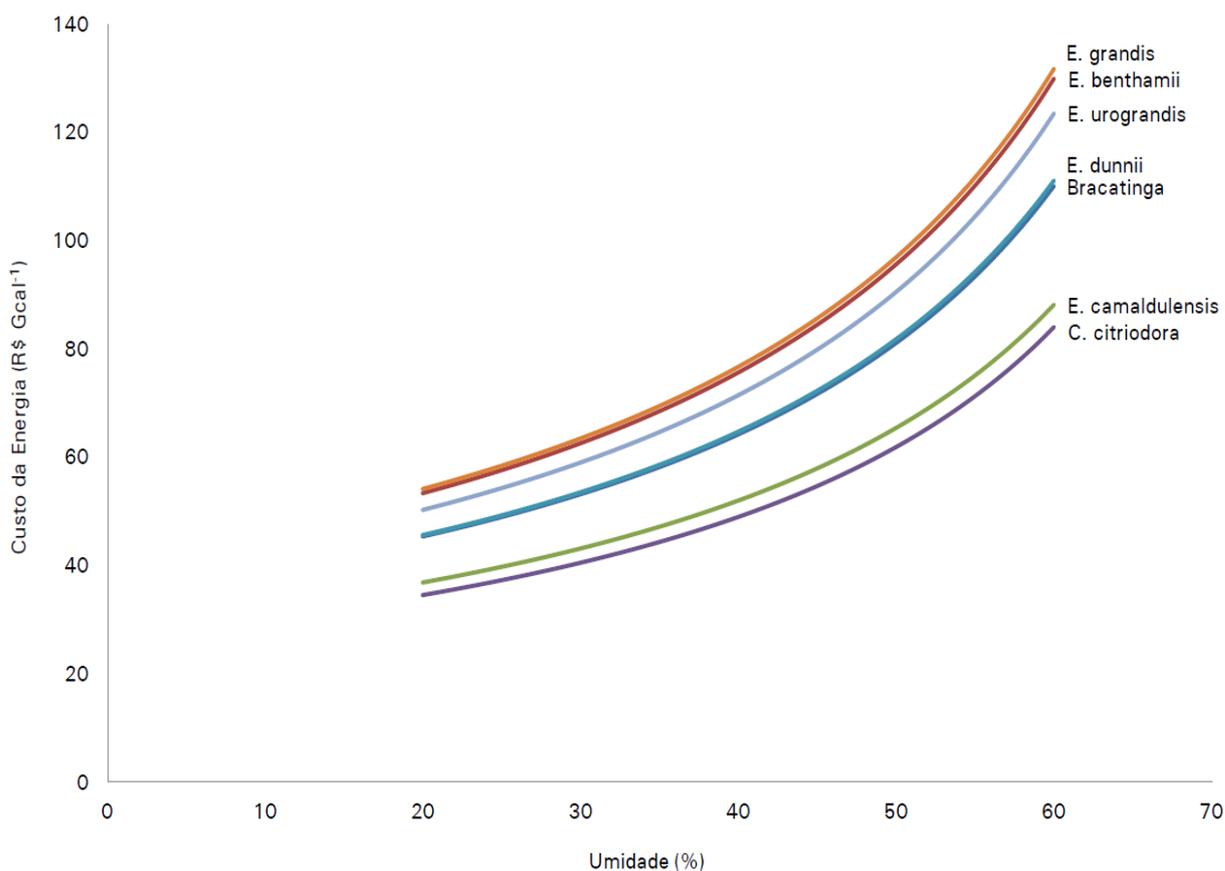


Figura 34 - Custo da energia (R\$) x Umidade (%)

Fonte: Moreira (2012).

Observa-se que a relação custo da energia x teor de umidade pode ser representada por trechos de parábolas para cada uma das espécies. Dessa forma, obtendo a função polinomial de segundo grau que descreve a parábola da espécie *urograndis* utilizada como combustível

pela companhia cerâmica em estudo, pode-se estimar a redução do custo da energia através de sua secagem. Expandindo a curva do *Eucalypto urograndis* até a umidade zero, e aplicando a umidade média estimada do lote de lenha da Cerâmica Sardinha, observa-se uma redução de aproximadamente 30% do custo da energia com a secagem total do insumo.

Considerando que a Arte Cerâmica Sardinha realiza 4 queimas mensais em seus fornos tipo abóboda nas seguintes condições:

- Consumo de 39m³ de lenha por queima;
- Ritmo produtivo de 4 queimas mensais;
- Custo de R\$ 80,00/m³ de lenha;

Pode-se estimar os gastos com madeira para geração de energia térmica nos fornos tipo abóboda:

- R\$ 3.120,00 por queima;
- R\$12.480,00 mensais;
- R\$ 149.760,00 anuais;

Aplicando o ganho de 30% no custo da energia estima-se uma redução de custo anual de aproximadamente R\$ 45.000,00 com consumo de lenha com sua secagem completa.

5 CONCLUSÃO

A elaboração desta pesquisa foi realizada pelo estudo operacional do forno tipo abóboda na Cerâmica Sardinha e orientada para a aplicação concreta dos resultados obtidos. O emprego de queima de madeira no processo de produção de uma indústria cerâmica de revestimentos compõe seu segundo maior custo operacional, ficando atrás apenas da mão de obra. As características estéticas e propriedades mecânicas do produto final exigem o emprego de altas temperaturas no processo de queima da cerâmica e conseqüentemente a utilização de uma quantidade elevada de calor.

Frequentemente as cerâmicas utilizam como combustível para a geração de energia térmica a queima de pó de serra e/ou madeira. Tais combustíveis contêm umidade que influencia significativamente sua queima. O grau de umidade existente na madeira afeta diretamente o processo de combustão, visto que, parte da energia obtida pode evaporar a água existente na umidade no biocombustível, sendo que a mesma reduz o poder de combustão da madeira, prejudicando assim a temperatura de chama gerada pela queima. Além disso, a umidade tem relação direta com a qualidade do combustível e influencia inclusive em seu preço, pois como são geralmente comercializadas em m³, o comprador tem de pagar por água em vez de combustível. Desta forma, esta pesquisa buscou reduzir o consumo de combustível e conseqüentemente o custo operacional do forno cerâmico através da secagem da madeira.

Esta pesquisa mostrou que o teor de umidade da madeira é significativo e influencia diretamente na eficiência da combustão. Além disso, quando o combustível úmido é jogado na caldeira a temperatura de chama diminui podendo gerar maior quantidade de gases poluentes como monóxido de carbono (CO) pela combustão incompleta e comprometer a qualidade da cerâmica devido a variação de temperatura no interior do forno.

Os resultados deste estudo mostraram que a secagem do combustível aumenta seu poder calorífico e conseqüentemente sua densidade, portanto, é necessário menos combustível para manter as condições de temperatura no interior do forno, o que gera redução no custo do processo (fator concorrência) e redução na emissão de poluentes (fator ambiental).

Conclui-se que, a secagem adequada da madeira proporciona redução nos gastos com esse material, visto que, a umidade na madeira faz com que sejam utilizadas mais toras desse material por queima. A secagem adequada não traz apenas grandes benefícios econômicos e energéticos, mas também possibilita um elevado ganho na qualidade do produto final da cerâmica aqui analisada.

Os resultados deste estudo mostraram que da forma que a lenha é armazenada no pátio em contato com o solo úmido e a céu aberto não é adequada. Nessas condições o combustível apresenta em média um teor de úmida de 22,62% na base seca e 18,77% na base úmida. Queimar a madeira no forno nessas condições gera um desperdício significativo de energia térmica e até mesmo problemas ambientais e de qualidade no produto final.

Este trabalho estimou que secando completamente a lenha obtém-se um aumento em torno de 35% de densidade energética e 22% de ganho em poder calorífico superior. Conseqüentemente uma redução no custo da energia é esperado e alcançou em torno de 30%

Considerando a produção anual da Arte Cerâmica Sardinha, a secagem total do combustível geraria uma redução de custo com o insumo produtivo de R\$ 45.000,00 por ano.

Este trabalho também abordou em seu referencial teórico alguns métodos de secagem de lenha que podem ser aplicados no setor cerâmico. De fato, para secar o combustível deve ser adotado um procedimento de secagem o qual terá um custo de implantação que deve ser avaliado.

Como sugestões para trabalhos futuros ainda no setor cerâmico, pode-se realizar um estudo de viabilidade para projetos que envolvem a secagem prévia da madeira. Um comparativo entre um projeto de construção uma cobertura e piso para armazenagem do estoque de lenha, construção de uma estufa solar ou construção de um sistema de recuperação de energia dos gases de exaustão e de calor residual dos fornos para secar a biomassa.

Atualmente o estoque de eucalipto é armazenado no pátio a céu aberto sem nenhum tipo de proteção de contato com o solo ou cobertura para proteção contra chuvas. A construção de uma cobertura e piso para a armazenagem do material tem potencial para reduzir seu teor de umidade.

A estufa solar também se mostra como promissor, visto que o grau de insolação da região é alto e frequente. Tem o potencial de uma maior redução no teor de umidade da lenha, porém pode ter um custo razoável de construção e deve ser avaliado.

Por último, a criação de um sistema de recuperação de energia é possível com a captação de desperdícios de energia térmica pela chaminé e pelo resfriamento do forno após seu desligamento. Os gases de exaustão são liberados pelas chaminés a altas temperaturas. Seria necessário a construção de uma estufa e de um sistema de direcionamento desses gases de forma que a secagem possa ser realizada com segurança sem risco de incêndio, visto que os gases de exaustão superam significativamente a temperatura de secagem e até de combustão da madeira.

Após o processo de queima dos produtos cerâmicos, as portas do forno são abertas para seu resfriamento e retirada do produto final. Durante este resfriamento, parte da energia térmica que seria rejeitada para o ambiente é coletada através de dutos e sugador de ar quente do forno em resfriamento para o forno em aquecimento. Quando a temperatura do forno em aquecimento atinge 150°C, o fluxo de transferência de ar quente é interrompido através do desligamento do sugador e o resfriamento do forno desligado segue naturalmente. Ou seja, quando um forno é desligado totalmente, sua temperatura interna ainda é de 150°C, suficiente para realizar a secagem da biomassa em uma estufa, pois, conforme visto em norma, a madeira deve ser secada entre 101°C e 105°C. A empresa já possui dois sugadores de ar e os dutos entre os fornos. Tal projeto incluiria a construção de uma estufa de secagem e ampliação dos dutos e sucção de ar quente dos fornos para a estufa. O custo de um projeto desse tipo deve ser avaliado para se confirmar a viabilidade do projeto.

Outra sugestão seria estender os estudos energéticos aqui apresentados para outros setores industriais que utilizam lenha como combustível para geração de energia térmica como, por exemplo, termoelétricas de pequeno porte, visando tornar cada vez mais eficiente os processos de consumo de energia nas empresas.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM, Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações técnicas – Definição e classificação**, 2021. Disponível em: <<https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao>>. Acesso em: 1 fev. 2021.
- ABDI, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Estudo técnico setorial da cerâmica vermelha**, 2016. Disponível em: <https://docplayer.com.br/25933579-Estudo-tecnico-setorial-da-ceramica-vermelha.html>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- ABRAHÃO, R.; CARVALHO, M. Environmental Impacts of the Red Ceramics Industry in Northeast Brazil. **International Journal of Emerging Research in Management & Technology**, v. 6, p. 310, 2017.
- ALMEIDA, L. L. P.; PETRUCCI, L. J. T.; PESSANHA, E. M.; PAIXÃO, L. P.; MAIA, F. S. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de blocos cerâmicos na região de Campos dos Goytacazes. **XIX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Campos do Jordão, 2010.
- ANDER-EGG, E. Introducción a las técnicas de investigación social: para trabajadores sociales. 7 ed. Buenos Aires: **Humanitas**, 1978.
- ANDRADE, M. M. de. Introdução a metodologia do trabalho científico. 8 ed. São Paulo: **Atlas**, 2007.
- ANICER, Associação Nacional da Indústria Cerâmica. **Dados do setor**, 2021. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>. Acesso em: 1 fev. 2021.
- ARAGÃO; A. P.; CHÁVEZ, J. R. A.; SALES, M. V. S. **Simulação do processo produtivo de cerâmica vermelha em Campos dos Goytacazes – RJ**. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, São Carlos, 2010.
- AUTENGRUBER, M.; LUKACEVIC, M.; FÜSSL, J. Finite-element-based moisture transport model for wood including free water above the fiber saturation point. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 161, n. 120228, p. 1-21, 2020.
- AZEVEDO, A. R. G.; FRANÇA, B. R.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M. T.; ZANELATO, E. B.; XAVIER, G. C. Influence of sintering temperature of a ceramic substrate in mortar adhesion for civil construction. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 342-348, 2018.
- BALIEIRO, F. **Processo infeccioso de Botrytis cinerea em folhas de Eucalipto**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2013.
- BARBOSA, A. Q.; COSTA, D. M.; SANTOS, C. D. B. Análise geral dos processos de fabricação de materiais cerâmicos para o setor da construção civil. **Inter faces científicas: exatas e tecnológicas**, v. 2, n. 2, p. 19-26, 2016.
- BARBOSA, M. **Morfoanatomia e composição química de eucalyptus urograndis, cultivado na região de Campo Grande - MS**. Conic-Semesp, São Paulo, 2018.

- BHAT, K. M.; BHAT, K. V.; DHAMODARAN, T. K. Wood density and fibre length of *Eucalyptus grandis* grown in Kerala, India. **Wood and Fibre Science**, v. 22, n. 1, p. 54-61, 1990.
- BODART, C.; AZEVEDO FILHO, E. T. Análise sobre o dilema da cooperação no polo cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ. **Perspectiva Online, Exatas e Engenharia**, v. 2, 2012.
- BODIG, J.; JAYNE, B. Mechanics of wood and wood composites. **Nova York: Van Nostrand Reinhof**, 712 p. 1982.
- BORLINI, M. C.; MENDONÇA, J. L. C. D. C., VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, N. Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 11, n. 4, p. 433-441, 2006.
- BRIZOLA, J.; FANTIN, N. Revisão da literatura e revisão sistemática da literatura. **Relva**, v. 3, n. 2, p. 23-39, 2016.
- CABRAL JÚNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. S.; TANNO, L. C. **Argilas para Cerâmica Vermelha**. Rochas e Minerais Industriais – CETEM, p. 747-780, 2008.
- CALLISTER, W. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: **LTC Editora**, 2002.
- CAMPANTE, H.; SEABRA, A. M. Diagnóstico e Otimização de Operações e Processos: Parte I - Fornos Industriais. **Keramica**, v. 1, n. 251, p. 26-36, 2002.
- CAVALCANTE, A. A.; NAVEIRO, R. M. Desafios e inovação na secagem por microondas de madeiras amazônicas. **Rev. Gestão Industrial**, v. 10, n. 2, p. 347-360, 2014.
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. Metodologia científica: para uso dos estudantes universitários. 2 ed. São Paulo: **McGraw-Hill**, 2011.
- CORREIA, E. A. S. **Análise e dimensionamento de estruturas de madeira**. 2009. 163 p. Relatório de Projeto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil (especialização em estruturas). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto - Portugal, 2009.
- COSTA, H. G. Modelo para web i bliomining: proposta e caso de aplicação. **Revista da FAE**, v. 13, n. 1, p. 115–126, 2010.
- COSTA, J. **Qualidade da madeira de Eucalyptus Urograndis, plantado no Distrito Federal, para produção de celulose craft**. Dissertação de mestrado, Brasília, 2011.
- DONATO, D. B. **Métodos de amostragem e de determinação do teor de umidade da madeira em tora**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

DUARTE, M. M. et al. Drying curve and defects of Eucalyptus sp wooden submitted to air drying. **Spanish Journal of Rural Development**, v. 6, n. 3-4, p. 161-170, 2015.

DUTRA, R. P. S.; VARELA, M. L.; NASCIMENTO, R. M.; GOMES, U. U.; MARTINELLI, A. E.; PASKOCIMAS, C. A. Estudo comparativo da queima rápida com a queima tradicional nas propriedades de materiais cerâmicos de base argilosa. **Cerâmica Industrial**, v. 55, n. 333, p. 100-105, 2009.

FERRAZ, E.; COROADO, J.; TRIÃES, R.; ROCHA, F. Conceitos e sistematização da cerâmica clássica: matérias primas e produtos. **Kéramica**, v.1, n. 314, p. 6-18, 2012.

FERNANDES, A. M.; BRUCHÊZ, A., D'ÁVILA, A. A. F.; CASTILHOS, N. C.; OLEA, P. M. Metodologia de pesquisa de dissertações sobre inovação: Análise bibliométrica. **Desafio online**, v. 6, n. 1, 2018.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. de. **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas**. *Ambient. Constr.* 9 (4). Oct-Dec 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/84J9dfRHFVdzF35xnjscXty/?lang=pt#>. Acesso em: abril de 2022.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, v. 2, n. 3, p. 65-74, 1971.

FONSECA, J. J. S. da. **Apostila de metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC. 2002.

FRANZOI, L. C. N. **Secagem da madeira em estufa: secagem artificial**. Bento Gonçalves: SENAI/CETEMO, 1997.

GABALDÓN-ESTEVAN, D. et al. Unwanted effects of European Union environmental policy to promote a post-carbon industry. The case of energy in the European ceramic tile sector. **Journal of cleaner production**, v. 117, p. 41-49, 2016.

GALASSI, C.; TAVARES, C. R. G. **Processo produtivo de blocos cerâmicos**. VI Simpósio Maringaense de Engenharia de Produção – UEM, Maringá, 2013.

GARCIA SOBRINHO, R. A.; DIAS, J. F. Estudo da variação de propriedades de blocos cerâmicos de vedação conforme a variação da posição de queima, na vertical, em fornos do tipo abóboda de chama invertida. **Cerâmica Industrial**, v. 23, n. 2, p. 31-35, 2018.

GARCIA, D. C. F.; GATTAZ, C. C.; GATTAZ, N. C. A Relevância do Título, do Resumo e de Palavras-chave para a Escrita de Artigos Científicos. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 23, n. 3, p. 1-9, 2019.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 5 ed. São Paulo: **Atlas**, 2010.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture Relations and Physical Properties of Wood, Wood as an Engineering Material, **General Technical Report FPL- 190**, p. 80-98, 2010.

GOMEZ, R. S.; MAGALHÃES, H. L. F.; PORTO, T. R. N.; LIMA, E. S. *et al.* Drying process of clay ceramic materials: a review. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. 1-37, 2020.

GONÇALEZ, J. C.; SANTOS, G. L.; SILVA JUNIOR, F. G.; MARTINS, I. S.; COSTA, J. A. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 81-89, 2014.

GOULART, J. F.; MAGOSSI, D. C. Comparação das propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus grandis* x Híbrido *urograndis* provenientes de métodos de produção de mudas diferentes. **Rev. União Latino-americana de Tecnologia**, v. 7, n. 1, p. 58-79, 2019.

HENRIQUES JÚNIOR, M. F.; SCHWOB, M. R. V.; RODRIGUES, J. A. P.; CAMPOS, J. S. N. **Manual de fornos eficientes para Indústria Cerâmica Vermelha – Projeto EELA**. 2º ed, Rio de Janeiro: INT/MCTI, 80 p., 2015.

HILDEBRAND, R. Kiln drying of sawn timber. **Nuertingen: R. H. Maschinenbau GmbH**, 1970.

IBGE, Instituto de Geografia e Estatística. **Cidades e estados – Campos dos Goytacazes, RJ**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/campos-dos-goytacazes.html>. Acesso em: 07 fev. 2021.

IDROGO, A. A. A; BEZERRA, M. C.C.; ACUÑA, G. S. Study on waste present in the tile manufacturing process in a red ceramic industry. **Braz. J. of bus.**, v. 1, n.3, p. 1087-1103, 2019.

ISHIDA, H. K.; VALENTE, A. C. F.; VILLEGAS, T. A.; PINZÓN, F. M. Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados: segmento cerâmica. **Qualitec-Appplus**, 2018.

JANKOWSKY, I. P. **Equipamentos e processos para secagem de madeiras**. In. **Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria**. 1995.

JIN, Y.; ZHENG, X.; CHI, Y.; NI, M. Experimental study and assessment of different measurement method softwater in oil sludge. **Drying technology**, v. 32, n. 3, p. 251-257, 2014.

KONOPKA, D.; KALISKE, M. Transient multi-FICKianhygro-mechanical analysis of wood. **Computers e Structurs**, v. 197, p. 12-27, 2018.

KAWAGUTI, W. M. **Estudo do comportamento térmico de fornos intermitentes tipo “Paulistinha” utilizados na indústria de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. (1985). **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. **São Paulo: Atlas**, 2003. 311 p.

LARSON, P. R.; KRETSCHMANN, D. E., CLARK, A.; ISEBRANDS, J. G. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: A synopsis**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 42 p., 2001.

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. **Embrapa Florestas-Comunicado Técnico 220**, 1 ed.; 2008.

LOPES, D. J. V.; PAES, J. B.; JANKOWSKY, I. P.; ALCÂNTARA, P. G. S.; VIDAURRE, G. B. Influências do diâmetro e umidade da madeira na qualidade do tratamento preservativo. **Floresta ambiental**, v. 24, p. 1-10, 2017.

LOWDEN, L. A.; HULL, T. R. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. **Fire science reviews**, v. 2, n. 1, p. 1-19, 2013.

MACHADO, M. F.; GOMES, L. J.; MELLO, A. A. Caracterização do consumo de lenha pela atividade de cerâmica no estado de Sergipe. **Floresta**, v. 40, n. 3, p. 507-514, 2010.

MAIA, F. S. **Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

MALAN, F. S.; HOON, M. Effect of initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, n. 163, p. 13-20, 1992.

MANIATIS, Y. The emergence of ceramic technology and its evolution as revealed with the use of scientific techniques. **From Mine to Microscope: Advances in the Study of Ancient Technology**, p. 1-18, 2009.

MARTINS, M. E. G. Diagrama de Venn. **Rev. de Ciência Elementar**, v. 2, n. 1, 2014.

MENDES, A. de S.; MARTINS, V. A.; MARQUES, M. H. B. **Programas de secagem para madeiras brasileiras**. Brasília: IBAMA, 1998.

MONTANARI, Rafael; MARQUES, José; COSTA CAMPOS, Milton César; CAVALCANTE, Ítalo Herbert Lucena. Níveis de resíduos de metalurgia e substratos na formação de mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*). **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, vol. 7, núm. 1, primer semestre, 2007.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. **Applied Clay Science**, v. 27, n. 3, p. 229-234, 2004.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; LIMA, E. A.; GOULART, I. C. G. R. Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. **Embrapa Floresta-Comunicado Técnico 293**, 1 ed., 2012.

MÜZEL, S. D.; OLIVEIRA, K. A.; HANSTED, F. A. S.; PRATES, G. A.; GOVEIA, D. Poder calorífico da madeira de *Eucalyptus grandis* e da *Hevea brasiliensis*. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 8, n. 2, p. 166-172, 2014.

NASCIMENTO, F. P. do. Classificação da pesquisa. Natureza, método ou abordagem metodológica, objetivos e procedimentos. 1 ed. Brasília: **Thesaurus**, 2016.

NANDI, V. S.; INOCENTE, J. M.; ZACCARON, A.; BERNARDIN, A. M. Estudo do comportamento energético em forno túnel de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 5, p. 30-39, 2015.

NAPOLEÃO, B. M. **Estabelecendo uma string de busca para identificação de estudos secundários na engenharia de software**. 2019. 54 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2019.

NATREB, 2020. **Como funciona o processo de produção de tijolos cerâmicos**. Disponível em: <https://natreb.com/como-funciona-o-processo-de-producao-de-tijolos-ceramicos/#:~:text=O%20destorroamento%20%C3%A9%20um%20processo,reduzir%20as%20pedras%20a%20p%C3%B3>. Acesso em: 01 fev. 2020.

NICOLAU, V. P. A importância da curva de queima em fornos cerâmicos. **Cerâmica industrial**, v. 17, n.2, p. 28-31, 2012.

NICOLAU, V. P.; POSSAMAI, T. S.; OBA, R.; NUNES, A. T. Metodologia de análise energética em fornos cerâmicos. **IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials**, Curitiba, 2012.

NORMEY-RICO, J. E.; MÜLLER, J. F.; BRISTOL, V. M. **Controle de temperatura de secadores de revestimentos cerâmicos alimentados com gás natural**. II Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás. Rio de Janeiro, 2004.

NYSTRÖM, J.; DAHLQUIST, E. Methods for determination of moisture content in woodchips for powerplants—a review. **Fuel**, v. 83, n. 7-8, p. 773-779, 2004.

NYSTRÖM, J.; DAHLQUIST, E. Methods for determination of moisture content in woodchips for powerplants—a review. **Fuel**, v. 83, n. 7, p. 773-779, 1 maio 2004. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2003.11.002>.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira. **Pesquisa e Tecnologia Minerva**, v. 2, n. 1, p. 25-31, 2005.

OLIVEIRA, M. C.; MAGANHA, M. F. Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Branca e de Revestimento. **CETESB**, 2006.

OLIVEIRA, B. P. C. P.; RITA, L. P. S.; SÁ, E. M. O.; FERREIRA JÚNIOR, R. R. F. Study of The Technological Profile of The Red Ceramic Industry of Alagoas. **Journal of Engineering Research and Applications**, v. 5, n. 6, p. 92-105, 2015.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2015.

OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRÓ, C. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A. *Eucalyptus logs drying at high temperature*. **Revista Árvore**, Viçosa, v 41, n. 2, p. 1-9, 2017.

PADILHA, A. F. *Microestrutura e Propriedades*. **São Paulo: Hemus**, 2007.

PAIVA FILHO, E. C. C.; AGOSTINHO, R. L.; JÚNIOR, J. L. T. S.; BEZERRA, F. C.; AQUINO, P. L. S.; **Cooperação internacional e desenvolvimento tecnológico: controle do processo de queima em fornos Hoffmann para cerâmica vermelha**. Cobenge, Brasília, 2004.

PANG, S. Mathematical modeling of kiln drying of soft wood timber: Model development, validation, and practical application. **Drying technology**, v. 25, n. 3, p. 421-431, 2007.

PERTUZZATTI, A.; CONTE, B.; MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. Influência da umidade na resistência da madeira de eucalipto a impactos. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Effect of the firing temperature on some mechanical properties of red ceramic. **Cerâmica**, v. 56, n. 339, p. 237-243, 2010.

PRATT, G. H. *Timber drying manual*. **London: Department of Environment, Building Research Establishment**, 1974.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M. TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113-113, 2011.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. D.; ANDRADE, A. D.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. D. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da madeira**, v. 89, n. 100, p. 100-106, 2005.

QUIRINO, W. F.; ABREU, L. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100–106, 2005.

RAMOS, I. S. R.; ALVES, M. G.; ALEXANDRE, J. Diagnóstico do polo cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 1, p. 28-32, 2006.

RASMUSSEN, E. F. *Drying kiln operator's manual*. **Madison: USDA**, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1968.

ROCHA, A. F.; PALMA, M. A. M. Innovation management and competitive capacity: a non-parametric analysis in the red ceramic sector of Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil. **Cerâmica**, v. 58, n. 346, p. 244-252, 2012.

RODRIGUES, L. M. **A madeira e sua utilização na construção civil**. 2018. Disponível em: <https://www.webartigos.com/artigos/a-madeira-e-sua-utilizacao-na-construcao-civil/159256>. Acesso em: 20 abr. de 2022.

SARDINHA, A. M.; WOLFANGO, M.; VASCONCELOS, F. M. **Combustão Lenhosa Direta e Indireta Sua Relevância para a Temática dos Fogos Florestais**. Silva Lusitana, Lisboa, v. 10, n. 1, p. 91-100, EFN, 2002.

SANTOS, G. R. V. **Otimização da secagem da madeira de Eucalyptus grandis [Hill ex Maiden]**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da madeira) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SANTOS, R. S. **Reaproveitamento do resíduo Borra de Petróleo da Bacia de Campos – RJ em Cerâmica vermelha**. 2001. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2001.

SANTOS, G. R. V.; JANKOVSKY, Ivaldo Pontes; ANDRADE, A. de. Curva característica de secagem para madeira de Eucalyptus grandis. **Scientia Forestalis**, n. 63, p. 214-220, 2003.

SEBASTIÃO, R. B.; FERNANDES, P.; NANDI, V. de S. Melhoria da Eficiência Energética de um Forno Cerâmico Através da Troca de Queimadores. **Cerâmica Industrial**, v. 18, n. 5, p. 24-30, 2013.

SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Cerâmica vermelha – Panorama do mercado no Brasil**, 2015. Boletim de inteligência. Disponível em: <[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/\\$File/5846.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf)>. Acesso em: 07 fev. 2021.

SEBRAE, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos**. Estudos de mercado SEBRAE/ESPM, 95 p., 2008.

SILVA, A. C.; MÉXAS, M. P.; QUELHAS, O. L. G. Restrictive factors in implementation of clean technologies in red ceramic industries. **Journal of cleaner production**, v. 168, p. 441-451, 2017.

SILVA, A. L.; LUNA, C. B. B.; CHAVES, A. C.; NEVES, G. A. Caracterização tecnológica de novos depósitos de argilas da região sul do Amapá visando aplicações na indústria Cerâmica. **Rev. Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.

SILVA, F.; SANTOS, E. B. A.; BRANDÃO, M. M.; VILS, L. Estudo bibliométrico: orientações sobre sua aplicação. **Revista Brasileira de Marketing**, v. 15, n. 2, p. 246–262, 2016.

SILVA, L. C. S.; MAIA, F. O. **Processos de fabricação: uma análise da produção da cerâmica vermelha em uma empresa da cidade de Catalão – GO**. VIII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, São Cristovão, 2016.

SILVA, M. A. J.; BRITO, D. Y. O.; SOUZA, J. B.; GOMES, J. P. S.; NUNES, L. J.; UCELLA-FILHO, J. G. M.; AZEVEDO, T. K. B. Secagem de toras de clones de Eucalyptus urograndis em estufa solar. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 9, n. 4, p. 377-383, 2021.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **ACTA Amazônica**, v. 43, n. 2, p. 179-184, 2013.

SIQUEIRA, H. F. **Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira e produção de carvão vegetal**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.

SPOSTO, R. S.; MEDEIROS, E.; RAMOS, D. T.; NAYA, L.; MORAIS, D. M. Análise da Conformidade de Blocos Cerâmicos Sinterizados em Fornos Intermitentes e Contínuos no Distrito Federal. **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 5, 2007.

STANGERLIN, D. M.; MELO, R. R.; SANTINI, E. J.; CORDEIRO, S. A. Comparação econômica entre os métodos de secagem de madeira ao ar livre e em estufa solar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, p. 850-856, 2012.

SZÜCS, C. A. Proposta em Ensaio para Cisalhamento Paralelo às Fibras da Madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., 1998, Florianópolis. Anais... Florianópolis, 1998.

TALGATTI, M.; BALDIN, T.; SANTINI, E. J.; ROSSO, S.; OLIVEIRA, L. H.; VALCORTE, G. Secagem da madeira de *Hovenia dulcis* e *Eucalyptus tereticornis* em forno micro-ondas com diferentes potências de temperatura. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 3, p. 1121-1128, 2020.

TOMASELLI, I.; KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira**. Curitiba: Fundação Hugo Simas/UFPR, 2000.

TOMCZAK, K.; TOMCZAK, A.; JELONEK, T. Effect of Natural Drying Methods on Moisture Content and Mass Change of Scots Pine Roundwood. **Forests**, v. 11, n. 6, p. 668, 2020.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P. Microwave wood modification technology and its applications. **Forest products journal**, v. 60, n. 2, p. 173-182, 2010.

TREVISAN, R.; HASELEIN, C. R.; MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A.; CALEGARI, L. Variação radial da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta**, v. 38, n. 3, 2008.

TURHAN, Ş.; ARIKAN, H.; DEMIREL, H.; GÜNGÖR, N. Radiometric analysis of raw materials and end products in the Turkish ceramics industry. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 80, n. 5, p. 620-625, 2011.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6 n. 1, p. 83-88, 2000.

VAN MEEL, P. A.; ERICH, S. J. F.; HUININK, H. P.; KOPINGA, K.; JONG, J.; ADAN, O. C. G. Moisture transport in coated wood. **Progress in Organic Coatings**, v. 72, n. 4, p. 686-694, 2011.

VIEIRA, C. M. F.; DE HOLANDA, J. N. F.; PINATTI, D. G. Characterization of red ceramic body used in the production of bricks in the region of Campos dos Goytacazes-RJ. **Cerâmica**, v. 46, n. 297, p. 14-17, 2000.

VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M. Evaluation of kaolinitic clays from Campos dos Goytacazes used for red ceramic fabrication. **Cerâmica**, v. 57, n. 343, p. 319-323, 2011.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 21 p. 1984. (Boletim técnico, 1).

WHITE, R. H. **Fire Resistance of Structural Composite Lumber Products**. Madison: Forest Products Laboratory, 2006.

XAVIER, G. C.; SABOYA, F.; MAIA, P. C. A.; ALEXANDRE, J. Analysis of Accelerated Process Of degradation for durability research of red ceramic samples incorporated with granite waste). **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 1-10, 2009.

WIEMANN, M. C. Characteristics and Availability of Commercially Important Woods. Wood as an Engineering Material, **General Technical Report FPL- 190**, 1 ed., p. 21-61, 2010.

XU, K.; LU, J.; GAO, Y.; WU, Y.; LI, X. Determination of moisture content and moisture content profiles in wood during drying by low-field nuclear magnetic resonance. **Drying Technology**, v. 35, n. 15, p. 1909-1918, 2017.

ZEN, L. R.; MONTEIRO, T. C.; SCHAEFFER, W.; KAMINSKI, J. M.; KLITZKE, R. J. Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 7, n. 2, p. 291-298, 2019.

ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; CARVALHO, A. G.; TRUGILHO, P. F. Secagem de toras de *Eucalyptus* e *Corymbia* para uso energético. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 353-360, 2013.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; DAMÁSIO, R. A. P.; OLIVEIRA, B. S.; CARNEIRO, A. C. O.; COLODETTE, J. L. Relationship between the anatomy and drying in *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* wood. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 723-729, 2016.

APÊNDICE A



"ENSINO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO:
COMO PREPARAR AS NOVAS GERAÇÕES
PARA OS DESAFIOS DO SÉCULO XXI"

10, 11 E 12 DE NOVEMBRO DE 2021



TEOR DE UMIDADE E SECAGEM DA MADEIRA: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

DOUGLAS BRUNO F. DE SOUZA MESQUITA -

douglasbrunomesquita@hotmail.com

INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE – IFFLUMINENSE CAMPUS CAMPOS CENTRO

HENRIQUE REGO MONTEIRO DA HORA – dahora@gmail.com

INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE – IFFLUMINENSE CAMPUS CAMPOS CENTRO

CRISTINE NUNES FERREIRA – crisnferphys@gmail.com

INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE – IFFLUMINENSE CAMPUS CAMPOS CENTRO

Área: Nº 9 – ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE

Sub-Área: Nº 9.3 – GESTÃO DE RECURSOS NATURAIS E ENERGÉTICOS

Resumo: A MADEIRA É UM BIOCOMBUSTÍVEL UTILIZADO NO AMBIENTE DOMÉSTICO E INDUSTRIAL PARA OBTENÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA. É EXTRAÍDA COM ALTO TEOR DE UMIDADE, O QUE AFETA DIRETAMENTE O SEU PODER CALORÍFICO. A SECAGEM PRÉVIA DA MESMA REDUZ A ÁGUA NO SEU INTERIOR E CONSEQUENTEMENTE AUMENTA SEU POTENCIAL ENERGÉTICO. SENDO ASSIM, UMA ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DE CUSTOS DESTES INSUMOS. O OBJETIVO DESTES ESTUDOS É IDENTIFICAR OS AUTORES E PERIÓDICOS MAIS RELEVANTES SOBRE O TEOR DE UMIDADE PRESENTE NA BIOMASSA E AS TÉCNICAS DE SECAGEM DA MESMA. FOI REALIZADA UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA NA BASE DE DADOS SCOPUS®, ATRAVÉS DE PALAVRAS-CHAVES E SEUS RESPECTIVOS TESAUROS A FIM DE ANALISAR AS PUBLICAÇÕES SOBRE A TEMÁTICA PROPOSTA ATÉ O ANO DE 2020. FORAM IDENTIFICADOS NO ESTUDO 127 ARTIGOS CIENTÍFICOS E DESTES FORAM APONTADOS QUE OS PERIÓDICOS COM O MAIOR NÚMERO DE PUBLICAÇÕES FORAM BIOMASS AND BIOENERGY E ENERGY, E OS AUTORES QUE SE DESTACAM SOBRE A TEMÁTICA PROPOSTA FORAM GEBREEGZIABHER T. E HUI C. W., ALÉM DE UM LEVANTAMENTO CRONOLÓGICO DA PRODUÇÃO. AO FINAL, CONSTATOU-SE QUE HÁ UM CRESCIMENTO EVIDENTE

DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE A ÁGUA PRESENTE NA MADEIRA E AS TÉCNICAS DE SECAGEM, PRINCIPALMENTE NA ÚLTIMA DÉCADA, NO ENTANTO, O TEMA ESTUDADO REPRESENTA UMA FATIA MUITO PEQUENA QUANDO COMPARADO COM OS ESTUDOS PUBLICADOS INDIVIDUALMENTE.

Palavras-chaves: AQUECIMENTO; BIOMASSA; TEOR DE UMIDADE.

MOISTURE CONTENT AND DRYING OF WOOD: A BIBLIOMETRIC STUDY

Abstract: *WOOD IS A BIOFUEL USED IN THE DOMESTIC AND INDUSTRIAL ENVIRONMENT TO OBTAIN THERMAL ENERGY. WOOD IS EXTRACTED WITH HIGH MOISTURE CONTENT, WHICH DIRECTLY AFFECTS ITS CALORIFIC VALUE. THE PREVIOUS DRYING OF THE WOOD REDUCES THE WATER IN ITS INTERIOR AND CONSEQUENTLY INCREASES ITS ENERGY POTENTIAL. THE OBJECTIVE OF THIS STUDY IS TO IDENTIFY THE MOST RELEVANT AUTHORS AND JOURNALS ON THE MOISTURE CONTENT OF BIOMASS AND ITS DRYING TECHNIQUES. A BIBLIOMETRIC ANALYSIS WAS PERFORMED IN THE SCOPUS® DATABASE, THROUGH KEYWORDS AND THEIR RESPECTIVE THESAURUS IN ORDER TO ANALYZE THE PUBLICATIONS ON THE PROPOSED THEME UNTIL THE YEAR 2020. THE STUDY IDENTIFIED 127 SCIENTIFIC ARTICLES AND INDICATED THAT THE JOURNALS WITH THE HIGHEST NUMBER OF PUBLICATIONS WERE BIOMASS AND BIOENERGY AND ENERGY, AND THE AUTHORS WHO STAND OUT ON THE PROPOSED THEME WERE GEBREEGZIABHER T. AND HUI C. W., IN ADDITION TO A CHRONOLOGICAL SURVEY OF PRODUCTION. AT THE END, IT WAS FOUND THAT THERE IS AN EVIDENT GROWTH OF SCIENTIFIC PRODUCTION ON THE WATER PRESENT IN WOOD AND DRYING TECHNIQUES, ESPECIALLY IN THE LAST DECADE, HOWEVER, THE STUDIED THEME REPRESENTS A VERY SMALL SLICE WHEN COMPARED TO THE STUDIES PUBLISHED INDIVIDUALLY.*

Keywords: *HEATING; BIOMASS; MOISTURE CONTENT.*

1. INTRODUÇÃO

O teor de umidade presente nos biocombustíveis pode ser considerado como um parâmetro importante de medida para se otimizar sua combustão. Os biocombustíveis como madeira, lenha e serragem variam em teor de umidade e tem sido um grande problema medir este parâmetro com precisão. Pode-se dizer que a umidade presente na madeira afeta o processo de combustão e, parte da energia gerada é gasta para evaporar a água proveniente da umidade na biomassa, já que a água não participa da reação química de combustão, apenas absorve energia à medida que evapora. Por este motivo, plantas industriais conduzem o gás de combustão para a secagem do combustível (NYSTRÖM; DAHLQUIST, 2004).

A madeira é um biocompósito natural que possui uma estrutura hierárquica complexa composta principalmente por celulose, hemicelulose e matriz de lignina. Esses polímeros constituem tipos distintos de células de diferentes tamanhos e escalas de comprimento. A umidade pode existir dentro desses tipos de células em duas formas básicas que são água líquida situada na luz da célula e cavidades celulares chamadas água livre e água ligada dissolvida ou absorvida dentro das paredes das células higroscópicas (XU *et al.*, 2017).

O teor de umidade é inversamente proporcional à densidade da madeira, ou seja, quanto maior a quantidade de água, menor a quantidade de outros elementos químicos da madeira – celulose, hemicelulose e lignina. Sendo assim, a densidade é um importante parâmetro para avaliação da qualidade da madeira. No entanto, tal variável é muito complexa e resulta de inúmeros fatores tais como dimensão das fibras, espessura da parede celular, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira do cerne e alburno e arranjo dos elementos anatômicos (SILVEIRA; REZENDE; VALE, 2013).

Um dos problemas relacionados ao teor de umidade presente na biomassa é que a temperatura decresce com o aumento do teor de umidade do combustível. Ao jogar combustível com alta umidade no queimador pode ocasionar uma alteração súbita da temperatura surgindo uma área de combustão incompleta que acarretará concentrações elevadas de CO₂ nos gases de combustão (NYSTRÖM; DAHLQUIST, 2004).

Segundo Quirino e Abreu (2005) a utilização da madeira como combustível mostra que a combustão direta da madeira é o processo mais simples e econômico para se obter energia. Tal fato pode ser confirmado, pela ampla utilização deste biocombustível nas indústrias cerâmicas. No entanto, o rendimento energético de um processo de combustão da madeira depende sobretudo da sua composição química, onde os teores de celulose,

hemicelulose, lignina, extrativos e substâncias minerais variam de acordo com a espécie da madeira utilizada no processo de queima.

O presente trabalho busca, através de pesquisa bibliográfica, identificar os artigos científicos mais relevantes sobre o teor de umidade presente na madeira e as técnicas de secagem da mesma, publicados até o ano de 2020. Busca-se definir os veículos e autores mais relevantes sobre o assunto, bem como, verificar o avanço na produção de trabalhos ao longo dos anos.

2. METODOLOGIA

Visando identificar trabalhos que abordam sobre o teor de umidade presente na madeira e técnicas de secagem da mesma foi realizado um estudo bibliométrico com o auxílio do sistema estatístico R. A bibliometria trata-se de um conjunto de técnicas cujo principal objetivo é quantificar o processo de comunicação escrita e vem sendo utilizada para identificar os autores mais produtivos com o intuito de encontrar paradigmas nos estudos científicos e na identificação de periódicos que mais tratam sobre o assunto (SILVA *et al.*, 2016).

O presente trabalho baseia-se na pesquisa de Costa (2010), conduzindo-se pelas seguintes etapas:

- 1) Definição da amostra da pesquisa;
- 2) Pesquisa da amostra com as palavras-chave;
- 3) Identificação dos periódicos com o maior número de artigos publicados sobre o tema;
- 4) Levantamento da cronologia da produção;
- 5) Seleção de artigos com o maior número de citações;
- 6) Identificação dos autores com o maior número de publicações sobre o tema.

Na primeira etapa (definição da amostra) serão utilizados os periódicos publicados na base de dados Scopus[®]. Tal escolha justifica-se pelo Scopus[®] ser o maior banco de dados de resumos e citações de literaturas revisadas, tais como, periódicos e livros (ELSEVIER, 2020). O conjunto de trabalhos utilizados é composto por publicações na base até o ano de 2020.

As palavras-chaves escolhidas para execução da segunda etapa (pesquisa da amostra com palavras-chave) são: *energy*, *combustion*, *drying*, *wood* e *heat*. A partir da escolha das palavras-chaves, foram definidos os tesouros a serem utilizados conforme identificado na Figura 1.

FIGURA 1 – Palavras-chaves e tesouros correspondentes.

	A	B	C	D	E
Palavra Chave	Energia	Combustão	Secagem	Madeira	Calor
Tradução em Inglês	Energy	Combustion	Drying	Wood	Heat
Tesouros	Heat Power Enthalpy Power Released Energy Potency Heat	Burn Oxidation Reaction Oxidization Ignition Fuel	Moisture Dump Wet Humid Dry	Sawdust Firewood Timber Biomass	Thermal Hot

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Conforme mostrado na Figura 1, as palavras-chaves e os tesouros foram identificados com os termos A, B, C, D e E, e, tal identificação será utilizada até o final deste artigo.

Uma vez definidas as palavras-chaves e seus tesouros a pesquisa foi formulada e realizada na base de dados Scopus®. A pesquisa possui um corte temporal e exclui os trabalhos publicados em 2021, uma vez que o ano não terminou na data de realização da presente pesquisa. Para realização desta análise foram considerados apenas artigos científicos. A consulta realizada está identificada na Figura 2.

FIGURA 2 – Pesquisa realizada na base de dados Scopus®.

(TITLE-ABS-KEY (<i>energy*</i> OR <i>enthalpy*</i> OR <i>heat</i> AND <i>power*</i> OR <i>power*</i> OR <i>released</i> AND <i>energy*</i> OR <i>potency*</i> OR <i>heat*</i>) AND TITLE-ABS-KEY (<i>combustion*</i> OR <i>fuel*</i> OR <i>burn*</i> OR <i>oxidation*</i> OR <i>oxidization*</i> OR <i>reaction*</i> OR <i>ignition*</i>) AND TITLE-ABS-KEY (<i>dry*</i> OR <i>drying*</i> OR <i>wet*</i> OR <i>dump*</i> AND <i>humid*</i> OR <i>moisture*</i>) AND TITLE-ABS-KEY (<i>wood*</i> OR <i>timber*</i> OR <i>sawdust*</i> OR <i>firewood*</i> OR <i>biomass*</i>) AND TITLE-ABS-KEY (<i>heat*</i> OR <i>thermal*</i> OR <i>hot*</i>) AND PUBYEAR < 2021 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))	Tesouros de A Tesouros de B Tesouros de C Tesouros de D Tesouros de E Corte temporal
---	---

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Nas etapas seguintes (3 a 6) serão levantadas informações sobre os periódicos com maior número de publicações sobre o tema, autores com o maior número de publicações,

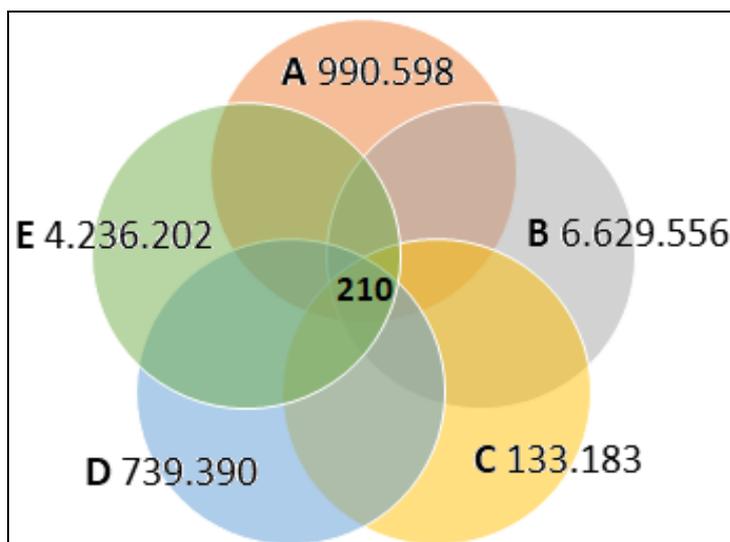
cronologia da produção e periódicos com o maior número de citações conforme o resultado encontrado na amostra.

3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

3.1 Pesquisa na base de conhecimento utilizando palavras-chave e seus tesouros

Conforme exposto na metodologia, na segunda etapa foi executada a pesquisa utilizando as palavras-chave e os tesouros identificados na Figura 1. Foram realizadas ainda pesquisas com cada uma das palavras-chave individualmente e os resultados estão apresentados na Figura 3, através do Diagrama de *Veen*.

FIGURA 3 – Diagrama de Venn com a quantidade de dados encontrados na base de dados Scopus®.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Através do resultado exposto na Figura 3 é possível observar que a quantidade de publicações envolvendo as cinco palavras-chave e seus respectivos tesouros simultaneamente representa menos de 0,5% da união entre o total de periódicos de ambos os conceitos individuais. A distribuição dos 210 registros encontrados está apresentada no Quadro 1.

QUADRO 1 – Distribuição de registros encontrados por tipo de documento.

Tipo de publicação	Quantidade de registros
Artigos	127
Resumos de conferências	62
Revisões	8
Capítulo de livro	6
Análise	6
Nota	1

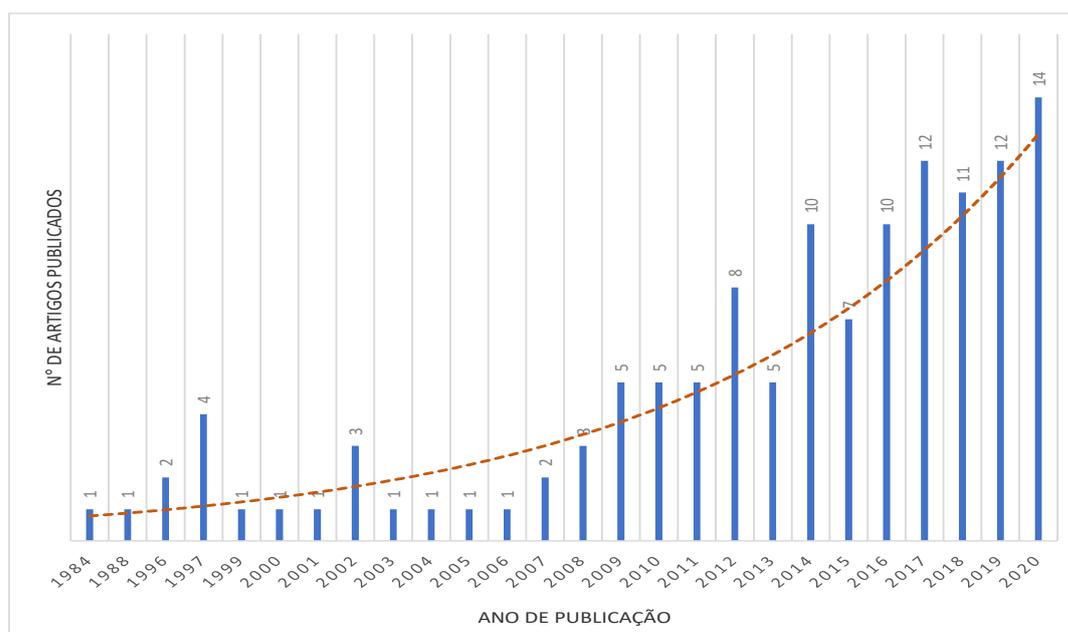
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A pesquisa foi refinada considerando apenas os artigos científicos publicados em periódicos, descartando os resumos de conferências, revisões, capítulos de livros, análises e notas. Sendo assim, a análise bibliométrica foi realizada sobre estes 127 documentos.

3.2 Cronologia da produção

Para o levantamento cronológico sobre o tema pesquisado foram considerados os artigos científicos que constam na base de dados Scopus[®] contendo as palavras-chaves e seus respectivos tesouros, conforme observado na Figura 2. A representação cronológica deste estudo encontra-se representada na Figura 4.

FIGURA 4 – Levantamento cronológico das publicações.



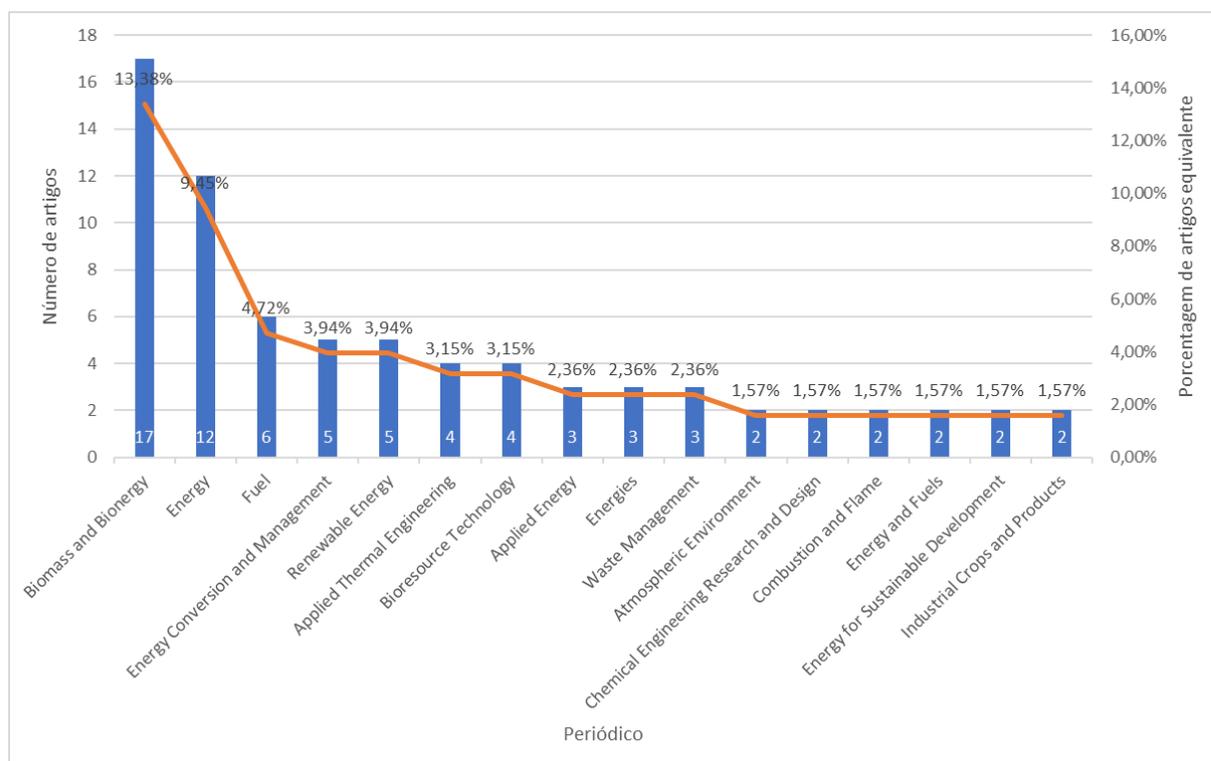
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

O primeiro artigo científico publicado sobre o tema encontrado na base de dados Scopus® data de 1984. Avaliando o volume de publicações ao longo dos anos, os dados apresentam um aumento significativo na última década, com 99 publicações. Em 2020, foram identificadas 14 publicações, sendo assim, justifica-se a realização do presente estudo.

3.3 Veículos de comunicação científica

Neste tópico são apresentados os periódicos com mais publicações de acordo com a pesquisa realizada. Ao total foram identificados 69 veículos de comunicação científica na base de dados Scopus®, que atendiam aos parâmetros propostos nesta pesquisa. A Figura 5 apresenta os periódicos que possuem dois ou mais artigos publicados sobre o tema proposto, nela é possível observar os títulos e sua respectiva quantidade de documentos, e a porcentagem equivalente de artigos por periódico em relação ao total de 127 trabalhos obtidos.

FIGURA 5 – Distribuição de registros por veículo de publicação.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

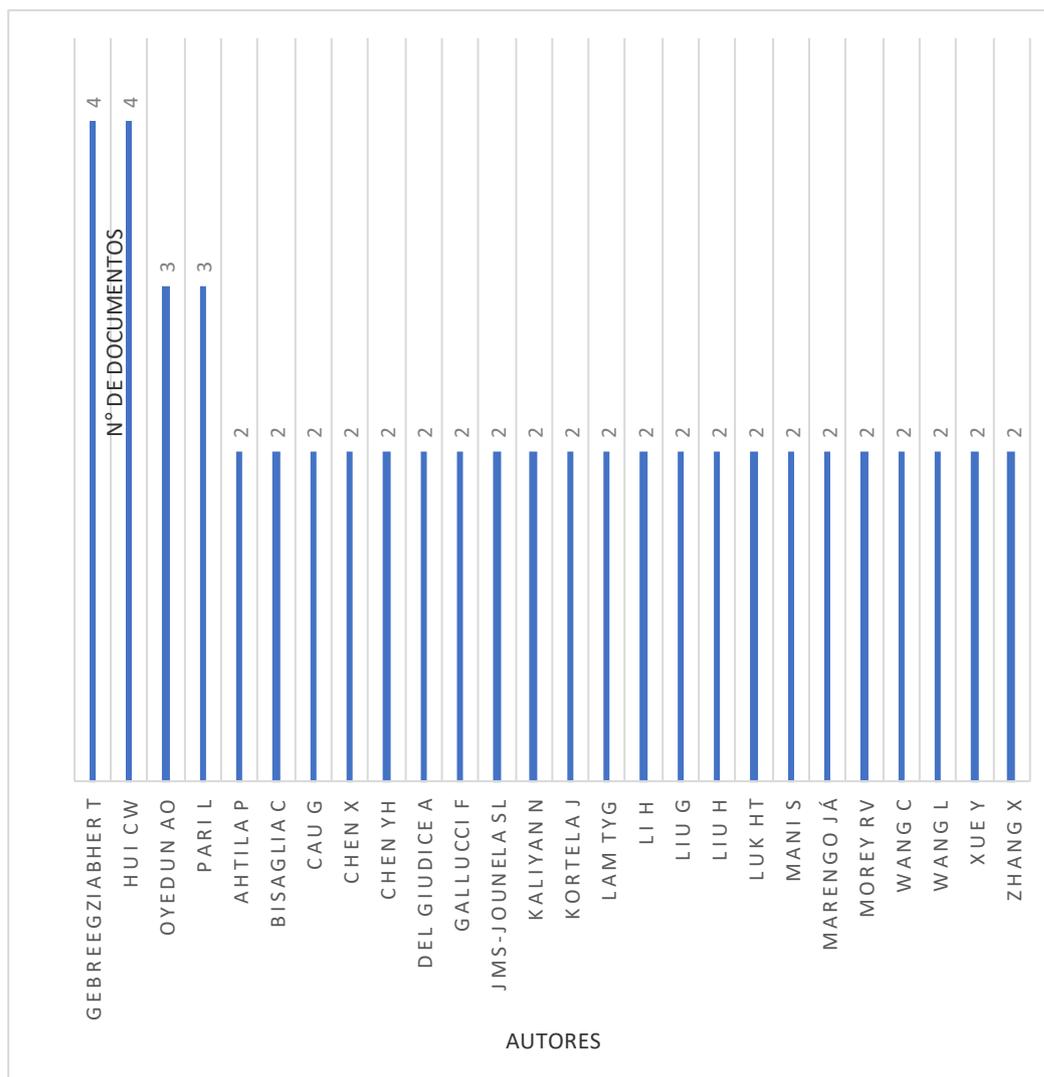
Através da análise da Figura 5 é possível observar que dois periódicos se destacam: *Biomass and Bioenergy* e *Energy*, cuja quantidade de publicações equivale a

aproximadamente 23% do total de artigos obtidos na pesquisa (127), seguidos de oito outros: *Fuel*, *Energy Conversion and Management*, *Renewable Energy*, *Applied Thermal Engineering*, *Bioresource Technology*, *Applied Energy*, *Energies* e *Waste Management* que juntos correspondem a aproximadamente 26% do total de artigos. Uma vez que tais periódicos apresentam maior atuação na área, especialmente os dois primeiros, os mesmos devem ser monitorados frequentemente devido a maior possibilidade de apresentarem artigos relevantes sobre o tema proposto. Os demais periódicos representam menos de 1,6% do total, cada.

3.4 Autores com o maior número de publicações

Nesta seção são apresentados os autores e coautores com o maior número de publicações sobre as palavras-chave propostas e seus respectivos tesouros. A busca retornou um total de 954 autores. A Figura 6 apresenta os vinte e seis autores que mais publicaram sobre o tema proposto e a quantidade de artigos publicados pelos mesmos. Esta figura limita a apresentação dos autores que têm pelo menos dois artigos indexados na base de dados Scopus®.

FIGURA 6 – Autores com o maior número de publicações.



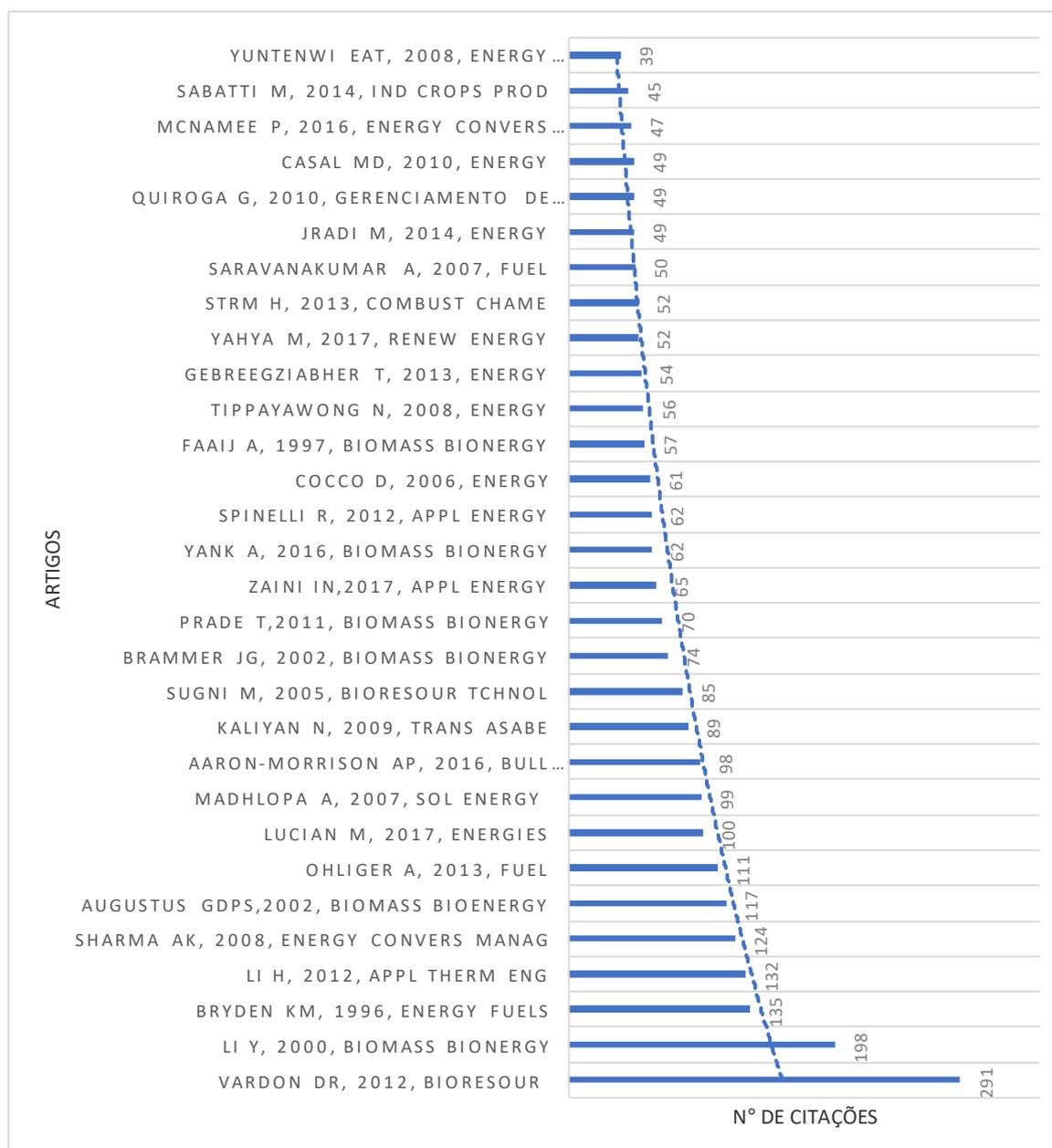
Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Nota-se que os vinte e seis autores que mais publicaram correspondem a aproximadamente 3% do total de autores encontrados na pesquisa e, seus trabalhos correspondem a cerca de 46% do total de trabalhos que retornaram na pesquisa. Não foi possível observar a incidência de algum autor predominante, possivelmente por ainda não ser um tema consolidado quando comparado com os estudos publicados individualmente, conforme mostrado na Figura 3.

3.5 Artigos mais relevantes

Nesta seção, foram identificados os artigos que apresentavam os maiores números de citações. Dentre os artigos que retornaram neste estudo, a Figura 7 apresenta os trinte artigos mais relevantes sobre o tema, que serão o núcleo de referência para futuras pesquisas.

FIGURA 7 – Publicações com o maior número de citações



Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

Nota-se que o artigo mais citado foi o *Thermochemical conversion of raw and defatted algal biomass via hydrothermal liquefaction and slow pyrolysis*, de Vardon D. R., Sharma B. K., Blazina G. V., Rajagopalan K., Strathmann T. J., publicado em 2012, no periódico

Bioresource Technology, com 291 citações, seguido do *High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel*, de Li Y. e Liu H., publicado em 2000, no periódico *Biomass and Bioenergy*, com 198 citações. Pode-se observar que o periódico que se destaca com o maior número de citações é o *Biomass and Bioenergy*, que neste estudo apresenta-se também como o periódico com o maior número de publicações sobre a temática estudada. Sendo assim, é de suma importância que este periódico seja monitorado frequentemente, uma vez que, tem mais possibilidade de apresentar artigos relevantes sobre o tema proposto.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da realização da presente análise bibliométrica, pode-se observar diversas características relevantes sobre o tema proposto. Os dados obtidos nesta análise reforçam o evidente crescimento da produção científica sobre o teor de umidade presente na madeira e as técnicas de secagem da mesma, principalmente na última década, evidenciado pelo levantamento cronológico.

A pesquisa realizada na base de dados Scopus retornou 210 trabalhos, sendo 127 artigos científicos que foram utilizados neste estudo. Quanto aos periódicos com o maior número de publicações, destaca-se o periódico *Biomass and Bioenergy*, com 17 publicações indexadas, que equivale a 13,38% dos trabalhos que retornaram nesta pesquisa. Outro periódico a ser monitorado é o *Energy*, com 12 publicações, equivalente a 9,45% dos periódicos resultantes deste estudo.

Dentre os autores com o maior número de publicações, destacam-se Gebreegziabher, T. e Hui C. W., ambos com quatro publicações indexadas na base de dados Scopus sobre a temática estudada. No entanto, apenas Gebreegziabher, T. possui um trabalho que se destaca entre os artigos com o maior número de citações, e o mesmo será monitorado para publicações futuras.

Para trabalhos futuros, propõe-se a realização da pesquisa em outras bases de dados tais como *Web of Science* e *Science Direct* e realizar um comparativo entre os resultados obtidos nas três bases de dados. Tais dados permitirão a identificação de mais tendências e consequentemente conclusões mais completas e abrangentes.

REFERÊNCIAS

COSTA, H. G. Modelo para webibliomining: proposta e caso de aplicação. **Revista da FAE**, v. 13, n. 1, p. 115–126, 2010.

ELSEVIER, 2020. **Scopus Content Guide**. Disponível em:< https://www-elsevier-com.ez26.periodicos.capes.gov.br/__data/assets/pdf_file/0007/69451/Scopus_ContentCoverage_Guide_WEB.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2020.

NYSTRÖM, J.; DAHLQUIST, E. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants—a review. **Fuel**, v. 83, n. 7, p. 773–779, 1 maio 2004.

QUIRINO, W. F.; ABREU, L. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100–106, 2005.

SILVA, F.; SANTOS, E. B. A.; BRANDÃO, M. M.; VILS, L. Estudo bibliométrico: orientações sobre sua aplicação. **Revista Brasileira de Marketing**, v. 15, n. 2, p. 246–262, 2016.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. do. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 2, p. 179–184, jun. 2013.

XU, K.; LU, J.; GAO, Y.; WU, Y.; LI, X. Determination of moisture content and moisture content profiles in wood during drying by low-field nuclear magnetic resonance. **Drying Technology**, v. 35, n. 15, p. 1909–1918, 18 nov. 2017. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1291519>.