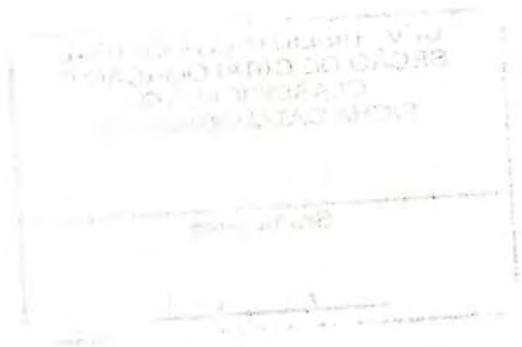


ROBERTA MARTINS NOGUEIRA

**SECAGEM DA CASTANHA-DO-BRASIL EM CONDIÇÕES DE
FLORESTA E CARBONIZAÇÃO DO RESÍDUO DO FRUTO DA
CASTANHEIRA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS- BRASIL
2011**



**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

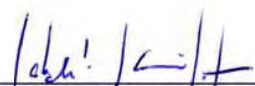
T	
N778s	Nogueira, Roberta Martins, 1984-
2011	Secagem da Castanha-do-Brasil em condições de floresta e carbonização do resíduo do fruto da castanheira / Roberta Martins Nogueira. – Viçosa, MG, 2011. xvi, 132f. : il. (algumas col.) ; 29cm.
	Orientador: Juarez de Sousa e Silva. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. Inclui bibliografia.
	1. Castanha-do-pará. 2. Castanha-do-pará - Fisiologia pós-colheita. 3. Castanha-do-pará - Propriedades físicas. 4. Secagem. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.
	CDD 22. ed. 634.575

ROBERTA MARTINS NOGUEIRA

**SECAGEM DA CASTANHA-DO-BRASIL EM CONDIÇÕES DE
FLORESTA E CARBONIZAÇÃO DO RESÍDUO DO FRUTO DA
CASTANHEIRA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

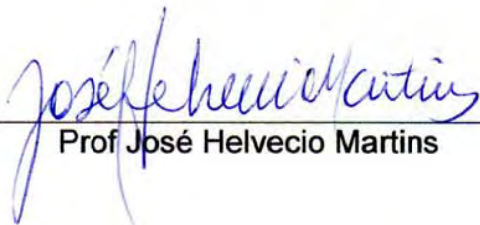
APROVADA: 19 de Julho de 2011.



Prof Roberto Precci Lopes
(co-orientador)



Prof Pedro Amorim Berbert



Prof José Helvecio Martins



DSc. Sérgio Maurício Lopes Donzeles



Prof. Juarez de Sousa e Silva
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À EMBRAPA – Acre, pelo apoio técnico e financeiro ao trabalho.

À Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Sinop, pelo apoio irrestrito a este trabalho.

À Prefeitura Municipal de Itaúba, em nome do Prefeito Sr. Raimundo Zanon e do técnico Wagner Nascimento, pela confiança e apoio durante a realização dos testes.

À Associação dos Coletadores de Castanha do Município de Itaúba, por acreditarem neste trabalho e abrir as portas sempre que necessário.

Ao professor Juarez de Sousa e Silva, pela sua inestimável amizade e confiança.

Aos co-orientadores Prof. Roberto Precci Lopes e Jadir Nogueira da Silva, pelo apoio nas horas difíceis e pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Ao padrinho e Prof. Márcio Arêdes Martins, pela mão amiga nos momentos em que mais precisei.

À Profa. Lêda Rita D'Antonino Faroni, pela confiança e palavras de apoio durante esta jornada.

Ao meu esposo, Evaldo, pelo amor, compreensão e companheirismo.

Aos meus pais, Regina Célia Martins Nogueira e Roberto de Jesus Nogueira, e irmãos, Fabiano Nogueira e Renata Martins, pelo exemplo e apoio.

Aos amigos Profa. Solenir, Prof. Fernando, Prof. Vinícius e Prof. Rodrigo, sem os quais não teria sido possível realizar este trabalho.

Ao Prof. Frederico Terra de Almeida, pela confiança e apoio quando tudo parecia sucumbir.

À Pesquisadora Virgínia Álvares de Souza, por possibilitar a execução deste trabalho e pelo companheirismo nos momentos árdusos.

À amiga Juliana Lobo Paes, sempre disposta a ajudar mesmo quando o tempo lhe dizia NÃO.

Aos meus amigos e alunos, Felipe, Juciane, Rodolfo, Estêvão e Thales, pelo apoio na realização deste trabalho.

Aos meus alunos do curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso - Campus Sinop, pela compreensão das ausências necessárias.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste sonho.

BIOGRAFIA

Roberta Martins Nogueira, filha de Roberto de Jesus Nogueira e Regina Célia Martins Nogueira, nasceu em Linhares - ES, no dia 03 de Janeiro de 1984.

Em maio de 2002, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, colando grau em Agosto de 2007.

No período de Julho de 2006 a Janeiro de 2007, cursou um semestre letivo na University of Kentucky, em Lexington, KY, USA, pelo programa CAPES-FIPSE.

Em Agosto de 2007, iniciou o Programa de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, na área de Energia na Agricultura, sendo bolsista do CNPq, submetendo-se à defesa de dissertação em dezembro de 2008.

Em Fevereiro de 2009 foi aprovada em concurso público para docente na Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Sinop, assumindo o cargo em Julho do mesmo ano.

Iniciou o programa de Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, na área de Energia na Agricultura, em Março de 2009, submetendo-se à defesa de tese em Julho de 2011.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
- CAPÍTULO 1 -	9
PROPRIEDADES FÍSICAS DA CASTANHA-DO-BRASIL.....	9
MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
Forma e tamanho das sementes	14
Massa de 1000 sementes.....	17
Porosidade.....	20
Massa específica aparente	21
Ângulo de repouso.....	21
Análises estatísticas	23
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
Tamanho.....	23
Forma	24
Massa de 1000 amêndoas.....	25
Massa específica real	27
Porosidade.....	27
Massa específica aparente	28
Ângulo de repouso.....	29

CONCLUSÕES.....	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
- CAPÍTULO 2 -.....	34
MATERIAL E MÉTODOS.....	46
Projeto do secador	46
Construção do protótipo do secador projetado.....	60
Instrumentação do protótipo.....	67
Testes com o protótipo	69
Testes de validação do secador.....	76
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
Dimensionamento do secador.....	80
Testes com o protótipo	85
Testes de validação do secador	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
- CAPÍTULO 3 -.....	106
PRODUÇÃO DE CARVÃO A PARTIR DO OURIÇO DA CASTANHA-DO-BRASIL	106
INTRODUÇÃO	107
MATERIAIS E MÉTODOS.....	113
Reator	113
Carbonização.....	115
Rendimento gravimétrico	120
Densidade aparente e a granel.....	120
Análise química imediata	122
Poder calorífico superior.....	122
Análises estatísticas	123
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	123
CONCLUSÕES	129

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
CONCLUSÕES GERAIS	131

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 1 – ÁRVORE DE CASTANHA-DO-BRASIL (<i>BERTHOLETTIA EXCELSA</i> HUMBOLDT & BONPLAND).	10
FIGURA 2 – FRUTO E SEMENTES DA CASTANHA-DO-BRASIL.	11
FIGURA 3 – MÁQUINA ADAPTADA PARA EXTRAÇÃO DA SEMENTE DA CASTANHA-DO-BRASIL.	13
FIGURA 4 – CASTANHAS COM CASCA PARA DETERMINAÇÃO DA FORMA.	14
FIGURA 5 – CASTANHAS SEM TEGUMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA FORMA.	15
FIGURA 6 – DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA CASTANHA COM TEGUMENTO.	16
FIGURA 7 – DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA CASTANHA DESCASCADA.	16
FIGURA 8 - FORMA PIRAMIDAL DA CASTANHA-DO-BRASIL COM TEGUMENTO.	17
FIGURA 9 – FORMA ELIPSOIDAL DA CASTANHA-DO-BRASIL SEM TEGUMENTO.	17
FIGURA 10 – DETALHE DA ABERTURA DO HILO E LINHAS DE FRATURA QUE PERMITEM A ENTRADA DE LÍQUIDO NO INTERIOR DAS AMÊNDOAS.	18
FIGURA 11 – FORMAÇÃO DE BOLHAS DE AR DURANTE A DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA, UTILIZANDO O TOLUENO.	18
FIGURA 12 – APARATO PARA DETERMINAÇÃO DE MASSA ESPECÍFICA UNITÁRIA PELO PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES; (A) DETALHE DO SUPORTE E (B) DETALHE DO PINO.	19
FIGURA 13 – DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA UNITÁRIA DA CASTANHA-DO-BRASIL; (A) CASTANHA FIXADA AO SUPORTE E (B) CASTANHA IMERSA EM MERCÚRIO METÁLICO.	20
FIGURA 14 – (A) ESQUEMA PARA DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE REPOUSO E (B) APARATO PARA DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE REPOUSO.	22
FIGURA 15 – DIFERENÇAS ENTRE OS FORMATOS DAS AMÊNDOAS COM E SEM TEGUMENTO.	24
FIGURA 16 – DETALHE DA PROTUBERÂNCIA PRESENTE NO TEGUMENTO DA AMÊNDOA.	25
FIGURA 17 – VALORES PARA A MASSA DE 1000 AMÊNDOAS COM E SEM TEGUMENTO.	26
FIGURA 18 – RELAÇÃO DE VOLUME OCUPADO PELO AR E PELAS AMÊNDOAS (A) COM TEGUMENTO E (B) SEM TEGUMENTO.	28
FIGURA 19 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ÂNGULO DE REPOUSO CITADOS POR SILVA (2008) E O ENCONTRADO NESTE TRABALHO PARA A CASTANHA-DO-BRASIL COM TEGUMENTO.	30

CAPÍTULO 2

FIGURA 1 - TERREIRO DE CIMENTO PARA SECAGEM DE CASTANHA DE CAJU.	36
FIGURA 2 - SECADOR SOLAR PARA SECAGEM DE CASTANHA DE CAJU.	36
FIGURA 3 - SECADOR DE CAMADA FIXA PARA SECAGEM DE PISTACHE.	37

FIGURA 4 - SECADOR DE FLUXO CRUZADO PARA SECAGEM DE PISTACHE.	37
FIGURA 5 - SECADOR VERTICAL CILÍNDRICO PARA SECAGEM DE PISTACHE.	38
FIGURA 6 - SECADOR VERTICAL EM FUNIL PARA PISTACHE.	38
FIGURA 7 - OURIÇO DA CASTANHA-DO-BRASIL.	41
FIGURA 8 - SEMENTES DE CASTANHA-DO-BRASIL EM CASCA SENDO RETIRADAS DO OURIÇO.	41
FIGURA 9 - CASTANHAS DESCASCADAS, PRONTAS PARA O CONSUMO.	41
FIGURA 10 - AMONTOAMENTO DOS OURIÇOS DURANTE A COLETA.	43
FIGURA 11 - QUEBRA E SELEÇÃO DOS OURIÇOS.	43
FIGURA 12 - LAVAGEM OU SEPARAÇÃO HIDRÁULICA DAS CASTANHAS.	43
FIGURA 13 - PRÉ-SECAGEM DA CASTANHA-DO-BRASIL FORA DA ÁREA DE COLETA.	44
FIGURA 14 – ELEMENTOS CONSTITUINTES DO SECADOR PROJETADO.	48
FIGURA 15 - FATOR DE CORREÇÃO PARA UM TROCADOR DE CALOR DE ESCOAMENTO CRUZADO, COM PASSE ÚNICO, COM OS DOIS FLUIDOS NÃO-MISTURADOS.	51
FIGURA 16 – PERDA DE CARGA POR METRO DE CAMADA DE NOZ MACADÂMIA.	54
FIGURA 17 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA TROCADOR DE CALOR-CHAMINÉ.	59
FIGURA 18 – PROTÓTIPO DO SECADOR UTILIZADO NOS TESTES EXPERIMENTAIS.	61
FIGURA 19 – FORNALHA EM AÇO: (A) VISTA GERAL E (B) DETALHE DA GRELHA E DA UNIÃO COM O TROCADOR DE CALOR.	62
FIGURA 20 – DETALHE DO TRAVAMENTO DO TROCADOR DE CALOR NO INTERIOR DO SECADOR.	63
FIGURA 21 – DETALHE DO COTOVELO DE UNIÃO COM O TROCADOR DE CALOR E DO FLANGE PARA DESMONTAGEM DA CHAMINÉ.	64
FIGURA 22 – VISTA INTERNA DA CÂMARA <i>PLENUM</i>	64
FIGURA 23 – ABERTURAS PARA ENTRADA DE AR AMBIENTE NA BASE DA CÂMARA <i>PLENUM</i>	65
FIGURA 24 – DETALHE DA CÂMARA DE SECAGEM.	66
FIGURA 25 – PORTA PARA O DESCARREGAMENTO DO SECADOR.	66
FIGURA 26 – ESQUEMA DA INSTALAÇÃO DOS TERMOPARES.	67
FIGURA 27 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E PONTOS DE TOMADA DE TEMPERATURA.	68
FIGURA 28 – DETALHE DA LOCALIZAÇÃO DO TERMOHIGROANEMÔMETRO EM RELAÇÃO AO SECADOR. .	69
FIGURA 29 – ESQUEMA DO CORTE TRANSVERSAL DO PROTÓTIPO MOSTRANDO OS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR OCORRIDOS.	72
FIGURA 30 – LIMPEZA E MARCAÇÃO DO TERRENO.	76
FIGURA 31 – INÍCIO DA EXECUÇÃO DA CONSTRUÇÃO EM ALVENARIA.	77
FIGURA 32 – INSTALAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR E EXECUÇÃO DA ALVENARIA.	77
FIGURA 33 – FINALIZAÇÃO DA CÂMARA <i>PLENUM</i> E DETALHE DA ABERTURA PARA A CHAMINÉ.	77
FIGURA 34 – EXECUÇÃO DA CONSTRUÇÃO DA CHAMINÉ E DETALHE DA FORNALHA.	78
FIGURA 35 – SECADOR PARA TESTES DE VALIDAÇÃO FINALIZADO.	78
FIGURA 36 – TESTE DE VALIDAÇÃO COM O SECADOR PROPOSTO.	79
FIGURA 37 – DETALHE DA CASTANHA EM CONDIÇÕES NATURAIS (A) E DEPOIS DO PROCESSO DE LAVAGEM (B).	79
FIGURA 38 – PERDA DE CARGA POR METRO DE COLUNA DE PRODUTO, PARA NOZ-MACADÂMIA EM CASCA, MILHO, TRIGO E SOJA (BIAGGIONI <i>ET AL.</i> , 2005).	83

FIGURA 39 – DETALHE INTERNO DA CÂMARA <i>PLENUM</i> : ELEMENTOS E SUAS DIMENSÕES.....	84
FIGURA 40 – PERFIL DE TEMPERATURA PARA O TESTE 1 COM O PROTÓTIPO.	86
FIGURA 41 - PERFIL DE TEMPERATURA PARA O TESTE 2 COM O PROTÓTIPO.	87
FIGURA 42 - PERFIL DE TEMPERATURA PARA O TESTE 3 COM O PROTÓTIPO.	87
FIGURA 43 - PERFIL DE TEMPERATURA PARA O TESTE 4 COM O PROTÓTIPO.	88
FIGURA 44 - PERFIL DE TEMPERATURA PARA O TESTE 5 COM O PROTÓTIPO – OURIÇO COMO COMBUSTÍVEL.	88
FIGURA 45 – RACHADURAS OCASIONADAS POR ELEVADA TEMPERATURA NA MASSA DE CASTANHA.....	89
FIGURA 46 – CURVA DE SECAGEM DA CASTANHA-DO-BRASIL PARA O TESTE 1.....	90
FIGURA 47 - CURVA DE SECAGEM DA CASTANHA-DO-BRASIL PARA O TESTE 2.	90
FIGURA 48 - CURVA DE SECAGEM DA CASTANHA-DO-BRASIL PARA O TESTE 3.	91
FIGURA 49 - CURVA DE SECAGEM DA CASTANHA-DO-BRASIL PARA O TESTE 4.	91
FIGURA 50 - CURVA DE SECAGEM DA CASTANHA-DO-BRASIL PARA O TESTE 5.	92
FIGURA 51 - COMPARAÇÃO ENTRE O CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA REAL E O CONSUMO ESPECÍFICO CORRIGIDO DESCONSIDERANDO-SE AS PERDAS.	99
FIGURA 52 – ASPECTO VISUAL DA CASTANHA OBTIDA NO TESTE 3.	101

CAPÍTULO 3

FIGURA 1 - FORNO DE SUPERFÍCIE.	110
FIGURA 2 - FORNO RABO-QUENTE.	110
FIGURA 3 - FORNOS DE ENCOSTA.	111
FIGURA 4 - FORNO METÁLICO PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO.	112
FIGURA 5 – REATOR CILÍNDRICO UTILIZADO PARA A CARBONIZAÇÃO DO OURIÇO DA CASTANHA-DO- BRASIL.	114
FIGURA 6 – DETALHE DO REATOR PARA CARBONIZAÇÃO: (A) DETALHE SUPERIOR, E; (B) DETALHE DO FUNDO DO TAMBOR.	114
FIGURA 7 – DETALHE DA TAMPA PARA VEDAÇÃO DO REATOR.	115
FIGURA 8 – PESAGEM E ABASTECIMENTO DO REATOR.	115
FIGURA 9 – DETALHE DAS ABERTURAS PARA ENTRADA DO COMBURENTE.	116
FIGURA 10 – DETALHE DO MAÇARICO UTILIZADO PARA O INÍCIO DA COMBUSTÃO.	116
FIGURA 11 – COMBUSTÃO DOS OURIÇOS LOCALIZADOS NA BASE DO REATOR PARA GARANTIR A TEMPERATURA NECESSÁRIA À PIRÓLISE.	117
FIGURA 12 – BASE ELEVADA PARA INSTALAÇÃO DO REATOR.	117
FIGURA 13 – DETALHE DA VEDAÇÃO DAS ENTRADAS DE COMBURENTE.	118
FIGURA 14 – VEDAÇÃO DO REATOR COM A TAMPA METÁLICA.	118
FIGURA 15 – DETALHE DA VEDAÇÃO DA PARTE SUPERIOR DO REATOR COM MASSA.	119
FIGURA 16 – PRESENÇA DE CHAMAS NA PARTE SUPERIOR DO REATOR, CARACTERIZANDO O MOMENTO DE SUA VEDAÇÃO.	119
FIGURA 17 – APARATO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA A GRANEL DO CARVÃO DO OURIÇO DA CASTANHA.	121
FIGURA 18 – APARATO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA BÁSICA.	121

FIGURA 19 – COMPARATIVO DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO ENTRE OS TESTES.	124
FIGURA 20 – OURIÇO UTILIZADO NA CARBONIZAÇÃO.....	125
FIGURA 21 – CARVÃO PRODUZIDO A PARTIR DO OURIÇO.....	125
FIGURA 22 – OURIÇO COM CARBONIZAÇÃO INCOMPLETA.	125

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO GERAL

TABELA 1 – COMPARAÇÃO DA DENSIDADE ENERGÉTICA, MATERIAL VOLÁTIL E CARBONO FIXO ENTRE O RESÍDUO DO FRUTO DA CASTANHEIRA E OUTRAS ESPÉCIES FLORESTAIS.....	6
--	---

CAPÍTULO 1

TABELA 1 – VALORES MÉDIOS E ERRO PADRÃO PARA O TAMANHO DAS AMÊNDOAS COM E SEM TEGUMENTO	23
TABELA 2 – VALORES MÉDIOS E ERRO PADRÃO PARA A ESFERICIDADE E CIRCULARIDADE DAS AMÊNDOAS COM E SEM TEGUMENTO	24
TABELA 3 – VALORES MÉDIOS E DESVIO PADRÃO DA MASSA UNITÁRIA (m_{unit}), VOLUME UNITÁRIO (V_{unit}) E MASSA ESPECÍFICA REAL (ρ_{real}) PARA AMÊNDOAS COM E SEM TEGUMENTO	27
TABELA 4 – VALORES MÉDIOS E DESVIO PADRÃO PARA A MASSA ESPECÍFICA REAL (ρ_{real}), POROSIDADE (ε) E MASSA ESPECÍFICA APARENTE (ρ_{ap}) PARA AMÊNDOAS COM E SEM TEGUMENTO.	29

CAPÍTULO 2

TABELA 1 - RECOMENDAÇÕES PARA A SECAGEM DA NOZ-MACADÂMIA	39
TABELA 2 – DIMENSÕES DO PROTÓTIPO DO SECADOR	61
TABELA 3 – LOCALIZAÇÃO DETALHADA DOS TERMOPARES NO SECADOR	67
TABELA 4 – PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR	81
TABELA 5 – VALORES DOS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA EFETIVIDADE DO TROCADOR DE CALOR.....	81
TABELA 6 – VALORES DOS PARÂMETROS PARA A DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	82
TABELA 7 – RESUMO DAS CONDIÇÕES DE EXECUÇÃO DOS TESTES COM O PROTÓTIPO: MASSA INICIAL (M_i), ESPESSURA DA CAMADA ($\bar{E}SP.$), TEOR DE ÁGUA INICIAL (U_i), TEOR DE ÁGUA FINAL (U_f), TEMPERATURA DO AR NA ENTRADA DA CAMADA DE PRODUTO ($T_{AR SEC}$), MASSA DE ÁGUA EVAPORADA (M_{AE}), TEMPO DE SECAGEM (T_s) E CAPACIDADE DE SECAGEM (C_s).....	85
TABELA 8 – CONDIÇÕES DO AR AMBIENTE DURANTE A REALIZAÇÃO DOS TESTES: TEMPERATURA MÉDIA (T_M) E UMIDADE RELATIVA MÉDIA (UR_M)	86

TABELA 9 – MASSA DE LENHA CONSUMIDA, ENERGIA DISPONÍVEL, TEMPO DE SECAGEM E TAXA DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DURANTE OS TESTES COM O PROTÓTIPO.....	93
TABELA 10 – CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA (CEE) DURANTE OS TESTES COM O PROTÓTIPO.....	94
TABELA 11 – CARACTERIZAÇÃO DO EFEITO PREDOMINANTE DA CONVECÇÃO SOBRE O SECADOR.	95
TABELA 12 - CARACTERIZAÇÃO DO EFEITO PREDOMINANTE DA CONVECÇÃO SOBRE A FORNALHA.....	95
TABELA 13 – PARÂMETROS PARA A ESTIMATIVA DA PERDA RELATIVA À CONVECÇÃO DAS PAREDES DO SECADOR COM O MEIO EXTERNO: NÚMERO DE GRASHOF (Gr_L); NÚMERO DE RAYLEIGH (Ra_L); NÚMERO DE REYNOLDS (Re_L); NÚMERO DE NUSSOLT (Nu_L); COEFICIENTE DE CONVECÇÃO (H) E; TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO DO SECADOR ($q'_{conv,s}$)	95
TABELA 14 - PARÂMETROS PARA A ESTIMATIVA DA PERDA RELATIVA À CONVECÇÃO DAS PAREDES DA FORNALHA COM O MEIO EXTERNO: NÚMERO DE GRASHOF (Gr_L); NÚMERO DE RAYLEIGH (Ra_L); NÚMERO DE REYNOLDS (Re_L); NÚMERO DE NUSSOLT (Nu_L); COEFICIENTE DE CONVECÇÃO (H) E; TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO DA FORNALHA ($q'_{conv,f}$)	96
TABELA 15 - PARÂMETROS PARA A ESTIMATIVA DA PERDA RELATIVA À RADIAÇÃO DO SECADOR PARA O MEIO EXTERNO: EMISSIVIDADE (E); TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE (T_s); TEMPERATURA DO FLUIDO EXTERNO (T_F); TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO DO SECADOR ($q'_{rad,s}$).....	97
TABELA 16 - PARÂMETROS PARA A ESTIMATIVA DA PERDA RELATIVA À RADIAÇÃO DA FORNALHA PARA O MEIO EXTERNO: EMISSIVIDADE (E); TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE (T_s); TEMPERATURA DO FLUIDO EXTERNO (T_F); TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO DA FORNALHA ($q'_{rad,f}$).....	97
TABELA 17 – PERDA DE CALOR POR CONVECÇÃO PARA O SECADOR E FORNALHA.....	98
TABELA 18 - PERDA DE CALOR POR RADIAÇÃO PARA O SECADOR E FORNALHA.....	98
TABELA 19 – RESUMO DAS PERDAS DE CALOR NO SECADOR E NA FORNALHA.....	99
TABELA 20 – EFICIÊNCIA DA SECAGEM PARA O CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA REAL E CORRIGIDO	100
TABELA 21 – CONDIÇÕES DE SECAGEM PARA VALIDAÇÃO DO SECADOR.....	100
TABELA 22 – CONDIÇÕES ENERGÉTICAS DURANTE OS TESTES DE VALIDAÇÃO COM O SECADOR UTILIZANDO OURIÇO COMO COMBUSTÍVEL.....	101

CAPÍTULO 3

TABELA 1 – MASSA INICIAL DE CARVÃO E MASSA COM CARBONIZAÇÃO INCOMPLETA OBTIDAS NOS TESTES 1, 2 E 3	123
TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO DOS PERÍODOS DE TEMPO TRANSCORRIDOS DURANTE OS TESTES DE CARBONIZAÇÃO.....	126
TABELA 3 – DENSIDADE BÁSICA E A GRANEL DO CARVÃO DO OURIÇO DA CASTANHA	127
TABELA 4 – ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARVÃO DO OURIÇO DA CASTANHA-DO-BRASIL.....	127
TABELA 5 – VALORES MÉDIOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO OURIÇO <i>IN NATURA</i> E DA BIOMASSA CARBONIZADA	128

RESUMO

NOGUEIRA, Roberta Martins, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2011. **Secagem da Castanha-do-Brasil em condições de floresta e carbonização do resíduo do fruto da castanheira.** Orientador: Juarez de Sousa e Silva. Co-orientadores: Jadir Nogueira da Silva e Roberto Precci Lopes.

A Castanha-do-Brasil, também conhecida como castanha-do-pará, é muito utilizada na alimentação humana, sendo produzida por uma planta da família Lecythidaceae, espécie *Bertholettia excelsa*. É uma planta símbolo do bioma amazônico, sendo encontrada em todos os estados desta região. Os frutos da Castanha-do-Brasil são denominados ouriços e nele estão contidas de 12 a 25 sementes. As sementes são ricas em lipídeos (60%) e proteínas (13%), apresentando ainda uma quantidade considerável de selênio, elemento antioxidante que atua sobre os radicais livres, e atua também como regulador da glândula tireóide. Por ser um produto da agricultura extrativista, os estudos são bastante escassos, principalmente no que se refere à pós-colheita. Vale ressaltar que a castanha é um produto muito susceptível ao aparecimento de fungos e de micotoxinas, em especial a aflatoxina. Isso se deve às condições de elevada umidade e temperatura a que o produto está submetido em sua fase de pós-colheita, condição típica do bioma de origem. Outro ponto importante na cultura da Castanha-do-Brasil é a questão econômica que envolve a população diretamente ligada à extração do fruto, sabendo-se que a remuneração recebida pelos extrativistas é muito baixa, o que dificulta a implementação de tecnologias de pós-colheita que garantam a segurança alimentar na produção. Dessa forma, a agregação de valor à produção com o aproveitamento dos resíduos do processo surge como uma necessidade eminente. Assim, neste trabalho teve-se por objetivos: determinar as propriedades físicas da Castanha-do-Brasil com e sem tegumento; desenvolver e validar um sistema de secagem para a Castanha-do-Brasil em condições de floresta, e; adaptar uma metodologia de produção de carvão vegetal a partir do

ouriço da castanha, de forma compatível com o nível tecnológico dos extrativistas. O tamanho médio encontrado para as amêndoas com tegumento foi de 39,35 mm no eixo X, 24,19 mm no eixo Y e 17,88 mm no eixo Z. Para as amêndoas sem tegumento os valores obtidos foram de 31,05 mm no eixo X, 14,38 mm no eixo Y e 15,91 mm no eixo Z. A circularidade foi de 66,40 % e 51,59 %, para as amêndoas com e sem tegumento, respectivamente. Já os valores de esfericidade foram de 63,00 % e 47,72 % para as amêndoas com e sem tegumento, respectivamente. A massa de 1000 amêndoas foi de 6,13 kg para a amêndoa com tegumento e de 3,18 kg para amêndoas sem tegumento. Valores de massa específica real de $0,947 \text{ g.cm}^{-3}$ e de $1,003 \text{ g.cm}^{-3}$ para as amêndoas com e sem tegumento, associadas a uma porosidade de 46,88% e 37,60%, respectivamente, resultaram em uma massa específica aparente de $0,504 \text{ g.cm}^{-3}$ e de $0,626 \text{ g.cm}^{-3}$. Finalmente, o ângulo de repouso para as amêndoas com tegumento foi de $36,37^\circ$. O sistema de secagem proposto, operando com ouriço da Castanha-do-Brasil, foi o por convecção natural, com dimensões globais de 2,0 m de comprimento por 1,0 m de largura por 1,7 m de altura, composto pelos seguintes módulos: fornalha, trocador de calor, câmara *plenum*, chaminé e câmara de secagem. Os resultados obtidos com o secador proposto foram considerados satisfatórios, considerando-se os aspectos da rusticidade, facilidade de construção e operação, bem como o fator custo. Já o carvão produzido pelo método do tambor foi considerado de alta qualidade para o uso comercial ou doméstico, porém, trabalhos posteriores são necessários para aumentar a produtividade do forno.

ABSTRACT

NOGUEIRA, Roberta Martins, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Drying of the Brazil nuts under forest conditions and carbonization of the fruit's residue of the Brazil nuts tree.** Adviser: Juarez de Sousa e Silva. Co-advisers: Jadir Nogueira da Silva and Roberto Precci Lopes.

The Brazil-nut, also known as Para-nut, is very used as food, which is produced by a tree from family of Lecythidaceae, species *Bertholettia excelsa*. It is a tree symbol of the Amazon biome, being found in all states of this region. The fruits of Brazil-nut are called hedgehogs and it is contained 12 to 25 seeds. The seeds are rich in lipids (60%) and protein (13%), having also a considerable amount of selenium, which is a antioxidant that acts on free radicals and as a regulator of the gland thyroid. Being a product typically extractive, the studies are quite scarce, especially about post-harvest. It is worth mentioning that product is a very susceptible to fungus growth and mycotoxins, particularly aflatoxin. This is due to conditions of high humidity and temperature at which the product is subjected in its post-harvest, those conditions are typical from this biome origin. Another important point in the culture of Brazil-nut is the economic issue that directly involves the population linked to the extraction of fruit, knowing that the pay received by extraction is very low, which hampers the implementation of post-harvest technologies to ensure safe food production. Thus, adding value to production and utilization of residues from the process emerges as a perceived need. Thus, this work had the follow objectives: to determine the physical properties of the Brazil-nut with and without tegument; develop and validate a system for drying the Brazil-nuts at forest conditions, and, adapting a methodology for producing charcoal from the hedgehog Chestnut, consistent with the level of extractive technology. The size for almonds with tegument was 39.35 mm in the X axis, Y axis 24.19 mm and 17.88 mm in the Z axis, however for the almond without tegument the values were 31.05 mm in X, Y and 14.38 15.91 mm in Z. The circularity was 66.40%

and 51.59% for the kernels with and without seed tegument, respectively. 63.00% and 47.72% were found as values of sphericity for the kernels with and without seed coat, respectively. The mass of 1000 almonds was 6.13 kg for almond-coats and 3.18 kg for coat almonds. Specific mass of $0.947\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and $1.003\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ for the kernels with and without coat, coupled with a porosity of 46.88% and 37.60%, yielded a bulk density of $0.504\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and $0.626\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Finally, the angle of repose for the kernels with testa was 36.37° . The drying system as proposed by the natural convection operating with the hedgehog of the Brazil-nut, with overall dimensions of 2.0 m long X 1.0 m wide X 1.7 m high, composed of the following modules: furnace, heat exchanger, *plenum* chamber, drying chamber and chimney. The results obtained with the proposed dryer were considered good, when one considers that the aspect ruggedness, ease of construction and operation as well as the cost factor. Already the coal produced by the method of the drum quality was considered for commercial use or domestic, but further work should find a way to increase productivity reactor.

INTRODUÇÃO GERAL

A castanha-do-Brasil é um produto de grande destaque na biodiversidade da floresta Amazônica, sendo uma das espécies vegetais mais nobres e opulentas, tendo sua exploração um papel fundamental na organização sócio-econômica de grandes áreas extrativistas.

Também conhecida castanha-do-pará, ocorre nos estados brasileiros que compõem o bioma Amazônia, ou seja, o Acre, Amazonas, Pará, Roraima, e Rondônia, bem como Maranhão, Tocantins e Mato Grosso (LOUREIRO et al., 1979). Porém, a região norte tem uma participação de 98,12% do total de castanha produzido no país, sendo os maiores estados produtores representados por Acre, Amazonas, Pará, Rondônia e Amapá (IBGE, 2010).

A amêndoa da castanha-do-Brasil é um alimento muito apreciado, além do seu sabor, sua qualidade nutritiva recebe destaque devido, dentre outros fatores, à qualidade e quantidade de aminoácidos que apresenta. De acordo com Moodley et al. (2007), na composição nutricional da Castanha-do-Brasil, os componentes mais abundantes são os lipídios, seguidos pelas proteínas, carboidratos e fibras.

Mesmo com uma composição nutricional incomparável, devido ao elevado valor comercial das amêndoas e considerando o pouco investimento na conscientização da população sobre seus benefícios, mais da metade da produção de castanha-do-Brasil destina-se, essencialmente, ao mercado internacional, tendo como principais consumidores os Estados Unidos, Alemanha e Inglaterra (GLÓRIA; REGITANO-D'ARCE, 2000).

Porém, a comercialização da castanha-do-Brasil para o mercado externo tem sido ameaçada por entraves legais, impostos pelos mercados importadores, principalmente no que se refere à exigência de alta qualidade das amêndoas e baixo índice de contaminação, em especial a contaminação por aflatoxinas.

No ano de 2005, o valor das exportações de castanha-do-Brasil atingiu U\$ 22 milhões e vem sofrendo grande declínio desde esta data, devido às barreiras fitossanitárias impostas pela comunidade européia, publicadas na decisão 493/2003 e 401/2006, que trata do limite de contaminação aceitável.

Em todas as etapas do beneficiamento (queda dos ouriços, coleta, transporte para as fábricas, armazenamento e processamento), a castanha-do-Brasil está sujeita a contaminação por microorganismos e a decorrente produção de micotoxinas. Dentre estes microorganismos, os fungos produtores

de aflatoxinas podem causar sérios danos à saúde de humanos e de animais, representando uma considerável perda econômica para o país, com reflexos nas exportações desse produto.

Sabe-se, porém, que o uso de Boas Práticas Extrativistas no manejo da castanha ao longo da sua cadeia produtiva pode reduzir os níveis desta contaminação (SIMÕES, 2004). Assim, no período entre 2006 e 2008, estudos realizados pela Embrapa - Acre e parceiros como CIRAD (Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento), MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), LACQSA/MAPA (Laboratório de Controle de Qualidade e Segurança Alimentar – Minas Gerais) e NFA (National Food Administration) identificaram que, nas atuais condições de manejo aplicadas em comunidades tradicionais do Acre e do Pará, as recomendações existentes, especialmente as do Programa de Alimentos Seguros (PAS, 2004) e do *Codex Alimentarius* (CAC/RPC, 2006) ainda são insuficientes para permitir uma produção com níveis aceitáveis de aflatoxina pela legislação dos países importadores. As etapas identificadas como críticas em relação à contaminação por aflatoxina na castanha-do-Brasil foram a secagem e o armazenamento, antes da industrialização.

O fator mais importante na contaminação da castanha é o elevado teor de água do produto, que favorece a proliferação de fungos, inclusive os produtores de aflatoxinas. Por isso, é desejável que as castanhas passem por um processo de secagem depois da coleta e antes da comercialização. O recomendado pelo *Codex Alimentarius* (CAC/RPC, 2006) é que o teor de água das castanhas depois da coleta deve ser reduzido até um limite de segurança, e de acordo com o Programa de Alimentos Seguros (PAS, 2004), a castanha é considerada segura para o armazenamento quando seu teor de água encontra-se abaixo de 13% (abaixo do valor crítico de 15%).

A maior dificuldade no beneficiamento da castanha ocorre durante a secagem do produto, pois as tecnologias existentes não oferecem garantias quanto às condições ideais de armazenamento e transporte (SILVA, 2002). Atualmente, as castanhas são secas em terreiros, logo, com a alternância de períodos de chuva e sol, as castanhas podem secar desuniformemente, fato comum na região amazônica.

Estudos sobre secagem de castanha-do-Brasil são escassos, sendo aquelas tecnologias apropriadas à indústria as encontradas com maior

freqüência. Silva e Marsaioli Jr. (2004) realizaram um estudo comparativo da conservação das castanhas submetidas à secagem convencional (ar quente) e secagem por microondas. Neste trabalho os autores concluíram que ambos os métodos estudados foram eficientes e mantiveram a qualidade do produto pelo tempo de armazenamento estudado. Em um trabalho anterior, Silva e Marsaioli Jr. (2003) avaliaram economicamente o sistema de secagem de castanha utilizando microondas, concluindo que esta tecnologia só é viável economicamente se aplicada em escala industrial, o que impede a adaptação deste equipamento para as condições de campo.

Dentre os vários métodos de secagem de produtos agrícolas, a secagem por convecção natural é a que possui maior possibilidade de aplicação à exploração agrícola de base familiar, principalmente em locais de difícil acesso. Isto se deve ao fato de os equipamentos de secagem com base neste princípio dispensar o uso de energia elétrica, utilizar materiais de construção facilmente encontrados em mercados locais e exigir mão-de-obra pouco especializada para sua construção (SILVA, 2008).

Da mesma forma, as questões sócio-econômicas são muito importantes na extração da castanha, pois os conceitos de qualidade do produto só estarão presentes no campo quando diferenças nos rendimentos forem observados pelos extrativistas. Vale ressaltar, ainda, que a produção da castanha, como a da maioria dos produtos agrícolas, é sazonal, sendo sua coleta iniciada em outubro/novembro e prolongando-se até março/abril, na maioria dos estados produtores. Com isso, a geração de renda fora do período de coleta é muito importante para a cadeia produtiva, sabendo-se que, com a capitalização do extrativista, é possível a introdução de tecnologias na produção da Castanha-do-Brasil.

Uma forma de agregar valor à produção é com o aproveitamento dos resíduos oriundos do processo de beneficiamento da castanha. A produção de resíduos é comum nos processos agrícolas, seja ele extrativista ou de cultivo. Durante o processamento da Castanha-do-Brasil, verifica-se a produção de resíduos em diferentes etapas, sendo os principais:

- 1) **Pericarpo (ouriço)** - obtido na floresta quando o fruto é quebrado para a retirada das castanhas;
- 2) **Mesocarpo (casca)** - obtido na indústria durante o descascamento da castanha.

Atualmente, o mesocarpo já possui ampla utilização como fonte de aquecimento para o ar de secagem na indústria. Já o pericarpo é deixado na floresta devido ao seu peso e pouca utilidade para os produtores.

Estima-se que no ano de 1999 foram produzidas cerca de 20.000 toneladas de ouriço e casca de castanha que poderiam ser aproveitados como fonte de energia (OLIVEIRA; LOBO, 2002). Estes mesmos autores determinaram o poder calorífico do ouriço da castanha obtendo o valor de $17.769 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, cujo valor é próximo ao da biomassa lenhosa. Com base nestes dados, concluíram que o potencial de utilização deste resíduo na região amazônica é grande e esta pode ser uma alternativa para agregar renda aos trabalhadores que exploram essa atividade.

Dessa forma, para o desenvolvimento de um secador para castanha com casca que opere com ar aquecido a alta temperatura, torna-se necessária a utilização de biomassa para queima em uma fornalha adequada. Sabendo-se dos problemas e suas conseqüências em relação ao desmatamento da floresta amazônica, bem como do ouriço como fonte de inóculo para aflatoxina, este resíduo da extração da Castanha-do-Brasil surge como uma biomassa de grande potencial para a aplicação na secagem da castanha, em substituição à lenha.

Outra utilização para o pericarpo é a produção de carvão vegetal. Moura & Nascimento (2007) determinaram as características do carvão produzido a partir do ouriço da Castanha-do-Brasil e compararam os resultados aos obtidos para o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e a *Acacia mangium*. Neste trabalho, os autores concluíram que a densidade do carvão produzido a partir do ouriço foi de $838,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, maior do que a do *Eucalyptus grandis*, do *Eucalyptus saligna* e da *Acácia mangium*, que foi de $391 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $476 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $596,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente. Neste trabalho determinou-se também a densidade energética, o percentual de material volátil e a percentagem de carbono fixo do resíduo do fruto da castanheira (ouriço ou casca da amêndoa). Uma comparação destes resultados com os de outras espécies é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação da densidade energética, material volátil e carbono fixo entre o resíduo do fruto da castanheira e outras espécies florestais

Material	Densidade energética (kcal·m ⁻³)	Material Volátil (%)	Carbono Fixo (%)
Resíduo da castanha	3.620.211	9,22	88,00
<i>Eucalipto grandis</i>	1.872.890	19,08	80,34
<i>Eucalipto saligna</i>	2.327.164	---	---
<i>Acacia mangiun</i>	2.868.433	21,49	73,30

Observa-se que o carvão obtido a partir do resíduo do fruto da castanheira apresentou menor valor de material volátil quando comparado com outras espécies, conforme apresentado na Tabela 1. Nas análises do carbono fixo observa-se também que o carvão resultante da castanha é superior ao das outras espécies, evidenciado pelo valor do seu rendimento.

Infere-se, portanto, que o potencial de utilização do ouriço para a produção de carvão é grande, sendo o desenvolvimento de uma metodologia aplicada às condições de floresta, imprescindível para o sucesso desta atividade.

Com base no exposto anteriormente, neste trabalho teve-se por objetivo avaliar as propriedades físicas da Castanha-do-Brasil para desenvolver e dimensionar um secador adaptado à condição de floresta, que opere com o ouriço da castanha como fonte de energia calorífica, bem como desenvolver uma metodologia para a produção de carvão a partir do ouriço, de forma a aumentar a renda dos extrativistas durante a entressafra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAC/RPC. **Code of practice for the prevention and reduction of aflatoxin contamination in tree nuts.** CAC/RCP 59-2005, Rev. 1 – 2006.

GLÓRIA, M. M.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B. **Concentrado e isolado protéico de torta de castanha do Pará: obtenção e caracterização química e funcional.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 20, n. 2, p. 240-245, Ago 2000.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2010. Disponível em: [HTTP://www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) . Acesso em 01 de Julho de 2011.

LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F.; ALENCAR, J. C. **Essências florestais madeireiras da Amazônia**. Manaus: INPA, V.1. 1979. 245p.

MOODLEY, R.; KINDNESS, A.; JONNALAGADDA, S. B. **Elemental composition and chemical characteristics of five edible nuts (almond, Brazil, pecan, macadamia and walnut) consumed in Southern Africa**. J. of Env. Sci. and Health, 42, 585-591. 2007.

MOURA, P. R. G.; NASCIMENTO, C. C. **Fruto da Castanha-do-Brasil: potencialidade de uso como fonte de matéria-prima para a rede energética do estado do Amazonas**. Anais da 59ª Reunião da SBPC. 2007.

OLIVEIRA, J. M. C.; LOBO, P. C. **Avaliação do potencial energético de resíduos de biomassa amazônica**. Anais do 4º Encontro de Energia no Meio Rural. 2002.

PROGRAMA ALIMENTOS SEGUROS (PAS). **Manual de segurança e qualidade para a cultura da Castanha-do-Brasil**. Brasília, DF: Campo PAS, (Série Qualidade e Segurança dos Alimentos). 62p. 2004.

SILVA, F. A. **Aplicação de microondas no processo de beneficiamento de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*)**. Tese de Mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA/UNICAMP. Campinas 2002.

SILVA, F. A.; MARSALOLI Jr., A. **Aspecto econômico de um processo de secagem de amêndoas de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) assistida a microondas**. Revista Ciências Exatas e Naturais, vol. 5, nº 2, Jul/Dez 2003.

SILVA, F. A.; MARSALOLI, Jr., A. **Estudo comparativo da conservação de Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) seca por microondas e convencionalmente**. B. CEPPA, Curitiba. v.22, n.2, p.387-404, 2004.

SILVA, J. S. **Tecnologias de secagem e armazenagem para a agricultura familiar**. Viçosa, MG, Editora Suprema. 168p. 2008.

SIMÕES, A. V. **Impactos de tecnologias alternativas e do manejo da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*, HUMB. & BONPL., 1808) no controle da contaminação por aflatoxinas em sua cadeia produtiva**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias, Área de concentração: Sistemas Agroflorestais.) - Universidade Federal do Amazonas. 2004.

- CAPÍTULO 1 -

PROPRIEDADES FÍSICAS DA CASTANHA-DO-BRASIL

INTRODUÇÃO

A Castanha-do-Brasil, também conhecida como castanha-do-pará, é muito utilizada na alimentação humana, sendo produzida por uma planta da família Lecythidaceae, espécie *Bertholettia excelsa*. As florestas de *Bertholettia excelsa* se estendem por vastas áreas de terra firme da região amazônica, no Brasil, Peru, Colômbia, Venezuela e Equador (SIMÕES, 2004).

São árvores de grande porte, podendo alcançar até 60 m de altura e mais de 4 m de diâmetro na base do tronco (Figura 1).



Figura 1 – Árvore de Castanha-do-Brasil (*Bertholettia excelsa* Humboldt & Bonpland).

Os frutos da Castanha-do-Brasil são denominados ouriços e neles estão contidas de 12 a 25 sementes (Figura 2) (SIMÕES, 2004). As sementes são ricas em lipídeos (60%) e proteínas (13%), possuindo valor calórico de 640 kcal para cada 100 g de polpa (PACHECO, 2003). Destaca-se, ainda, que a semente apresenta uma quantidade considerável de selênio, elemento antioxidante que atua sobre os radicais livres e como um regulador da glândula tireóide.



Foto: Wagner Antônio do Nascimento. SADEMA/Itaúba-MT

Figura 2 – Fruto e sementes da Castanha-do-Brasil.

Como a árvore é muito alta, a coleta do fruto acontece no solo. Isto se deve ao fato de, naturalmente, o fruto se desprender da planta mãe quando maduro, facilitando, assim, o seu recolhimento. O período de desenvolvimento do fruto, até sua maturação, dura cerca de quinze meses, sendo o período compreendido entre outubro e março quando ocorre o desprendimento dos frutos da planta-mãe (SANTOS *et al.*, 2006).

O fruto é uma cápsula poricida simples, indeiscente e levemente achatada, possui um exocarpo e um endocarpo, ambos fibrosos, sendo o segundo mais espesso. Já as sementes possuem forma triangular angulosa, e são constituídas por duas camadas de tegumento: a testa e o tégmen. Internamente, tem-se um embrião atípico, triangular e que não apresenta distinção de cotilédones, eixo hipocótilo-radícula e plúmula (SANTOS *et al.*, 2006).

Ainda segundo os mesmos autores, as amêndoas da Castanha-do-Brasil possuem um grande valor industrial, por possuírem elevado valor protéico para alimentação e valor lipídico para fins dermatológicos.

Ainda são escassos os estudos sobre a Castanha-do-Brasil, principalmente no que se refere à pós-colheita do seu fruto. Isto se deve ao fato de sua exploração ser tipicamente extrativista e ocorre em regiões ainda distantes dos centros de pesquisa. Outro ponto de destaque é o fato de ser

produzido em locais de difícil acesso, muitas das vezes em regiões isoladas. Por fim, cita-se o período de safra, de outubro a março, dificultando assim a coleta de dados em virtude dos elevados volumes de chuva nas regiões produtoras, nesta época.

Assim, conhecer as propriedades físicas do produto é o primeiro passo para as pesquisas em pós-colheita com a Castanha-do-Brasil, sendo estas informações os referenciais básicos para o dimensionamento de sistemas de secagem e armazenamento para o produto.

As propriedades físicas são importantes para o desenvolvimento de equipamentos de secagem, armazenagem e sistemas de aeração, e transporte de produtos. A massa específica aparente determina a capacidade dos sistemas de transporte e de armazenagem, enquanto a massa específica real é uma informação útil para equipamentos de separação. A porosidade da massa determina a resistência ao fluxo de ar durante a secagem e a aeração dos grãos. A fluidez de produtos agrícolas é usualmente medida utilizando-se o ângulo de repouso, que é uma medida do atrito entre os grãos e é utilizado no dimensionamento das moegas, sabendo-se que o ângulo de inclinação de suas paredes deve ser maior que o ângulo de repouso, de forma a garantir o fluxo contínuo de material por gravidade.

Razavi *et al.* (2008) destacam também a importância da determinação das propriedades físicas dos grãos e sementes para o projeto de equipamentos para o processamento, transporte, seleção, separação e armazenagem. Esses autores citam que o projeto desses equipamentos sem o conhecimento prévio das propriedades físicas produzirá resultados insatisfatórios. Exemplificando as aplicações, descreve-se que o tamanho e a forma são importantes para a classificação e a separação do produto; as massas específicas, real e aparente, são necessárias para o projeto de equipamentos de processamento e armazenagem, como silos e secadores; a porosidade das amêndoas é o fator mais importante para a embalagem; já o ângulo de repouso é essencial na determinação de estruturas de armazenagem e empacotamento. De acordo com Silva (2008), o conhecimento destes parâmetros pode ser fundamental para a adaptação dos sistemas visando à melhoria de seu desempenho e eficiência.

Assim, neste trabalho, teve-se por objetivo determinar as propriedades físicas das sementes da Castanha-do-Brasil, com e sem tegumento, com teor

de água inicial à época da colheita, de forma a obter os parâmetros necessários para o projeto de um sistema de secagem para a Castanha-do-Brasil.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos testes foram utilizadas sementes de Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* HUMB & BONPL.), coletadas durante a safra 2010/2011 na Fazenda Dal Pai, município de Itaúba-MT.

O método de colheita utilizado foi o de recolhimento dos frutos no solo, método típico para este produto, a seleção foi feita manualmente e a secagem em terreiro, sem pavimentação, à sombra, durante três dias.

As castanhas foram transportadas para o Laboratório de Energia e Pós-Colheita da Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Sinop, onde foram analisadas, com e sem o tegumento. Com base no método oficial citado pela AOAC 925.40 (AOAC, 2008), foi determinado seu teor de água médio, obtendo-se o valor de 23%, que prevaleceu durante os testes.

Para a obtenção das sementes sem tegumento, foi utilizado um extrator manual por compressão (Figura 3).



Figura 3 – Máquina adaptada para extração da semente da Castanha-do-Brasil.

Forma e tamanho das sementes

As sementes de castanhas diferenciam-se quanto a sua forma geométrica, ou seja, ainda com o tegumento, tem forma piramidal e quando são beneficiadas (sem tegumento) apresentam-se como elipsóides.

A forma foi determinada utilizando-se como parâmetros a esfericidade e a circularidade de 100 sementes com e sem tegumento (Figuras 4 e 5), conforme as Equações 1 e 2 (CORRÊA; SILVA, 2008).

Para a determinação dos parâmetros utilizados nas Equações 1 e 2 (diâmetro e área), foi utilizado um digitalizador (*scanner*) de alta resolução e as imagens foram tratadas utilizando o programa computacional de domínio livre GNU-Image Manipulation Program (GIMP). A metodologia utilizada foi a determinação do número de píxeis contidos na imagem de interesse (castanha) e comparando-se esse valor com o número de píxeis totais da imagem. Conhecendo-se a área total da imagem e correlacionando ao número de píxeis, foi possível determinar a área da imagem selecionada.



Figura 4 – Castanhas com casca para determinação da forma.



Figura 5 – Castanhas sem tegumento para determinação da forma.

$$E = \frac{d_i}{d_c} \quad (1)$$

Em que:

- E = Esfericidade (adimensional);
- d_i = Diâmetro do círculo inscrito (mm);
- d_c = Diâmetro do círculo circunscrito (mm).

$$C = \frac{A_p}{A_c} \quad (2)$$

Em que:

- C = Circularidade (adimensional);
- A_p = Área projetada da semente (mm²);
- A_c = Área do círculo circunscrito (mm²).

O tamanho das sementes foi determinado avaliando-se as dimensões nos três eixos que compõem sua forma, com o auxílio de um paquímetro digital

com resolução de 0,01 mm (Figuras 6 e 7). Nas Figuras 8 e 9, observam-se as formas piramidal e esferoidal da Castanha-do-Brasil, com e sem tegumento, respectivamente. Em ambos os casos foram utilizadas 50 sementes.



Figura 6 – Determinação do tamanho da castanha com tegumento.



Figura 7 – Determinação do tamanho da castanha descascada.

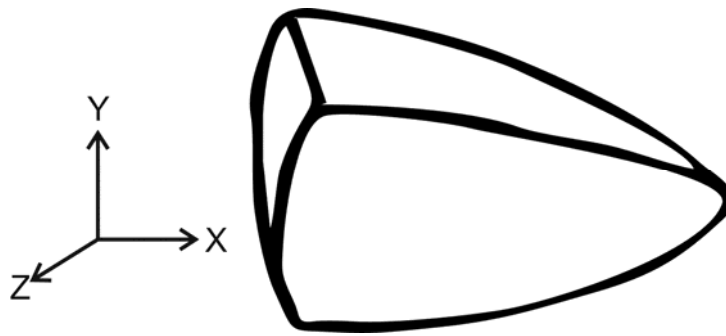


Figura 8 - Forma piramidal da Castanha-do-Brasil com tegumento.

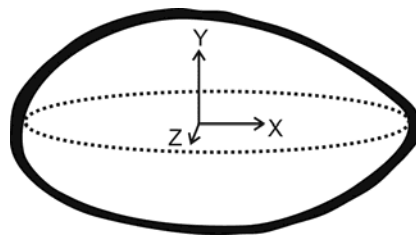


Figura 9 – Forma elipsoidal da Castanha-do-Brasil sem tegumento.

Massa de 1000 sementes

A massa de um lote de 1000 amêndoas (com e sem tegumento) foi determinada por meio de uma balança eletrônica semi-analítica, com resolução de 0,01 g e o resultado expresso em kg. Para esta análise foi utilizadas uma amostra de 100 amêndoas selecionadas ao acaso e a massa obtida multiplicada por 10 (Brasil, 2009).

Massa específica real

A massa específica real ou unitária é aquela determinada utilizando-se um único elemento (castanha), com e sem tegumento, pela determinação de suas massa e volume.

Para sementes, Moreira *et al.* (1985) descrevem a metodologia de complementação de volume utilizando-se o tolueno para a determinação da massa específica unitária. Porém, esta metodologia não apresentou resultados satisfatórios quando aplicada à Castanha-do-Brasil.

Depois da realização de testes preliminares em laboratório, observou-se que líquidos como o tolueno e o óleo de soja penetram no tegumento da

castanha, através do hilo e das linhas de fraturas em toda a sua extensão, ocupando rapidamente o volume de ar existente entre o tegumento e a castanha. Dessa forma, o volume de líquido adicionado corresponde ao volume externo e interno – entre o tegumento e a castanha. Na Figura 10 pode-se observar a abertura do hilo.



Figura 10 – Detalhe da abertura do hilo e linhas de fratura que permitem a entrada de líquido no interior das amêndoas.

Essa observação teve como base o surgimento de bolhas no líquido, oriundas do deslocamento do ar existente na região entre a amêndoa e o tegumento, que foi liberado para o meio depois que o volume foi ocupado pelo líquido de preenchimento, conforme pode ser observado na Figura 11.

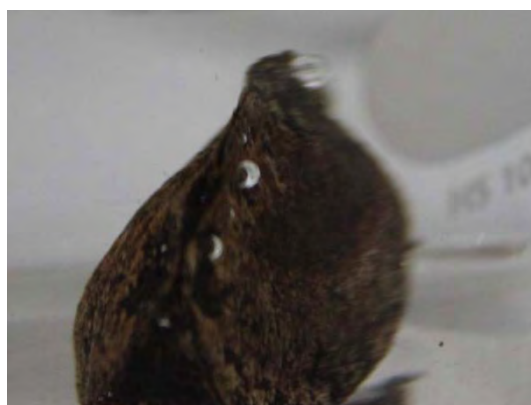


Figura 11 – Formação de bolhas de ar durante a determinação da massa específica, utilizando o tolueno.

Por causa da ocorrência de bolhas de ar, a massa específica foi determinada adaptando-se a metodologia citada por Moshenin (1986). Nesta metodologia, aplica-se o princípio de Arquimedes, imergindo, com o auxílio de

um suporte, as amostras em um líquido de densidade relativa conhecida e que não seja absorvido pela castanha, de forma que a massa da semente não seja computada pela balança.

O princípio de Arquimedes preconiza que todo corpo imerso sofre a ação de uma força vertical, para cima, aplicada pelo fluido. Essa força é denominada empuxo, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo. Ao conhecermos a massa específica do líquido, é possível determinar o volume deslocado pela castanha a partir da análise da massa deslocada.

Para garantir que a massa da castanha não seja computada pela balança, foi adaptado um suporte (Figura 12a) e um pino para fixar a castanha (Figura 12b).



(a)



(b)

Figura 12 – Aparato para determinação de massa específica unitária pelo princípio de Arquimedes; (a) detalhe do suporte e (b) detalhe do pino.

Cada amostra de castanha, com e sem tegumento, foi fixada ao suporte pelo pino (Figura 13a) e completamente imersa no Becker contendo mercúrio, que foi posicionado sobre a balança (Figura 13b).



(a)



(b)

Figura 13 – Determinação da massa específica unitária da Castanha-do-Brasil; (a) castanha fixada ao suporte e (b) castanha imersa em mercúrio metálico.

A massa foi determinada utilizando-se uma balança com resolução de 0,01 g. O líquido utilizado foi o mercúrio metálico (99,99% de pureza) com massa específica do mercúrio (ρ_{Hg}) de $13.580 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, determinada *in loco*. A partir dos dados de massa unitária da amostra e de variação de massa no líquido, a massa específica da castanha foi determinada utilizando-se a Equação 3.

$$\rho_{\text{real}} = \frac{m_{\text{amostra}} \cdot \rho_{\text{Hg}}}{m_{\text{Hg}}} \quad (3)$$

Em que:

ρ_{real} = Massa específica da castanha ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

m_{amostra} = Massa da amostra (kg);

ρ_{Hg} = Massa específica do mercúrio ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

m_{Hg} = Variação de massa de mercúrio após a imersão da amostra (kg).

Porosidade

A porosidade das castanhas, com e sem tegumento, foi determinada pelo método da complementação de volume por líquido, utilizando-se o óleo de soja como líquido de referência. O volume padrão estabelecido foi de 250 ml, utilizando-se um Becker como recipiente. Para a leitura do volume de líquido de

complementação foi utilizada uma proveta graduada, com volume de 0,250 L e resolução de 2×10^{-3} L.

Como observado para a determinação da massa específica real, a complementação de volume não é uma técnica confiável para a Castanha-do-Brasil com tegumento. Assim, de forma a reduzir o erro associado ao volume entre a casca e a semente, no caso da castanha com tegumento, as amostras receberam uma fina camada de parafina antes de serem submetidas ao teste de porosidade.

Massa específica aparente

A massa específica aparente foi determinada indiretamente, utilizando-se a Equação 4, descrita por Mohsenin (1986), que relaciona a massa específica unitária (ρ_{real}) e a porosidade para a determinação da massa específica aparente.

$$\rho_{\text{ap}} = \rho_{\text{real}}(1 - \varepsilon) \quad (4)$$

Em que:

ρ_{ap} = Massa específica aparente da massa de sementes ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

ε = Porosidade (adimensional).

Ângulo de repouso

Para a determinação do ângulo de repouso das castanhas, foram utilizadas apenas sementes com tegumento, sabendo-se que as sementes sem tegumento não devem ser armazenadas a granel. Devido à rápida oxidação a que o produto está sujeito, esse último resultado apresentaria pouca importância prática.

A determinação do ângulo de repouso foi realizada em um equipamento que possui forma cúbica, com arestas de 0,60 m. Tais dimensões são pouco usuais para produtos agrícolas, porém, devido ao tamanho da castanha quando comparada a outros produtos, as dimensões usuais não seriam aplicáveis.

O equipamento é composto de um fundo falso, criado por uma divisória instalada 30 cm acima do fundo do equipamento que contém uma parte fixa e uma comporta, de forma a permitir o escoamento dos grãos para o fundo falso. A região acima do fundo falso e frontal do equipamento foi construída em vidro, de forma a facilitar a visualização dos ângulos. Já o restante do equipamento foi construído em placas de MDF.

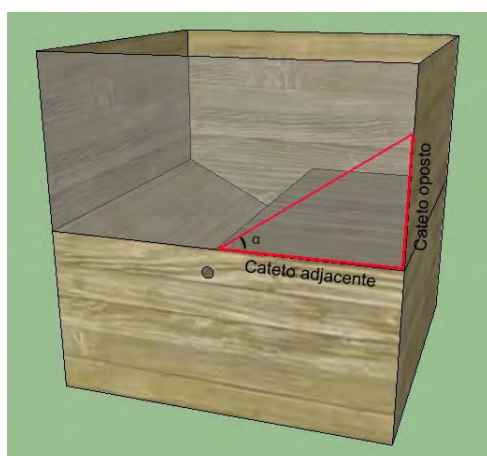
A determinação do ângulo de repouso foi realizada a partir dos princípios de trigonometria, que correlaciona os ângulos de um triângulo calculando-se os arcos-tangentes formados pelos catetos (oposto e adjacente). O cateto adjacente ao ângulo de repouso é constante (metade da largura da caixa), já o cateto oposto varia de acordo com o escoamento natural do produto em teste. A Equação 5 demonstra as relações trigonométricas citadas.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{c_o}{c_a} \right) \quad (5)$$

Em que:

- α = Ângulo de repouso (°);
- c_o = Cateto oposto (cm);
- c_a = Cateto adjacente (cm).

Na Figura 14a é apresentado o esquema do equipamento utilizado para a determinação do ângulo de repouso. Já na Figura 14b, observa-se o protótipo construído para a execução dos experimentos.



(a)



(b)

Figura 14 – (a) Esquema para determinação do ângulo de repouso e (b) Aparato para determinação do ângulo de repouso.

Análises estatísticas

Para este trabalho foram aplicados apenas os conceitos da estatística descritiva, haja vista que não há tratamentos a serem avaliados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tamanho

Os valores encontrados para o tamanho das amêndoas com e sem tegumento, oriundas do município de Itaúba-MT na safra 2010/2011, podem ser vistos na Tabela 1. O tamanho das amêndoas é representado pelas coordenadas X, Y e Z, correspondentes aos três eixos do produto (Figuras 8 e 9).

Tabela 1 – Valores médios e erro padrão para o tamanho das amêndoas com e sem tegumento

Descrição	Coordenadas (mm)		
	X	Y	Z
Amêndoas com tegumento	39,35 ± 0,74	24,19 ± 0,35	17,88 ± 0,26
Amêndoas sem tegumento	31,05 ± 0,51	14,38 ± 0,25	15,91 ± 0,27

Com base nos valores apresentados na Tabela 1, pode-se observar que a média para os eixos Y e Z, quando comparados entre as amêndoas com e sem tegumento não seguiram o mesmo comportamento, sendo que a dimensão do eixo Y foi maior que a do eixo Z para a amêndoa com tegumento e o inverso foi observado para a amêndoa sem tegumento.

Isto pode ser explicado pelo fato de a forma da amêndoa com tegumento ser diferente da amêndoa sem tegumento, além de existirem grandes diferenças entre as formas de cada indivíduo. Na Figura 15 pode-se observar a diferença entre as amêndoas.



Figura 15 – Diferenças entre os formatos das amêndoas com e sem tegumento.

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os descritos por Santos *et al.* (2006), para amêndoas com tegumento obtidas em Belém, Pará, as amêndoas analisadas apresentaram tamanho médio inferior. No trabalho destes autores, foram encontradas dimensões de 45,86 mm para o eixo X, 28,12 mm para o eixo Y e 20,20 mm para o eixo Z.

Cabe destacar que tais resultados confirmam o conhecimento popular que diz que as castanhas oriundas do estado do Pará são maiores que as obtidas em outros estados da região amazônica, pelo menos quando comparada com o Estado de Mato Grosso.

Forma

Os resultados obtidos para a forma das amêndoas com e sem tegumento podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios e erro padrão para a esfericidade e circularidade das amêndoas com e sem tegumento

Descrição	Parâmetros de forma das amêndoas	
	Circularidade (%)	Esfericidade (%)
Amêndoas com tegumento	66,40	63,00
Amêndoas sem tegumento	51,59	47,72

Com base nos dados de circularidade encontrados, pode-se afirmar que a amêndoa com tegumento apresenta uma forma projetada mais próxima de

um círculo do que a amêndoa sem tegumento. Isso pode ser explicado pelo fato de o eixo tomado como referencial para tais análises, localizar-se na porção mais circular do produto.

Vale destacar ainda que a diferença no fator de forma entre os dois produtos pode estar relacionada à protuberância (rafe) que compõe a linha de fratura da semente, que aumenta, substancialmente, o diâmetro do círculo inscrito em sua projeção. Na Figura 16 pode-se observar o destaque da estrutura citada.



Figura 16 – Detalhe da protuberância presente no tegumento da amêndoa.

Comparando-se os dados obtidos com os citados por Pessoa *et al.* (2004) observa-se que a Castanha-do-Brasil possui esfericidade maior que a da castanha-da-cutia. Já Ramalhosa *et al.* (2010) estudando a castanha portuguesa encontrou valores de esfericidade maiores que os encontrados neste trabalho para a Castanha-do-Brasil.

Massa de 1000 amêndoas

Podem-se observar na Figura 17 os valores para a massa de 1000 amêndoas com e sem tegumento, bem como os valores médios obtidos.

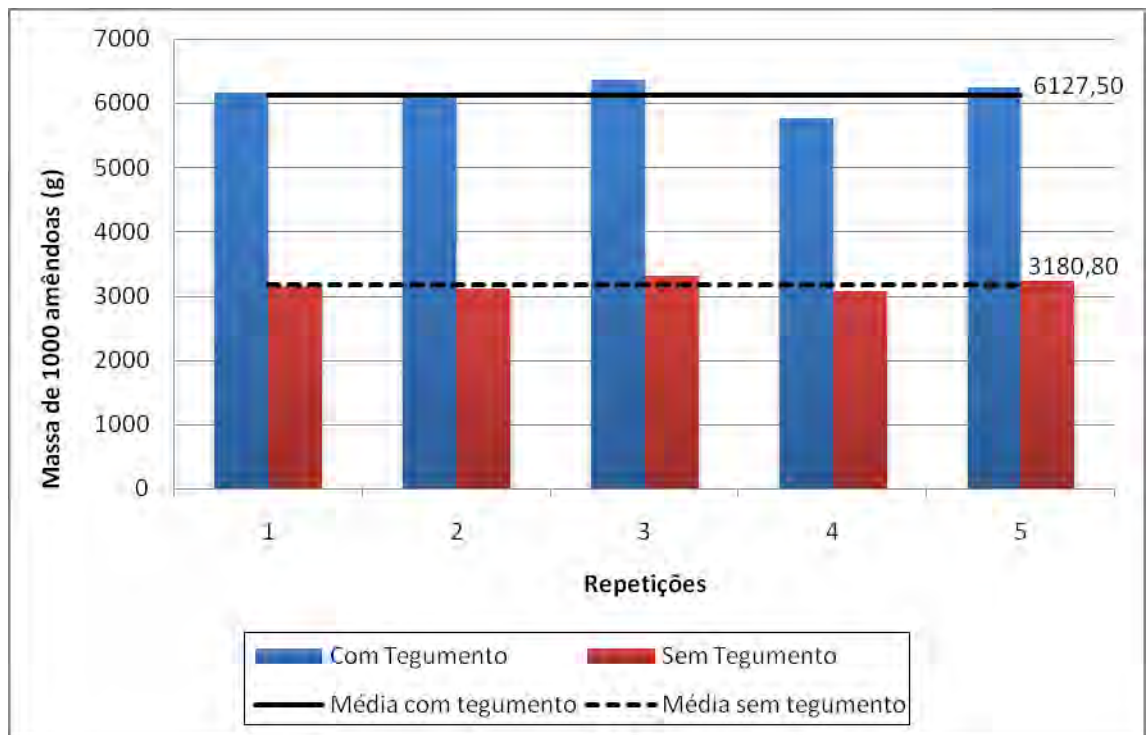


Figura 17 – Valores para a massa de 1000 amêndoas com e sem tegumento.

Conforme pode ser observado, a massa do tegumento corresponde a 48,09% da massa da amêndoa, sendo que a amêndoa sem tegumento representa 51,01% da massa total.

Esse resultado contradiz o conhecimento popular sobre o rendimento médio de castanha sem tegumento, que é estimado em 60%. Ou seja, atualmente, o preço durante a comercialização de castanha é definido com base, dentre outros fatores, no rendimento das amêndoas depois da retirada do tegumento. Sendo o coeficiente de rendimento menor que o estimado, a indústria apresenta uma redução na contabilização de sua produção em decorrência deste parâmetro.

Os valores encontrados para a Castanha-do-Brasil são bem maiores quando comparados com outras castanhas, como o pistache, 194,88 g (RAZAVI et al., 2008), e o pinhão, 930,00 g (GHARIBZAHEDI et al., 2010). Porém, esses valores são próximos quando comparados com os valores para a castanha de caju com casca, que é de 5.960 g (BALASUBRAMANIAN, 2001).

Massa específica real

Na Tabela 3 observam-se os valores de massa unitária, volume unitário e massa específica real para a Castanha-do-Brasil com tegumento e sem tegumento.

Tabela 3 – Valores médios e desvio padrão da massa unitária (m_{unit}), volume unitário (V_{unit}) e massa específica real (ρ_{real}) para amêndoas com e sem tegumento

Descrição	m_{unit} (g)	V_{unit} (cm^3)	ρ_{real} ($g \cdot cm^{-3}$)
Amêndoas com tegumento	$6,17 \pm 1,11$	$6,46 \pm 1,18$	$0,947 \pm 0,02$
Amêndoas sem tegumento	$3,30 \pm 0,90$	$3,29 \pm 0,90$	$1,003 \pm 0,01$

Com base nos dados contidos na Tabela 3, observa-se que a massa específica da castanha com tegumento é um pouco menor que a da castanha sem tegumento devido ao espaço vazio existente entre o tegumento e a amêndoa. Esse espaço contribui para o incremento no volume unitário, sem alteração importante em sua massa específica real.

Considerando os valores de massa específica real para outras castanhas, observa-se que os valores são próximos. Para o pistache, Razavi et al. (2008) encontraram valores de $0,996 g \cdot cm^{-3}$. Já Gharibzahedi et al. (2010) encontraram valores de $1,071 g \cdot cm^{-3}$ para o pinhão. Finalmente, para a castanha de caju com casca, Balasubramanian (2001) cita valores de $1,240 g \cdot cm^{-3}$, Araújo e Ferraz (2008) encontraram valores $1,020 g \cdot cm^{-3}$.

O fato de o valor da massa específica real da castanha com casca ser bem próximo ao da água, permite o uso da separação hidráulica para a diferenciação entre produtos leves e pesados, permitindo que as amêndoas mal formadas ou com nível de deterioração fúngica elevado possam ser separadas das outras castanhas.

Porosidade

A porosidade das amêndoas com e sem tegumento pode ser observada e seus valores comparados analisando-se a Figura 18 (a e b).

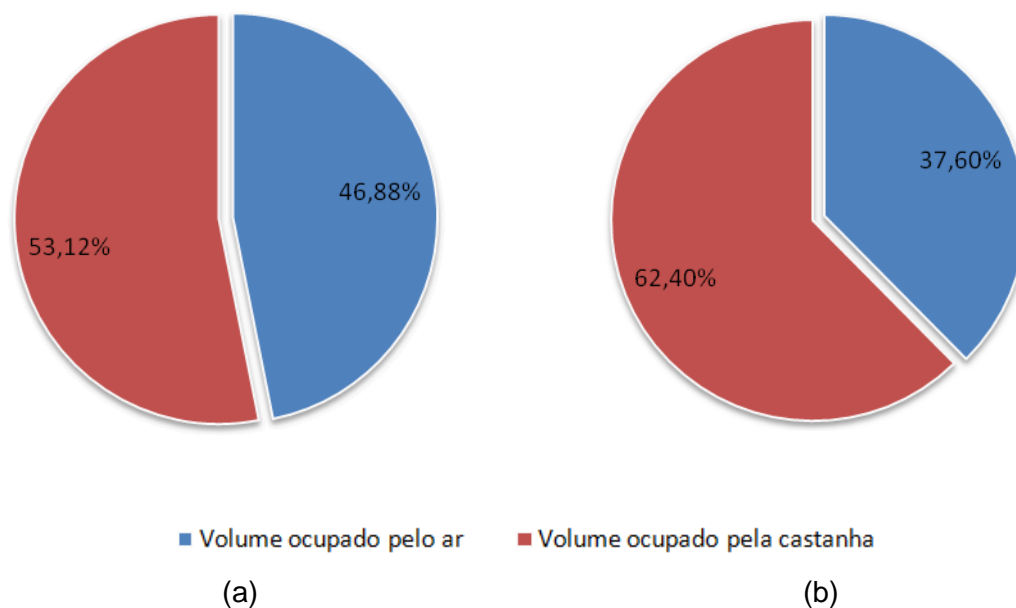


Figura 18 – Relação de volume ocupado pelo ar e pelas amêndoas (a) com tegumento e (b) sem tegumento.

Com base na Figura 18, observa-se que as amêndoas com tegumento possuem porosidade de 46,88%, enquanto as amêndoas sem tegumento apresentam porosidade de 37,60%. Isto pode ser explicado pelo fato de as amêndoas com tegumento apresentarem uma forma mais irregular quando comparada com as amêndoas sem tegumento, dificultando, assim, a sua disposição natural.

Comparando-se tais valores com os encontrados na literatura para outros produtos considerados castanhas, observa-se que Razavi et al. (2008) encontraram valores de 40,02% para o pistache. Gharibzahedi et al. (2010) encontraram valores de 44,57% para o pinhão. Ambos os valores são menores que os encontrados para a Castanha-do-Brasil. Finalmente, para a castanha de caju com casca, Balasubramanian (2001) cita valores de 52,33%, maior que o encontrado neste trabalho.

Massa específica aparente

Com base nos valores de massa específica real e de porosidade, encontrados para a Castanha-do-Brasil, calculou-se seus valores de massa específica aparente, conforme apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios e desvio padrão para a massa específica real (ρ_{real}), porosidade (ε) e massa específica aparente (ρ_{ap}) para amêndoas com e sem tegumento.

Descrição	ρ_{real} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	ε (decimal)	ρ_{ap} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Amêndoas com tegumento	$0,947 \pm 0,02$	$0,468 \pm 0,016$	0,504
Amêndoas sem tegumento	$1,003 \pm 0,01$	$0,376 \pm 0,008$	0,626

Com base nos dados da Tabela 4, observa-se que as amêndoas sem tegumento possuem massa específica aparente maior que as amêndoas com tegumento. Isto se deve ao fato de a menor porosidade observada em relação às amêndoas com tegumento, o que produz maior quantidade de massa de produto em um mesmo volume.

Estes valores confirmam o conhecimento popular de que cada lata de castanha (medida volumétrica correspondente a 18 L) possui, aproximadamente, 10 kg de amêndoas com casca, resultando, assim, em um valor de massa específica aparente de, aproximadamente, $555 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

No que se refere à comparação dos valores encontrados para outros produtos, observa-se que, para o pinhão, Gharibzahedi et al. (2010) encontraram valores de massa específica aparente variando de $593,6$ a $612,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, que são próximos aos encontrados neste trabalho. Já Razavi et al. (2008) encontraram para a massa específica aparente do pistache o valor de $596,36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, que é superior aos valores encontrados neste trabalho para a castanha com casca. Valores de massa específica real de $591,9$ a $624,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ foram encontrados por Balasubramanian (2001) para a castanha de caju com casca, valor superior aos encontrados neste trabalho.

Ângulo de repouso

O ângulo de repouso médio encontrado para as amêndoas da Castanha-do-Brasil com tegumento foi de $36,37^\circ$. Na Figura 19 apresenta-se uma comparação entre o resultado encontrado neste trabalho com os citados por Silva (2008) para outros produtos agrícolas.

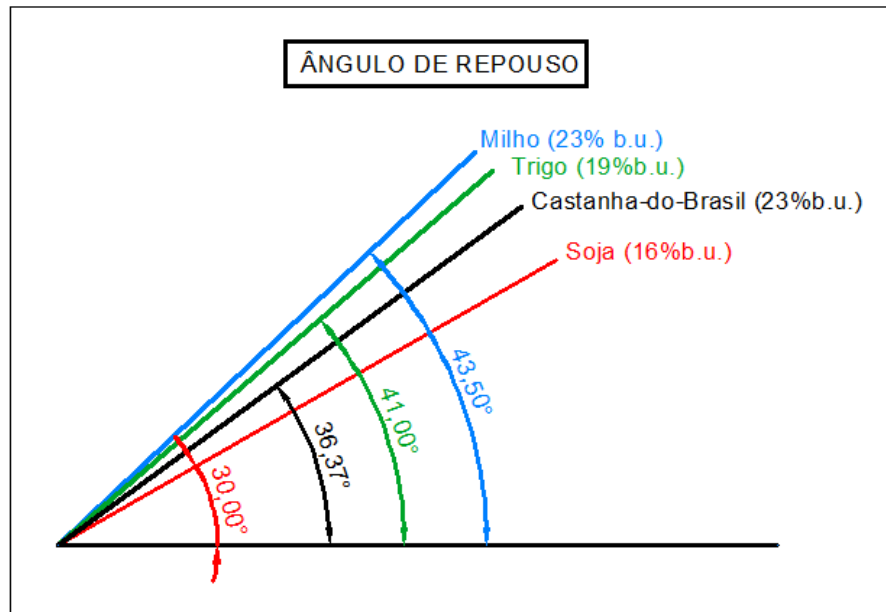


Figura 19 – Comparação entre os valores de ângulo de repouso citados por Silva (2008) e o encontrado neste trabalho para a Castanha-do-Brasil com tegumento.

Destaca-se que os valores de ângulo de repouso para a Castanha-do-Brasil encontram-se no intervalo observado para outros produtos agrícolas.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados neste trabalho pode-se concluir que:

- O tamanho encontrado para a Castanha-do-Brasil neste trabalho foi menor que os citados para o mesmo produto oriundo do estado do Pará;
- A circularidade e esfericidade das amêndoas da Castanha-do-Brasil com tegumento é maior que aquelas para o produto sem tegumento;
- A massa específica real é menor para a castanha com tegumento quando comparada com a amêndoa sem tegumento; já a porosidade e a massa específica aparente possuem comportamento inverso;
- O valor do ângulo de repouso encontrado para a Castanha-do-Brasil está próximo aos valores obtidos para outros produtos agrícolas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, M. C.; FERRAZ, A. C. O. **Características físicas e mecânicas do endocarpo e da amêndoa da castanha de caju 'CCP 76' antes e após tratamento térmico.** Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.28, n.3, 2008.

BALASUBRAMANIAN, D. **Physical Properties of Raw Cashew Nut.** Journal of Agricultural Engineering Research. Nº 78, vol 3, 2001.

BRASIL (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). **Regras para análises de sementes.** Brasília, MAPA/ACS. 2009.

CORRÊA, P. C.; SILVA, J. S. Estrutura, Composição e Propriedades dos Grãos. In: SILVA, J. S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas.** 2ª. ed. Viçosa: [s.n.], Cap. 2, 2008.

GHARIBZAHEDI, S. M. T.; ETEMAD, V.; MIRARAB-RAZI, J.; FOS'HAT, M. **Study on some engineering attributes of pine nut (*Pinus pinea*) to the design of processing equipment.** Research in Agricultural Engineering. Nº 3, Vol. 56, 2010.

MOHSENIN N. N., **Physical Properties of Plant and Animal Materials.** New York, Gordon and Breach Science Publications. 1986.

MOREIRA, S. M. C.; CHAVES, M. A.; OLIVEIRA, L. M. **Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas.** Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, 1985.

PACHECO, A. M. **Ocorrência de Aflatoxinas (B1, B2, G1 e G2) em Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H. B. K.) proveniente de municípios do Estado do Amazonas na safra de 2002.** Universidade Federal do Amazonas (Dissertação de mestrado). Manaus, AM, p. 65. 2003.

PESSOA, J.D.C.; ASSIS, O.B.G.; BRAZ, D.C. **Caracterização morfomecânica para beneficiamento do fruto da castanha-de-cutia (*Couepia edulis*).** Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal - SP, v. 26, n. 1, p. 103-106, Abril 2004.

RAMALHOSA, E.; LAMAS, H; PEREIRA, I.A.; MORAIS, A.M.M.B. **Avaliação do "shrinkage" ao longo da secagem por convecção de castanha (*castanea sativa*).** Actas do 1º Encontro Português de Secagem de Alimentos. 2010.

RAZAVI, S. M. A.; MAZAHERINASAB, M.; NICKFAR, F.; SANAEEFARD, H.. **Physical properties and image analysis of wild pistachio nut (Raneh).** Iranian Food Science & Technology Research Journal. Nº 3, vol 2, 2008.

SANTOS, J. U. M.; BASTOS, M. N. C.; GURGEL, E. S. C.; CARVALHO, A. C. M. **Bertholletia excelsa Humboldt & Bonpland (Lecythidaceae): aspectos morfológicos do fruto, da semente e da plântula.** Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais, Belém, PA, v. 1, n. 2, 2006.

SILVA, J. S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 2ª. ed. Viçosa: UFV, 2008.

SIMÕES, A. V. **Impactos de tecnologias alternativas e do manejo da castanha-do-brasil (*bertholettia excelsa*, humb. & bonpl., 1808) no controle da contaminação por aflatoxinas em sua cadeia produtiva**. Universidade Federal do Amazonas (Tese de Doutorado). Manaus, AM, p. 70. 2004.

- CAPÍTULO 2 -

**SECAGEM ARTIFICIAL DA CASTANHA-DO-BRASIL POR
CONVECÇÃO NATURAL EM CONDIÇÕES DE FLORESTA**

INTRODUÇÃO

Diferentemente dos grãos de cereais, as castanhas são sementes com elevado teor de óleo que, dependendo da maneira de como é processada, afeta, consideravelmente, as suas características organolépticas. Um dos pontos mais relevantes para a manutenção da qualidade do produto é a temperatura do ar de secagem, que não pode exceder a 60 °C para que as características físico-químicas do produto bem como das suas características nutricionais não sejam afetadas (ÁLVARES, 2009).

Vale ressaltar que, devido ao elevado teor de óleo, as castanhas devem ser armazenadas com um teor de água baixo, quando comparado com o teor de água adequado para o armazenamento dos grãos mais comuns. Para o caso da castanha de caju, o teor de água adequado para o seu armazenamento deve estar entre 8 e 10%, pois, se for inferior a 8%, pode ocorrer liberação do LCC (líquido da casca da castanha) durante o armazenamento, enquanto teores de água superiores a 10% favorecem o desenvolvimento de fungos que degradam a qualidade do produto (OLIVEIRA, et al., 2004).

Para outras espécies de castanhas, como a Castanha-do-Brasil (SILVA e MARSAIOLI Jr., 2003), a noz_macadâmia (PRICHAVUDHI e YAMAMOTO, 1987) e o pistache (NEJAD et al., 2002), são observados valores bem mais baixos de teor de água no produto, variando na faixa entre 1,5 e 5%. Dessa forma, as tecnologias pós-colheita para tais produtos são inúmeras, desde a simples secagem em terreiro até as mais sofisticadas como as que usam secadores contínuos.

A utilização de terreiros para a secagem é muito difundida, tanto para a Castanha-do-Brasil quanto para outras espécies, como a castanha de caju. Porém, a secagem em terreiros é extremamente dependente das condições climáticas e em regiões com alta pluviosidade, como no caso da região amazônica, é, muitas das vezes, impraticável.

Para o caso específico da castanha de caju, recomenda-se a secagem em pisos cimentados (Figura 1) ou revestidos com lonas ou plásticos. Durante o manejo do terreiro, castanhas colhidas no dia anterior não devem ser misturadas com castanhas recém-colhidas, devido à diferença de teor de água entre os dois lotes. Outro ponto importante é que as camadas de castanha não

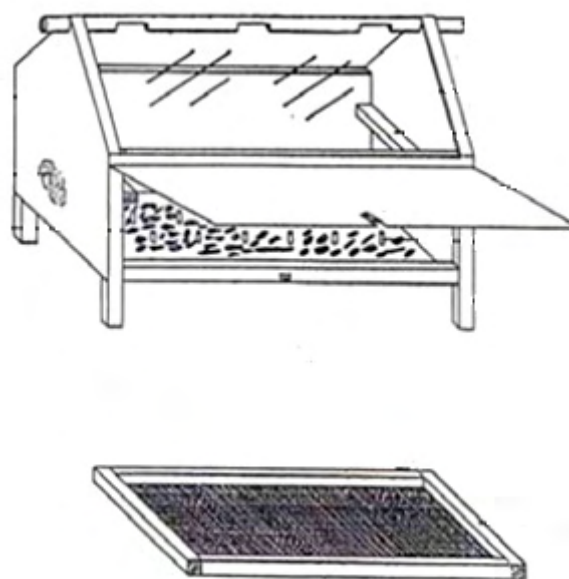
podem ter altura superior a 10 cm, devendo ser reviradas pelo menos duas vezes ao dia (OLIVEIRA et al., 2004).



Fonte: Oliveira et al. (2004)

Figura 1 - Terreiro de cimento para secagem de castanha de caju.

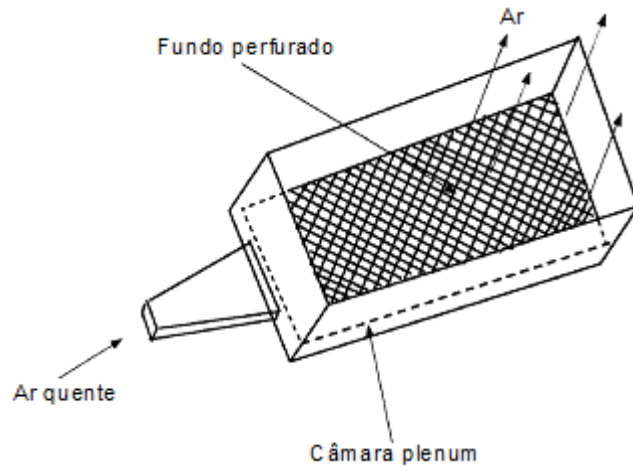
Mursalim e Dewi (2002) analisaram a secagem de castanha de caju em casca utilizando um secador solar (Figura 2). Neste trabalho, os autores concluíram que o uso deste equipamento resultou em um produto de elevada qualidade e com alto poder de germinação, quando comparado ao uso de terreiros.



Adaptado de: Mursalim e Dewi (2002)

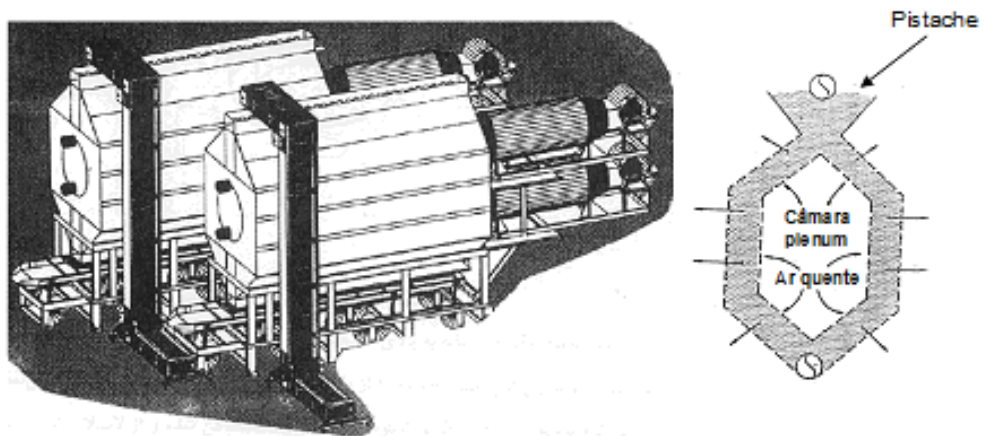
Figura 2 - Secador solar para secagem de castanha de caju.

Nejad et al. (2002) avaliaram o efeito da secagem de pistache sobre a qualidade das sementes quando secas em de terreiro, em secador de camada fixa (Figura 3), em secador vertical contínuo ou de fluxo cruzado (Figura 4), em secador vertical cilíndrico (Figura 5) e em secador cilíndrico em funil (Figura 6).



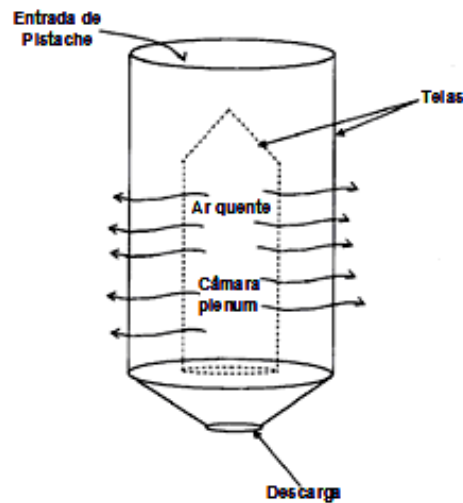
Adaptado de: Nejad et al. (2002)

Figura 3 - Secador de camada fixa para secagem de pistache.



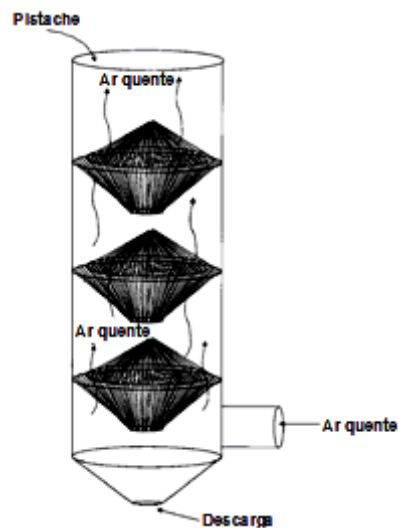
Adaptado de: Nejad et al. (2002)

Figura 4 - Secador de fluxo cruzado para secagem de pistache.



Adaptado de: Nejad et al. (2002)

Figura 5 - Secador vertical cilíndrico para secagem de pistache.



Adaptado de: Nejad et al. (2002)

Figura 6 - Secador vertical em funil para pistache.

Em todos os testes, os autores utilizaram sementes descascadas, separadas e lavadas, seguindo-se as seguintes metodologias:

- **Terreiro:** as sementes de pistache foram espalhadas em uma fina camada, com espessura de 2 a 3 cm, em terreiro com piso de concreto, sob 2 dias de sol, com temperatura média de 26,5 °C e umidade relativa do ar de 18%.
- **Camada fixa:** as sementes foram processadas em uma camada com 50 cm de espessura durante 8 h com temperatura média de secagem de $65 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

- **Secador vertical contínuo:** o secador vertical contínuo consiste de um sistema de dois estágios totalizando 10 h de processamento. As temperaturas para o primeiro (topo) e o segundo (base) estágio foram 45°C e 40°C, respectivamente.
- **Secador cilíndrico vertical:** foi utilizado um secador cilíndrico com capacidade para 4.500 kg com temperatura de 55 ± 2°C durante 8 h.
- **Secador vertical em funil:** as sementes foram secadas a uma temperatura de 80°C durante 5,5 h.

Com base nesses testes, Nejad et al. (2002) obtiveram os seguintes resultados:

- **Teor de água:** Em todos os testes, o teor de água do produto foi inferior a 4%, porém, no secador vertical contínuo e no vertical cilíndrico, foram observados os menores valores de teor de água, devido ao maior tempo de exposição observado.
- **Porcentagem de tegumento quebrado:** Nos testes realizados com o terreiro e com o secador de camada fixa foram observados os valores mais elevados de casca quebrada. Já o secador vertical contínuo produziu os melhores resultados com relação à quebra de casca das sementes.

Outras características foram avaliadas pelos autores, porém não foram observadas diferenças significativas em seus resultados.

Já para a noz-macadâmia, o método mais empregado é a secagem em silo, com temperaturas variando de 35 a 55°C, dependendo da fase de secagem. As fases de secagem da noz são estabelecidas conforme indicação da Tabela 1 (PIAGENTINI; PIZA, 2007).

Tabela 1 - Recomendações para a secagem da noz-macadâmia

Etapa Nº	Teor de água (% b.s.)		Temperatura (°C)	Duração (dia)
	Inicial	Final		
1	20	9,1	35	10 a 15
2	9,1	2,9	45	3 a 4
3	2,9	1,5	55	2 a 3

Fonte: Piagentini; Piza (2007)

Estudos sobre as condições de secagem da noz da noqueira para a obtenção de um produto com qualidade foram realizados por Koyuncu et al. (2003). Neste trabalho os autores secaram o produto em terreiro (sob o sol) a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ e em estufa (à sombra) a $30 \pm 1^\circ\text{C}$.

Neste trabalho, os autores observaram que a radiação solar e a ocorrência de vento melhoraram as características químicas do produto, como o teor de peróxido e o teor de ácidos graxos. Sendo assim, para a noz da noqueira, a secagem em terreiro foi a que produziu um material de melhor qualidade.

Dessa forma, com base nas tecnologias destacadas para o processamento de outras castanhas e amêndoas, verificam-se grandes dificuldades na utilização mesmas tecnologias para a Castanha-do-Brasil, como descrito a seguir:

- A Castanheira-do-Brasil é uma espécie arbórea de grande porte, nativa da Amazônia, que cresce em floretas de terra firme e está irregularmente distribuída pela região. Seu fruto é um pixídio imperfeito (Figura 7), popularmente conhecido como ouriço, esférico ou levemente globoso, com mesocarpo extremamente rígido, lenhoso, contendo de 12 a 25 sementes de testa dura, agudas e angulosas, mais ou menos triangulares, transversalmente rugosas, estritamente compridas, com polpa branco-amarelada, conforme mostrado na Figura 8 (SANTOS et al., 2006).
- Botanicamente, as sementes não são nozes (castanhas), mas sim caroços de um pixídio. Elas apresentam um lado côncavo e os outros dois aplanados: o primeiro é imediato à parede do fruto, os outros dois se aplanam pela pressão exercida pelas outras sementes.
- A testa compõe-se de duas camadas: uma externa, paliçada, e uma interna, marrom escura, que fica aderida ao tegumento conforme mostrado na Figura 9 (CAMARGO et al., 2000).



Fonte: APIZ (2008)

Figura 7 - Ouriço da Castanha-do-Brasil.



Fonte: APIZ (2008)

Figura 8 - Sementes de Castanha-do-Brasil em casca sendo retiradas do ouriço.



Figura 9 - Castanhas descascadas, prontas para o consumo.

- Nas regiões produtoras, a floração inicia-se em setembro e estende-se até fevereiro. Os frutos levam até 15 meses para amadurecer, começando a cair no início da estação chuvosa (novembro), prolongando até o mês de março (SIMÕES, 2004). Como a árvore é muito alta e a maturação do fruto culmina com o desprendimento deste da planta-mãe, não se verifica a colheita da castanha e sim a coleta dos ouriços já no solo.
- Fato peculiar da Castanha-do-Brasil é o método de coleta empregado: como os ouriços são frutos lenhosos com massa variando de 800 g a 1.500 g, e as castanheiras são muito altas, é um grande risco para a circulação de pessoas nos castanhais durante a época de queda de frutos. Isto se verifica por inúmeros acidentes já ocorridos devido à queda de ouriços sobre trabalhadores, causando graves ferimentos ou levando-os até mesmo à morte.
- Outro ponto importante que se refere à coleta da castanha em condições de floresta diz respeito à logística empregada por essa população. Como a densidade populacional média de castanheiras é baixa, aproximadamente 1 pé.ha^{-1} , em condições naturais, as áreas exploradas pelas comunidades extrativistas são muito extensas, de forma a garantir uma produção aceitável. No estado do Acre, tais áreas podem ser de até 3.600 ha (ÁLVARES, 2009).

Para o estado do Acre, a rotina empregada é a seguinte: os extrativistas iniciam a caminhada pela floresta de manhã, em trilhas já definidas para os castanhais e, durante esta caminhada, os frutos que estão sob as castanheiras são recolhidos e amontoados próximo à árvore (Figura 10). Esta ação se repete até o final do dia, quando o extrativista volta à sua residência. Em outro dia, de posse de um animal de carga, ele volta ao caminho feito no dia anterior, quebra os ouriços e faz uma pré-seleção (Figura 11); a lavagem das castanhas para separação hidráulica é opcional (Figura 12). Depois destas operações, o produto é transportado para a residência, onde é submetido a uma pré-secagem sob condições naturais (Figura 13).

Para o estado de Mato Grosso, a rotina é a de “acampamento” dos extrativistas em clareira, previamente estabelecida, na época da safra, com o produto sendo transferido para a sua residência a cada 15 dias, em média.

Dessa forma, observa-se a grande variedade de manejo do produto em condições de floresta.



Foto: Virgínia Álvares de Souza. EMBRAPA-Acre.

Figura 10 - Amontoamento dos ouriços durante a coleta.



Fonte: APIZ (2008)

Figura 11 - Quebra e seleção dos ouriços.



Fonte: APIZ (2008)

Figura 12 - Lavagem ou separação hidráulica das castanhas.



Foto: Virgínia Álvares de Souza. EMBRAPA-Acre.

Figura 13 - Pré-secagem da Castanha-do-Brasil fora da área de coleta.

Como pode ser visto na Figura 13, extrativistas com maiores conhecimentos técnicos, utilizam suportes telados (tipo terreiro suspenso) para a secagem natural, onde o produto é espalhado e revolvido durante um período de, aproximadamente, 15 dias antes de ser ensacado para comercialização.

Como no Mato Grosso a época de coleta e preparo da castanha ocorrem durante o período chuvoso (alta temperatura e alta umidade relativa), o crescimento de fungos e conseqüente deterioração do produto são fatores limitantes para a manutenção da qualidade.

Com essas considerações, verifica-se que o desenvolvimento de tecnologias eficientes para o preparo, secagem e armazenagem, que levam em consideração a realidade econômica dos que coletam a castanha em condições semelhantes às do Mato Grosso, é de grande importância para obtenção de um produto de qualidade.

Cada extrativista coleta entre 10 e 15 latas por dia (medida que corresponde a um volume de 18 litros) e que equivalem a, aproximadamente, 100 a 150 kg de castanha. A baixa produtividade e a pequena produção são inerentes ao sistema extrativista de Castanha-do-Brasil. Porém, o baixo preço pago pelo produto (R\$ 15,00 por lata) e, geralmente, sem outra oportunidade de trabalho fora do período de coleta, faz com que a sobrevivência dessa classe de trabalhadores se torne uma tarefa de extrema dificuldade.

Outro ponto importante no desenvolvimento de tecnologia para a secagem do produto é a pouca infra-estrutura existente nas comunidades,

principalmente, no que diz respeito à oferta de energia elétrica e fácil acesso aos centros de processamento e distribuição da castanha.

Em comunidades mais isoladas, não existe energia elétrica ou, quando há fornecimento de energia elétrica, esta é escassa e pouco confiável, sendo produzida por conjuntos moto-gerador a óleo diesel. Sendo assim, a tecnologia para a secagem, que depende de ventiladores, para forçar o ar aquecido através do produto, fica praticamente inviável.

Vale ressaltar que, devido à dificuldade de acesso às regiões produtoras, os materiais apropriados à instalação de uma infra-estrutura mínima (tijolo, cimento, aço, etc.), não estão disponíveis ou, quando estão, têm custos elevados e, com carência de mão-de-obra especializada para a realização do projeto, torna o uso de tecnologia adequada quase impossível.

Dessa forma, fica justificada a dificuldade de adaptação das tecnologias de secagem existentes para a Castanha-do-Brasil, principalmente em condições de floresta. Outros pontos importantes a serem observado durante o desenvolvimento de tecnologias são as severas intempéries, típicas dessa região, o baixo poder aquisitivo das comunidades envolvidas e o aspecto da conservação ambiental, tão importante quando se trata do bioma Amazônia.

Com base nos problemas apresentados, o método de secagem mais apropriado para a fase de pós-colheita é a secagem artificial por convecção natural (sem o uso de ventiladores) que, utilizando a biomassa gerada na colheita como fonte de calor para secagem, pode reduzir ou eliminar problemas com a baixa qualidade da Castanha-do-Brasil produzida em sistema extrativista.

O uso de secador por convecção natural é justificado, principalmente, pelo fato de ser construído com materiais facilmente encontrados em mercados locais e da exigência de mão-de-obra pouco especializada para a sua construção.

Os secadores por convecção natural utilizam um trocador de calor para transferir, indiretamente, o calor produzido pela combustão da biomassa, em uma fornalha, para o ar de secagem que, sendo aquecido e menos denso que o ar ambiente, é forçado, pela diferença de pressão entre a câmara *plenum* e a exaustão da câmara de secagem, a passar pela camada de castanhas.

A proposta de desenvolvimento deste equipamento foi feita a partir do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil, pela

Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias, em conjunto com os órgãos internacionais CIRAD – França (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement); NFA-Suécia (National Food Administration); e o CSL-Reino Unido (Central Science Laboratory), por meio do projeto SAFENUT, financiado pela STDF (Standard and Trade Development Facility), cujo objetivo foi o de desenvolver um sistema de gerenciamento e controle efetivo da aflatoxina, na cadeia produtiva da Castanha-do-Brasil, para a recuperação e a consolidação de mercados para a exportação, principalmente a Europa.

Ao final deste projeto, em 2008, os pesquisadores chegaram à conclusão de que a contaminação da castanha por aflatoxina ocorre ainda no campo e durante a etapa de colheita e pré-processamento. Dessa forma, depois do SAFENUT, como uma tentativa de restabelecer o mercado externo para a Castanha-do-Brasil, neste trabalho objetivou-se desenvolver e testar um sistema de secagem da Castanha-do-Brasil em condições de campo, de forma a reduzir a contaminação do produto por aflatoxina.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em três etapas: (i) projeto do secador; (ii) análise técnica de um protótipo do sistema proposto e (iii) validação do sistema em condições reais de campo.

A análise técnica do protótipo construído foi realizada no Centro de Pesquisa Agroflorestal do Acre, EMBRAPA-Acre, no município de Rio Branco-AC, durante a safra 2010-2011. As castanhas utilizadas no experimento foram coletadas da RESEX (Reserva Extrativista) Chico Mendes, no município de Brasiléia-AC, na localidade denominada Porongaba.

A validação do sistema de secagem proposto foi realizada na área de extração de castanha da fazenda Dal Pai, no município de Itaúba - MT, durante a safra 2010/2011.

Projeto do secador

Para tornar-se apto às condições de secagem do produto ainda no campo, o projeto levou em consideração os seguintes pontos:

- O secador deve ser instalado na área de coleta, por causa da dificuldade logística para retirar o produto deste local em um curto espaço de tempo;
- Independência de fonte de energia elétrica;
- Adequação ao volume de produção médio diário de um coletor de castanha;
- Rusticidade;
- Não necessitar de mão de obra especializada para sua construção e operação; e,
- Suportar as severas intempéries características da região Amazônica (elevado índice de precipitação e alta umidade relativa).

Com base nesses requisitos, foi projetado um secador por convecção natural, para secagem em lotes, com capacidade estática variando de 200 a 300 L, o que corresponde a um volume de, aproximadamente, 11 a 17 latas (uma lata é a medida de volume característica para a Castanha-do-Brasil, correspondente a 18 L, aproximadamente 10 kg), produção média diária de um coletor.

O equipamento é composto de:

- Fornalha;
- Trocador de calor;
- Chaminé;
- Câmara *plenum*;
- Câmara de secagem.

Os elementos constituintes do secador projetado podem observados na Figura 14.

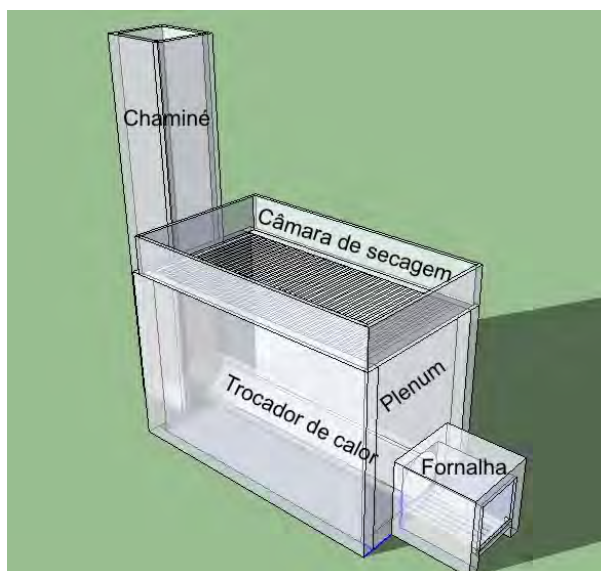


Figura 14 – Elementos constituintes do secador projetado.

Câmara de secagem

A câmara de secagem foi dimensionada para receber um volume de produto referente à média diária de coleta da castanha, que é de 11 a 17 latas/homem/dia. Este dado foi obtido por entrevistas com 30 extrativistas do município de Itaúba-MT, no período de 18 a 20 de Junho de 2010.

Considerando que o volume correspondente a uma lata é de 18 L, a capacidade do secador pode ser determinada pela Equação 1.

$$V_{cs} = P_{md} \cdot V_{lt} \quad (1)$$

Em que:

V_{cs} = Volume câmara de secagem (m^3);

P_{md} = Produção média diária (lata);

V_{lt} = Volume de uma lata ($m^3 \cdot lata^{-1}$).

Com base no volume da câmara de secagem, calculado pela Equação 1, considerando que a altura de camada de produto varia de 0,10 m a 0,20 m, a área da câmara de secagem calculada foi de 2 m^2 .

A espessura da camada de produto foi determinada com base nos parâmetros utilizados para a secagem de outros produtos similares, como a castanha de caju (OLIVEIRA *et al.*, 2004), o pistache (NEJAD *et al.*, 2002) e a

noz-macadâmia (PRICHAVUDHI; YAMAMOTO, 1987). Também utilizou-se como parâmetro para a determinação da espessura da camada a baixa capacidade de secagem do secador por convecção natural, fixando em 0,20 m a espessura máxima de camada de produto.

A altura da câmara de secagem foi de 0,30 m, de modo a permitir o revolvimento do produto durante a secagem, sem seu extravasamento.

Trocador de calor

Das configurações possíveis para o trocador de calor, foi selecionado o trocador de calor de tubo concêntrico com fluxo cruzado, por ser esta a que melhor se adapta ao desenho do secador.

A metodologia utilizada para o cálculo da área de troca térmica foi o da média logarítmica das diferenças de temperatura (INCROPERA et al., 2008).

Com base neste método, inicialmente, determina-se a quantidade de energia útil que deve estar disponível para o aquecimento do ar de secagem (Equação 2).

$$\dot{q}_u = \dot{m}_{ar} \cdot \bar{c}_{par} (T_{fsai} - T_{fent}) \quad (2)$$

Em que:

- \dot{q}_u = Taxa de transferência de calor para aquecimento do ar (W);
- \dot{m}_{ar} = Vazão mássica do ar de secagem ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$);
- \bar{c}_{par} = Calor específico médio do ar (temperatura na entrada e na saída) ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);
- T_{fsai} = Temperatura do fluido frio que sai do trocador de calor (K);
- T_{fent} = Temperatura do fluido frio que entra do trocador (K).

Segundo Forson et al. (2007), a vazão mássica do ar de secagem em secadores por convecção natural deve ser na faixa de 0,9 a 2,4 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Assim, para o dimensionamento deste sistema, foi utilizada a vazão mássica do ar de secagem (\dot{m}_{ar}) igual a 0,9 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Depois do cálculo da quantidade de energia útil, determinou-se a média logarítmica da diferença das temperaturas (MLDT), para um trocador de calor de tubo concêntrico com fluxo cruzado, segundo as Equações 3 a 5. Vale

ressaltar que para aplicação do método MLDT a configuração escolhida é realizada considerando-se um trocador de calor de tubo concêntrico com fluxo contracorrente e aplicando-se um fator de correção (F), que é função também das temperaturas dos fluidos (INCROPERA et al., 2008).

$$\Delta T_{mi} = F \cdot \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (3)$$

Em que:

ΔT_{mi} = Média logarítmica da diferença das temperaturas (K);

F = Fator de correção para o uso da equação de fluxo contracorrente para fluxo cruzado (adimensional).

As diferenças de temperatura ΔT_1 e ΔT_2 , para o caso de um trocador de calor com fluxo contracorrente, podem ser obtidas a partir das Equações 4 e 5.

$$\Delta T_1 = T_{qent} - T_{fsai} \quad (4)$$

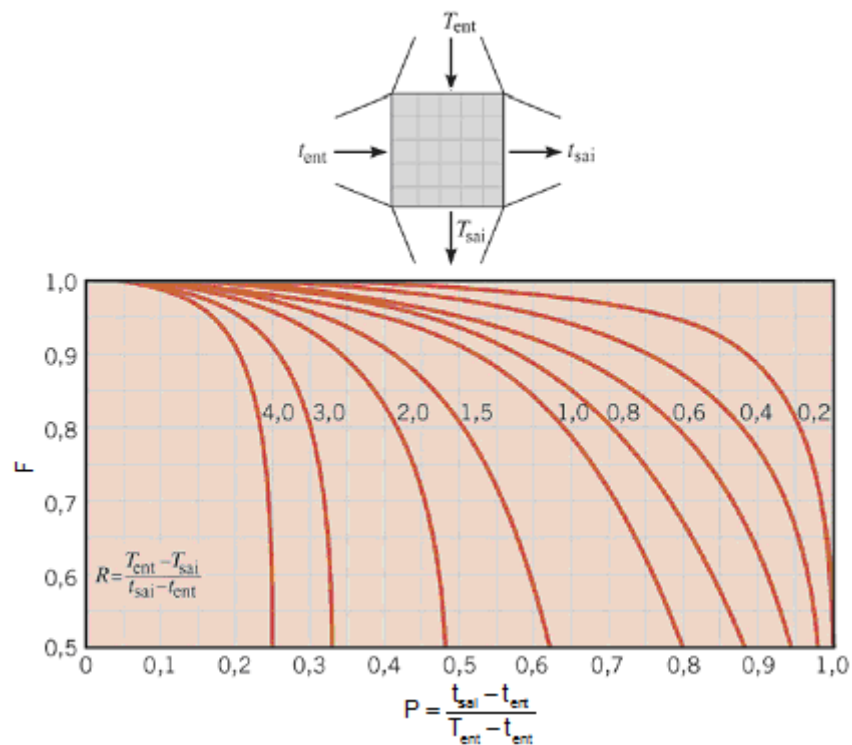
$$\Delta T_2 = T_{qsai} - T_{fent} \quad (5)$$

Em que:

T_{qent} = Temperatura do fluido quente na entrada do trocador (K);

T_{qsai} = Temperatura do fluido quente na saída do trocador (K).

O fator F é determinado pela utilização de um método gráfico, aplicando-se as temperaturas de entrada e de saída dos fluidos, quente e frio, conforme mostrado na Figura 15.



Fonte: Incropera et al. (2008)

Figura 15 - Fator de correção para um trocador de calor de escoamento cruzado, com passe único, com os dois fluidos não-misturados.

Finalmente, considerando-se que a transferência de calor nesta configuração ocorre, basicamente, pela associação de convecção nos fluidos e condução na parede do trocador, a área de troca térmica pode ser calculada com base na taxa global de calor transferido, conforme Equação 6 (INCROPERA et al., 2008).

$$A = \frac{\dot{q}_u}{U \cdot \Delta T_{mi}} \quad (6)$$

Em que:

A = Área de troca térmica (m^2);

U = Coeficiente global de transferência de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

O coeficiente global de transferência de calor é função da resistência térmica total do sistema. Considerando-se um trocador de calor com tubos concêntricos, a resistência térmica total é função da resistência convectiva interna e externa e ainda da resistência condutiva da parede. Dessa forma, o coeficiente global de transferência de calor (U), para o caso analisado, pode ser obtido pela Equação 7.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1 \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_2 \cdot L}} \quad (7)$$

Em que:

- h_1 = Coeficiente de convecção interno ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$);
- h_2 = Coeficiente de convecção externo ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$);
- k = Condutividade do material do trocador ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$);
- r_1 = Raio interno do trocador (m)
- r_2 = Raio externo do trocador (m)
- L = Comprimento do trocador (m)

É relevante citar que a determinação do coeficiente convectivo (h), com precisão, não é simples. Portanto, a Equação 7 tem sua aplicabilidade prática, no caso de um projeto, limitada. De forma a garantir o dimensionamento com precisão satisfatória, Holmann (1983) cita que o coeficiente global de transferência de calor, U , para trocadores de calor gás-gás, varia na faixa de 10 a 40 $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$. Assim, para efeitos do dimensionamento do secador proposto, utilizou-se $U = 30 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$.

De forma a determinar se o trocador de calor dimensionado é eficiente, determinou-se a efetividade de troca térmica (ε), que consiste na razão entre a taxa de calor útil do sistema (\dot{q}_u) pela taxa de transferência de calor máxima (\dot{q}_{max}) que o sistema pode oferecer, conforme a Equação 8 (INCROPERA et al., 2008).

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}_u}{\dot{q}_{max}} \quad (8)$$

A determinação da taxa de transferência de calor máxima que o sistema pode permitir é realizada com base na Equação 9 (INCROPERA et al., 2008).

$$\dot{q}_{max} = C_{min} (T_{qent} - T_{fent}) \quad (9)$$

Em que C_{\min} é a capacidade calorífica mínima, determinada pelo menor valor obtido pelas taxas caloríficas do fluido quente e do fluido frio, conforme Equações 10 e 11.

$$C_f = \dot{m}_{ar} \cdot \bar{c}_{par} \quad (10)$$

Com base no balanço global de energia, tem-se a Equação 11.

$$C_q = \dot{m}_{arq} \cdot \bar{c}_{pq} = C_f \left(\frac{T_{fsai} - T_{fent}}{T_{qent} - T_{qsai}} \right) \quad (11)$$

Câmara plenum

O cálculo da altura da câmara *plenum*, foi determinada a perda de carga causada pela camada de castanha, cuja convecção natural tem que ser capaz de superar, garantindo que haverá fluxo de ar passando pela massa de produto.

Como não existem estudos sobre a perda de carga causada por uma camada de Castanha-do-Brasil, utilizou-se os resultados encontrados por Biaggioni *et al.* (2005) para a noz-macadâmia. A escolha deste produto para analogia com a Castanha-do-Brasil se deu pela similaridade de suas propriedades físicas. Para a noz-macadâmia, esses autores citam massa específica de $961,87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e porosidade de 45,15%; Ao passo que para a Castanha-do-Brasil, a massa específica e a porosidade, encontradas neste trabalho, foram de $947,00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e 46,88%, respectivamente.

De posse deste resultado, aplicou-se o método gráfico mostrado na Figura 16 para o cálculo da perda de carga por metro de camada de produto.

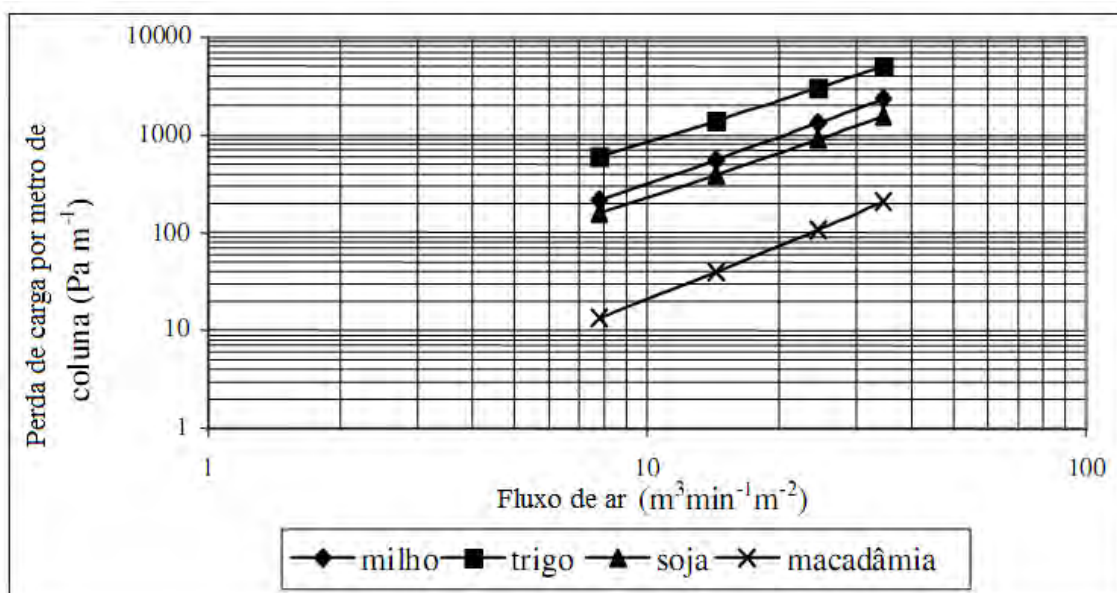


Figura 16 – Perda de carga por metro de camada de noz macadâmia.

De posse deste resultado, a altura da câmara *plenum* foi calculada aplicando-se o princípio de Bernoulli para o fluxo de ar aquecido sob a camada de grãos, conforme Equação 12. Para a aplicação da equação e suas simplificações, as seguintes considerações foram feitas:

- (i) A altura da camada de produto (h_{cp}) é relevante quando comparada com a altura da câmara *plenum* (H);
- (ii) O ar ambiente entra pela parte inferior da estrutura, passa pelo trocador de calor e pela massa de produto, sendo sua exaustão realizada por convecção natural;
- (iii) A perda de carga a ser vencida pela convecção natural é dada pela pressão do ar na saída do trocador menos a pressão atmosférica;
- (iv) Os valores de velocidade do ar na câmara *plenum* e na camada de grãos são desprezíveis.

$$H_p = \frac{\Delta P_t}{\rho_{ar} \cdot g} - h_{cp} \quad (12)$$

Em que:

- H_p = Altura da câmara *plenum* (m);
- ΔP_t = Perda de carga total entre câmara *plenum* e a saída da câmara de secagem (Pa);
- g = Aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$);

h_{cp} = Altura da camada de produto (m).

Fornalha

A fornalha foi projetada para a combustão de ouriço (fruto) da castanha, bem como lenha. Porém, como o ouriço da castanha possui poder calorífico superior ao da lenha (OLIVEIRA; LOBO, 2002), o dimensionamento foi realizado com base no consumo de lenha, haja vista que esta é a situação mais crítica de uso deste equipamento.

Câmara de combustão

Conforme citado por Lopes (2002), o volume da câmara de combustão de uma fornalha pode ser calculado pela Equação 13.

$$V_{cc} = \frac{\dot{m}_{cb} \cdot PCI}{K} \quad (13)$$

Em que:

V_{cc} = Volume da câmara de combustão (m³);

\dot{m}_{cb} = Vazão mássica de combustível (kg · s⁻¹);

PCI = Poder calorífico inferior do combustível (kJ · kg⁻¹);

K = Carga térmica volumétrica da fornalha (kJ · s⁻¹ · m⁻³).

Valores elevados de carga térmica fazem com que as temperaturas no interior da fornalha sejam muito elevadas, podendo danificar sua estrutura (MAGALHÃES, 2007), assim, para o dimensionamento da fornalha foi utilizada a carga térmica volumétrica de 200 kJ · s⁻¹ · m⁻³, com base nos valores na faixa de 177 a 278 kJ · s⁻¹ · m⁻³, citados por Silva *et al.* (1991), para fornalhas a lenha.

O cálculo da vazão mássica de combustível foi realizado utilizando a Equação 14 (MAGALHÃES *et al.*, 2007).

$$\dot{m}_{cb} = \frac{\dot{q}_u}{PCI \cdot \eta} \quad (14)$$

Em que:

η = Eficiência da fornalha (adimensional);

Para a eficiência da fornalha foi assumido um valor de 0,60, em conformidade com os dados encontrados em literatura para este tipo de equipamento (MAGALHÃES, 2007; MELO, 2003).

Considerando que o ar proveniente da fornalha não será utilizado diretamente para o aquecimento do ar de secagem, passando por um trocador de calor, a vazão mássica de combustível deve ser corrigida (\dot{m}_{cbc}) considerando-se a efetividade do trocador.

A vazão mássica de combustível corrigida pode ser obtida utilizando a Equação 15.

$$\dot{m}_{cbc} = \frac{\dot{m}_{cb}}{\varepsilon} \quad (15)$$

Área da grelha

O dimensionamento da área da grelha foi realizado com base na Equação 16 (MAGALHÃES, 2007).

$$A_g = \frac{\dot{m}_{cbc}}{N_c} \quad (16)$$

Em que:

A_g = Área da superfície livre da grelha (m^2);

N_c = Taxa de carregamento da grelha ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$).

Os valores de taxa de carregamento encontrados na literatura são muito variados. Assim, neste trabalho foi utilizado o valor de $30 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, citado por Andrade et al. (1984). A escolha deste valor baseou-se na baixa temperatura que o ar de secagem deve atingir, logo, a taxa de carregamento da fornalha deve ser igualmente baixa, sendo este o menor valor encontrado.

A verificação da adequação da área de grelha calculada foi realizada estimando-se a relação entre a área da superfície livre e a da superfície total da grelha (Equação 17).

$$R_{\text{slt}} = \frac{A_g}{A_t} \quad (17)$$

Em que:

R_{slt} = Relação entre a área livre e a área total da grelha (adimensional);

A_t = Área total da grelha (m²).

Chaminé

O cálculo da altura da chaminé baseou-se na necessidade de garantir pressão negativa no interior da fornalha, configurando a tiragem natural, função deste equipamento.

Assim, fixou-se o valor de 2,0 m para a altura da chaminé e verificou-se se a altura fixada é capaz de vencer a queda de pressão gerada no sistema. A equação 18 foi utilizada na verificação da altura, conforme citada por Forson *et al.* (2007).

A escolha da altura baseou-se na necessidade de garantir que os gases da combustão não estejam em contato direto com o operador do sistema, permitindo a difusão destes gases na atmosfera com mais facilidade.

$$H_{\text{ch}} = \frac{\Delta P_t}{g(\rho_{\text{ar}} - \rho_{\text{arq}})} \quad (18)$$

Em que:

H_{ch} = Altura da chaminé (m);

ΔP_t = Perda de carga total ocasionada pela chaminé (Pa);

g = Aceleração da gravidade (m · s⁻²)

ρ_{ar} = Massa específica do ar à temperatura ambiente (kg · m⁻³);

ρ_{arq} = Massa específica média do ar oriundo da fornalha (kg · m⁻³).

Para o cálculo da perda de carga, inicialmente, verificou se o escoamento era laminar ou turbulento, determinando-se, por isso, o número de Reynolds (Re), conforme Equação 19 (FOX *et al.*, 2010).

$$Re = \frac{\rho_{\text{arq}} \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu_{\text{arq}}} \quad (19)$$

Em que:

Re = Número de Reynolds (adimensional);

\bar{v} = Velocidade média do escoamento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

μ_{arq} = Viscosidade média do ar oriundo da fornalha ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$).

De acordo com Lopes (2002), a velocidade média do ar oriundo da fornalha, para tiragem natural, ou seja, com o uso de chaminés, é da ordem de 0,8 a 2,0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Para este trabalho utilizou-se o valor mínimo para velocidade igual a 0,8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Para o diâmetro do tubo da chaminé foi adotado o mesmo valor do diâmetro do trocador de calor, uma vez que a inexistência de reduções ou expansões no escoamento reduz as perdas de carga localizadas.

Independentemente do escoamento, a queda de pressão total em um duto pode ser dividida entre a perda de carga distribuída, que acontece nos trechos retilíneos, e a perda de carga localizada, que acontece nas peças acessórias do sistema, como as curvas, por exemplo, (FOX *et al.*, 2010). A Equação 20 expressa a condição para o cálculo da perda de carga total.

$$\Delta P_T = \Delta P_D + \Delta P_L \quad (20)$$

Em que:

ΔP_T = Perda de carga total (Pa);

ΔP_D = Perda de carga localizada (Pa);

ΔP_L = Perda de carga distribuída (Pa).

Para escoamentos turbulentos, a perda de carga distribuída pode ser determinada a partir da Equação 21 (FOX *et al.*, 2010).

$$\Delta P_D = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (21)$$

Em que:

f = Fator de atrito (adimensional);

L = Comprimento do tubo (m).

A perda de carga localizada pode ser calculada fazendo-se uma analogia com o comprimento de tubo, sob as mesmas condições, que seria necessário para gerar o mesmo valor de perda de carga causada pelo acessório. A partir desse conceito, aplica-se a Equação 22 para o cálculo da perda de carga localizada considerando-se o comprimento equivalente (L_e) da peça acessória (FOX *et al.*, 2010).

$$\Delta P_L = f \cdot \frac{L_e}{D} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (22)$$

Em que:

L_e = Comprimento equivalente do acessório (m).

Conforme dados apresentados por Fox *et al.* (2010) e sabendo-se que a configuração do sistema trocador de calor-chaminé contém apenas um cotovelo-padrão de 90° (Figura 17), o comprimento equivalente adimensional, $\left(\frac{L_e}{D}\right)$, para perdas localizadas é igual a 30.

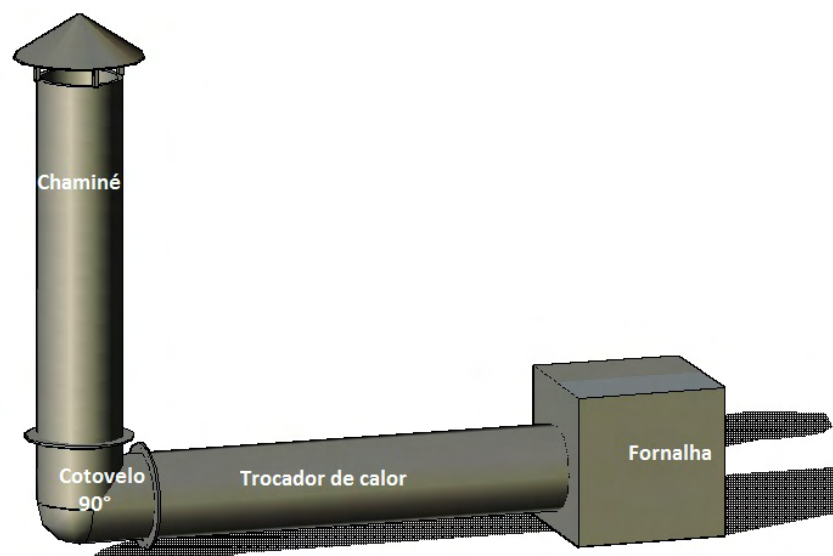


Figura 17 – Configuração do sistema trocador de calor-chaminé.

Para a determinação do fator de atrito aplicou-se a Equação 23, cujo resultado foi utilizado no cálculo das perdas de carga localizadas e nas

distribuídas, sabendo-se que as condições do escoamento e os materiais utilizados foram os mesmos.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\left(\frac{e}{D}\right)}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (23)$$

Em que:

e = Rugosidade do material (m).

Construção do protótipo do secador projetado

O protótipo do secador projetado neste trabalho foi totalmente construído em chapas de aço nº 14, com exceção da fornalha, que foi construída em chapa de aço nº 8. Na base do protótipo foi instalado um sistema de movimentação composto por dois eixos e quatro rodas, capaz de suportar o peso do secador, de modo a permitir a utilização deste em treinamentos e dias de campo.

A escolha do material baseou-se na dificuldade de se construir o protótipo em alvenaria no município de Rio Branco, estado do Acre, em virtude da escassez de mão-de-obra qualificada. Assim, o protótipo foi construído no município de Sinop-MT e enviado para a unidade da EMBRAPA-Acre em Rio Branco, para testes.

Durante os testes, de modo a obter os dados mais próximos à realidade, foi analisada a perda de calor a que o secador estava submetido. Isso se deve ao fato de que o aço, diferentemente da alvenaria, é um excelente condutor de calor, tornando o protótipo pouco eficiente energeticamente, devido às perdas para o meio. Apresenta-se, na Figura 18, o protótipo construído.



Figura 18 – Protótipo do secador utilizado nos testes experimentais.

O protótipo foi dimensionado de acordo com as equações de projeto discutidas anteriormente, sendo todas as dimensões calculadas respeitadas durante sua construção, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões do protótipo do secador

Descrição	Dimensões (m)
<u>Fornalha:</u>	
Largura	0,70
Altura	0,70
Comprimento	0,70
<u>Trocador de calor:</u>	
Diâmetro	0,40
Comprimento	2,00
<u>Chaminé:</u>	
Diâmetro	0,40
Altura	2,00
<u>Câmara plenum:</u>	
Largura	1,00
Altura	1,20
Comprimento	2,00
<u>Câmara de secagem:</u>	
Largura	1,00
Altura	0,30
Comprimento	2,00

As partes que compuseram o equipamento são descritas a seguir.

Fornalha

Na Figura 19 pode-se observar a fornalha que compôs o protótipo, com destaque para: (a) grelha e (b) para a ligação com o trocador de calor.

As dimensões da fornalha foram de 0,70 m×0,70 m×0,70 m. Porém, considerando-se a altura de 30 cm do cinzeiro, tem-se altura livre da célula de combustão de 0,40 m.

A grelha foi construída com barras de aço de 12,7 mm (½”) de diâmetro, posicionadas acima do cinzeiro.



(a)



(b)

Figura 19 – Fornalha em aço: (a) vista geral e (b) detalhe da grelha e da união com o trocador de calor.

Abaixo da grelha, no cinzeiro, foi posicionada uma gaveta de 0,70 m×0,70 m×0,20 m, com entradas de ar em sua parte superior, facilitando, assim, a remoção das cinzas ao final do processo.

A porta da fornalha consistiu de uma parede dupla de aço com isolamento térmico em seu interior, composto por lã de vidro, de forma a permitir o manuseio desta sem risco de queimaduras para o operador.

Trocador de calor

O trocador de calor foi construído em chapa de aço nº 14, com 0,40 m de diâmetro e 2,0 m de comprimento, sendo este o comprimento total do secador.

O trocador de calor foi posicionado a 0,10 m acima da base do secador e a 0,70 m abaixo da câmara de secagem, conforme dimensões calculadas para a altura da câmara *plenum*.

Pode-se observar na Figura 20 que a fixação do trocador de calor se deu por meio de travas em aço, soldadas nas paredes do secador.



Figura 20 – Detalhe do travamento do trocador de calor no interior do secador.

Controle da tiragem de ar

O controle da tiragem de ar da fornalha foi realizado por meio de uma chaminé, construída com a mesma dimensão do trocador de calor (diâmetro de 0,40 m), de forma a reduzir a perda de carga, conforme discutido anteriormente. Sua altura foi de 2,0 m, conforme estabelecido para o projeto do secador.

A conexão da chaminé com a fornalha se deu pelo trocador de calor, por meio de um cotovelo padrão de 90°. Acima do cotovelo foi instalado um flange, que permite a desmontagem da chaminé, facilitando, assim, sua remoção, conforme Figura 21.



Figura 21 – Detalhe do cotovelo de união com o trocador de calor e do flange para desmontagem da chaminé.

Câmara plenum

A câmara *plenum* foi construída com as mesmas dimensões da base da câmara de secagem (1,0 m × 2,0 m) e altura de 1,20 m, conforme os cálculos do projeto. Considerando-se esta altura, na Figura 22 é apresentado um desenho esquemático do seu interior.

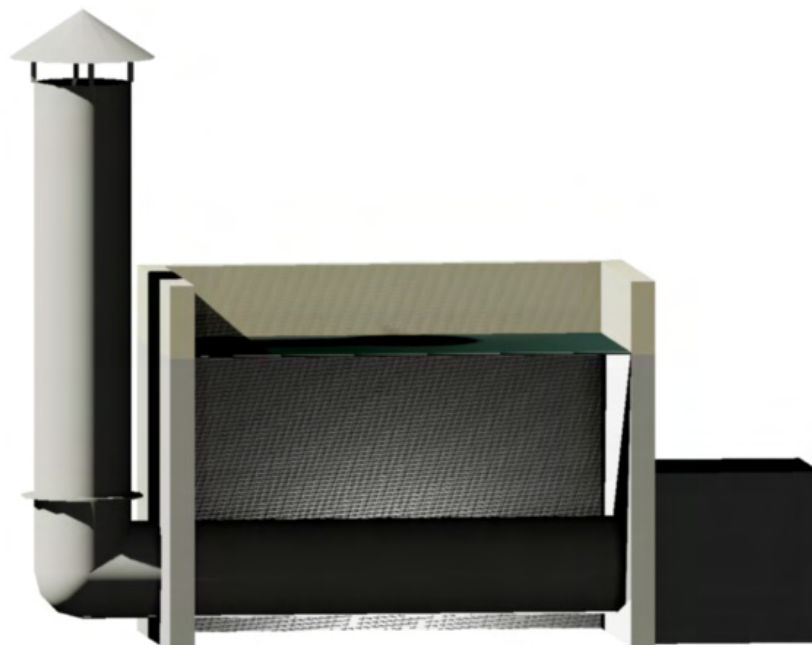


Figura 22 – Vista interna da câmara *plenum*.

Em cada lado do secador, na base da câmara *plenum*, foram instaladas três entradas de ar ambiente (frio), para permitir o fluxo de ar ascendente. As entradas foram construídas com dimensões de 0,10 m de altura por 0,20 m de comprimento. Paralelamente às entradas, foram instalados dispositivos (portinholas) que permitiram o controle da vazão e da temperatura do ar de secagem (Figura 23).



Figura 23 – Aberturas para entrada de ar ambiente na base da câmara *plenum*.

Câmara de secagem

A câmara de secagem foi construída com fundo perfurado, de modo a permitir a passagem do ar aquecido pela massa de produto (Figura 24). Este fundo foi construído em tela com fio de aço galvanizado nº 10, com malha quadrada de 1,5 cm. As dimensões da câmara de secagem foram de 2,0 × 1,0 × 0,3 m, conforme projeto. O material da câmara de secagem foi o mesmo do corpo do secador (chapa de aço nº 16).



Figura 24 – Detalhe da câmara de secagem.

Sistema de carga e descarga de produto

Como se trata de um secador de pequenas dimensões e projetado para ser usado em condições de floresta, não foi construído qualquer dispositivo específico para o carregamento do secador. Entretanto, para a descarga do produto, foi instalada uma porta (0,40 X 0,30 m) em uma das laterais livres do equipamento, de forma a permitir a descarga do produto por escoamento, conforme a Figura 25.



Figura 25 – Porta para o descarregamento do secador.

Instrumentação do protótipo

Para a análise do processo de secagem da Castanha-do-Brasil, foram instalados no protótipo termopares dos tipos T e K, com cabeçote, conectados a uma unidade de aquisição de dados, marca FLUKE® modelo HYDRA, por meio de cabos CCI de duas vias.

Observa-se na Figura 26 o esquema da instalação dos termopares nos pontos de coleta de dados no secador, com detalhamento de suas localizações na tabela 3.

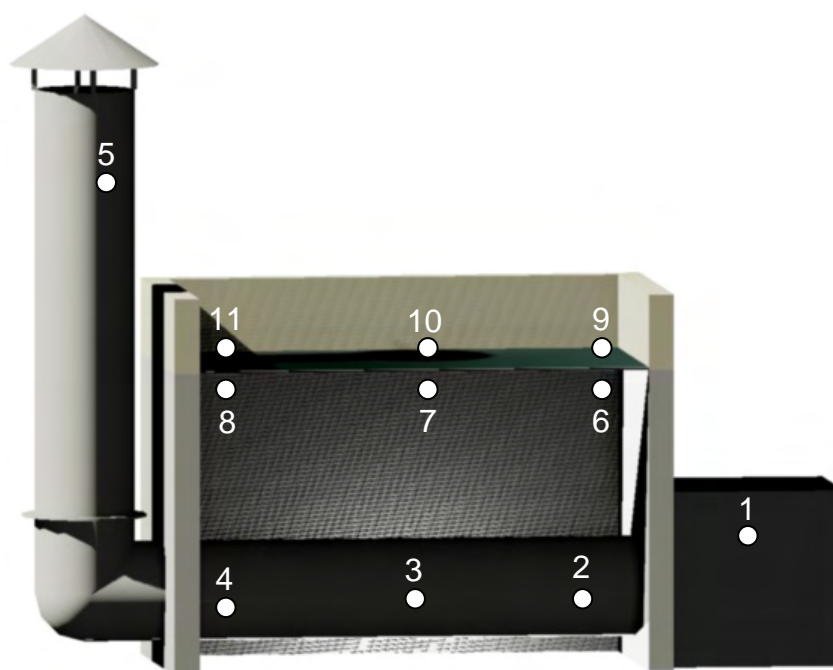


Figura 26 – Esquema da instalação dos termopares.

Tabela 3 – Localização detalhada dos termopares no secador

Termopar	Tipo	Localização detalhada
1	K	Na altura média da câmara de combustão (20 cm acima da grelha)
2	K	Dentro do tubo trocador de calor, na porção inicial e central
3	K	Dentro do tubo trocador de calor, na porção média e central
4	K	Dentro do tubo trocador de calor, na porção final e central
5	K	Na saída dos gases de exaustão (10 cm abaixo da saída da chaminé)
6	T	Entrada do ar na camada de produto, porção inicial e central
7	T	Entrada do ar na camada de produto, porção média e central
8	T	Entrada do ar na camada de produto, porção final e central
9	T	Meio da massa de produto, porção inicial e central
10	T	Meio da massa de produto, porção média e central
11	T	Meio da massa de produto, porção final e central

Na Figura 27 são mostrados alguns pontos de coleta de dados instalados no secador e o sistema de aquisição de dados.



Figura 27 – Sistema de aquisição de dados e pontos de tomada de temperatura.

Além desses pontos de coleta de dados, foi instalado um termohigroanemômetro digital, marca Instrutherm, modelo THAL-300[®], para a medição da temperatura ambiente, umidade relativa e velocidade do vento.

Para a instalação deste equipamento buscou-se um local próximo à área de realização do experimento que sofresse a mínima interferência da temperatura externa influenciada pelo funcionamento do secador (Figura 28).



Figura 28 – Detalhe da localização do termohigroanemômetro em relação ao secador.

Testes com o protótipo

Foram realizados 5 testes com o protótipo secando-se lotes de castanha com valores diferentes de massa inicial, variando-se assim a altura de camada de produto, com valores de 10, 15 e 20 cm. Quatro dos cinco testes foram executados utilizando-se lenha, oriunda de resíduos de serraria do município, como fonte de energia; o quinto teste foi realizado utilizando-se ouriço da castanha (fruto) como fonte energética.

Não foi possível utilizar o ouriço da castanha como fonte de energia em todos os testes devido à escassez deste combustível no local. Para a realização dos testes, as amostras de castanhas foram obtidas a uma distância a mais de 300 km, o que impossibilitou o transporte de grandes quantidades de ouriço para queima.

Para a análise do protótipo foram obtidos os seguintes dados:

- (i) Massas inicial e final do produto;
- (ii) Perfil do teor de água do produto durante os testes;

- (iii) Tempo de secagem;
- (iv) Massa de lenha ou de ouriço consumida;
- (v) Perfil de temperatura no secador;
- (vi) Temperatura, umidade relativa e velocidade do ar ambiente.

As massas inicial e final da castanha foram obtidas pesando-se o material em uma balança de coluna com capacidade para 200 kg e resolução de 10 g.

O teor de água foi determinado pelo método padrão AOAC 925.40 (AOAC, 2008) que indica a metodologia para a determinação do teor de água em castanhas e produtos de castanha. Para o uso desta norma, aplicou-se o método AOAC 935.52 (AOAC, 2008) que preconiza a preparação de amostras de nozes e produtos de nozes para diversas análises.

Assim, para a determinação do teor de água foi retirada, do secador, uma amostra composta de castanha com casca com, aproximadamente, 300 g, a cada hora de secagem. Desta amostra composta foi retirada uma sub-amostra de 50 g de castanha sem tegumento, moída em liquidificador industrial, tomando-se, por fim, apenas 10 g para ser levada à estufa a 95°C por um período de 6 h. O teor de água foi calculado pela diferença entre as massas inicial e final da amostra.

Analisando-se conjuntamente a massa inicial e final do produto, em consonância com do teor de água obtido, determinou-se a massa de água evaporada no experimento (BROOKER *et al.*, 1992).

Também foi determinada a massa de lenha e de ouriço consumida no processo, sendo desconsiderada a massa de material auxiliar utilizado para o início da combustão (por exemplo: palha, papel, etc.). Para essa determinação foi utilizada a mesma balança utilizada para determinar a massa de produto.

Além da massa de combustível, foi realizada a caracterização energética do combustível utilizado nos testes. Amostras de lenha e de ouriço foram retiradas e enviadas ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Viçosa, para a determinação do poder calorífico superior.

De posse destes dados, foi determinado o consumo específico de energia para os lotes analisados. A Equação 24 expressa o procedimento adotado (LOPES *et al.*, 2008).

$$C_{ee} = \frac{m_{cb} \cdot PCI}{m_{ae}} \quad (24)$$

Em que:

C_{ee} = Consumo específico de energia ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$);

m_{cb} = Massa de combustível consumida (kg);

PCI = Poder calorífico inferior do combustível ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$);

m_{ae} = Massa de água evaporada (kg).

Com base no consumo de combustível, no poder calorífico determinado e na massa de água evaporada, determinou-se a eficiência do sistema de secagem, conforme a Equação 25 (LOPES *et al.*, 2008). A eficiência foi determinada, isoladamente, para os cinco testes, e calculada então a eficiência média do sistema.

$$\eta = \frac{m_{ae} \cdot \lambda_p}{m_{cb} \cdot PCI} = \frac{\lambda_p}{C_{ee}} \quad (25)$$

Em que:

η = Eficiência (adimensional);

λ_p = Calor latente de vaporização da água no produto ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

De forma a obter dados mais próximos à realidade de operação do modelo em alvenaria (proposto), foi calculada a perda de calor por convecção durante a operação do sistema. Isto se deveu ao fato de todo o secador ter sido construído em aço, o que aumenta, significativamente, a transferência de calor por condução nas paredes e, conseqüentemente, por convecção da parede para o ar ambiente. Na Figura 29, pode-se observar um esquema que descreve os processos de transferência de calor ocorridos no secador.

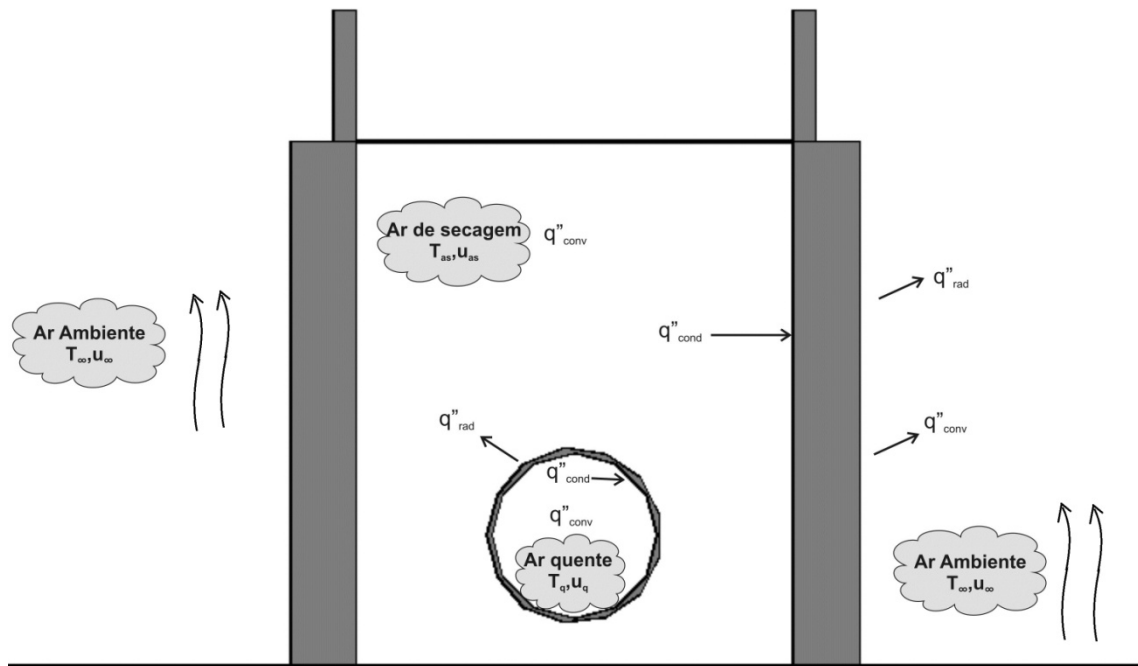


Figura 29 – Esquema do corte transversal do protótipo mostrando os processos de transferência de calor ocorridos.

De todos os processos de transferência de calor mostrados na Figura 29, a quota que corresponde à perda de calor para o ambiente ocorre por convecção entre a parede e o ar ambiente e radiação do secador para o ambiente. Assim, para determinar a taxa de transferência de calor por convecção e radiação, foram utilizadas as Equações 26 e 27, respectivamente (INCROPERA *e. al.*, 2008).

A taxa de calor transferido por convecção foi determinada considerando-se a condição de regime estacionário, da mesma forma quanto para a transferência por radiação (Equação 26).

$$q'_{\text{conv}} = h \cdot A(T_s - T_\infty) \quad (26)$$

Em que:

- q'_{conv} = Taxa de transferência de calor por convecção ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$);
- h = Coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$);
- A = Área da superfície onde ocorre a transferência de calor (m^2);
- T_s = Temperatura da superfície (K);
- T_∞ = Temperatura do ar ambiente (K).

De acordo com Incropera *et al.* (2008), o coeficiente de transferência de calor por convecção (h) (Equação 27) depende das condições na camada limite, que são drasticamente influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

$$h = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (27)$$

Em que:

\overline{Nu}_L = Número de Nusselt (adimensional);

k = Condutividade térmica do fluido ($J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

L = Comprimento característico (m).

Sabendo-se que o coeficiente h é dependente no número de Nusselt, torna-se necessário analisar os efeitos da convecção natural e da convecção forçada sobre os processos. Assim, de acordo com Incropera *et al.* (2008), analisando-se a relação dada por $\frac{Gr_L}{Re_L^2}$ (razão entre o Número de Grashof e o quadrado no número de Reynolds), é possível avaliar quais efeitos são desprezíveis. Para $\frac{Gr_L}{Re_L^2} \ll 1$ os efeitos de convecção natural podem ser desprezados. Para $\frac{Gr_L}{Re_L^2} \gg 1$, os efeitos de convecção forçada podem ser desprezados. Finalmente, os efeitos combinados devem ser considerados para $\frac{Gr_L}{Re_L^2} \approx 1$.

Para o caso dos efeitos de convecção natural ser desprezíveis, como $Nu_L = f(Re_L, Pr)$, deve-se considerar o caso de escoamento paralelo sobre uma placa plana. Sendo assim, a caracterização do escoamento é dada pelo Número de Reynolds crítico (Re_{xc}), ou seja, 5×10^5 . Desta forma, valores menores do que este caracteriza o escoamento laminar, ao passo que, valores superiores definem o escoamento turbulento.

Para o caso de escoamento laminar, a Equação 28 pode ser utilizada para a determinação do número de Nusselt (INCROPERA *et al.*, 2008). Já para o caso de escoamento turbulento, a Equação 29 é utilizada.

$$\overline{Nu}_x = 0,664 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad \forall Pr \geq 0,6 \quad (28)$$

$$\overline{Nu}_x = 0,0296 \cdot Re_x^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad \forall 0,6 \leq Pr \leq 60 \quad (29)$$

O número de Prandtl expressa a razão entre as difusividades de momento e térmica, e pode ser obtido pela Equação 30.

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (30)$$

Em que:

Pr = Número de Prandtl (adimensional);

ν = Viscosidade cinemática ($m^2 \cdot s^{-1}$);

α = Difusividade térmica ($m^2 \cdot s^{-1}$).

Para o caso dos efeitos de convecção forçada ser desprezíveis, o número de Nusselt pode ser obtido aplicando-se a Equação 31, citada por Incropera *et al.* (2008). Esta equação pode ser aplicada em todo o intervalo de número de Rayleigh (Ra_L).

$$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (31)$$

Incropera *et al.* (2008) cita a Equação 32 para a determinação do número de Rayleigh, que relaciona as forças de empuxo com as forças viscosas no fluido em convecção natural.

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr \quad (32)$$

Em que:

Ra_L = Número de Rayleigh (adimensional);

Gr_L = Número de Grashof (adimensional).

O número de Grashof é determinado a partir da Equação 33 (INCROPERA *et al.*, 2008).

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (33)$$

Em que:

β = Coeficiente de expansão térmica (K^{-1}).

O coeficiente β é dado pelo inverso da temperatura de trabalho, em Kelvin.

Finalmente, para o caso de convecção mista, o número de Nusselt deve ser obtido utilizando-se a Equação 34.

$$Nu_L^n = Nu_f + Nu_n \quad (34)$$

Em que:

n = Parâmetro de escoamento: $n=3$ para escoamentos paralelos.

Nu_f = Número de Nusselt calculado para a convecção forçada pura (adimensional);

Nu_n = Número de Nusselt calculado para a convecção natural pura (adimensional).

Para a determinação da transferência de calor por radiação pode-se utilizar a Equação 35 (INCROPERA *et al.*, 2008).

$$q'_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (35)$$

Em que:

q'_{rad} = Taxa de transferência de calor por radiação ($J \cdot s^{-1}$);

ε = Emissividade da superfície (adimensional);

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$).

O valor da constante de Stefan-Boltzmann é $5,67 \times 10^{-8} J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ (INCROPERA *et al.*, 2008).

Empregou-se chapa de aço carbono com pintura aluminizada para a construção do protótipo, logo sua emissividade estimada foi de 0,95 (INCROPERA *et al.*, 2008). Analisando-se então as taxas de transferências individuais no sistema, a taxa total (q'_{total}) durante os testes pode ser obtida por

meio da Equação 36. Para estimar a quantidade de energia perdida para o ambiente, considerou-se o tempo total de funcionamento do secador.

$$q'_{\text{total}} = q'_{\text{conv}} + q'_{\text{rad}} \quad (36)$$

O tempo de secagem foi determinado a partir da caracterização do teor de água ideal para o armazenamento do produto. Como não há método rápido para a determinação do teor de água de Castanha-do-Brasil, a decisão em interromper a secagem baseou-se nas relações empíricas utilizadas pelos extrativistas, como a redução drástica de volume, a mudança na acústica do produto durante o revolvimento, a liberação de poeira aderida, dentre outras.

O perfil de temperatura ao longo do secador foi obtido com a leitura dos dados de temperatura, nos 11 pontos onde foram instalados os termopares e a cada 15 minutos de secagem. No mesmo intervalo, foram obtidos os dados de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar ambiente.

Testes de validação do secador

A validação do sistema proposto foi realizada com a construção e análise de um secador, construído seguindo as especificações do projeto, em escala de produção real, instalado na área de coleta de castanha.

Foram instalados três secadores em diferentes áreas do município de Itaúba-MT. O teste do sistema ocorreu na área da fazenda Dal Pai.

Nas Figuras 30 a 35 podem-se observar as etapas de construção do secador para testes de validação em condições de campo.



Figura 30 – Limpeza e marcação do terreno.



Figura 31 – Início da execução da construção em alvenaria.



Figura 32 – Instalação do trocador de calor e execução da alvenaria.



Figura 33 – Finalização da câmara *plenum* e detalhe da abertura para a chaminé.



Figura 34 – Execução da construção da chaminé e detalhe da fornalha.



Figura 35 – Secador para testes de validação finalizado.

Vale destacar que, devido à dificuldade logística da instalação de um equipamento dentro da mata e às condições severas de intempéries a que o sistema é submetido, optou-se pela construção de uma fornalha rústica, sem diferenciação da câmara de combustão, de forma que a queima do combustível acontece no interior do tubo trocador de calor. Isto também se deveu ao fato da necessidade de redução dos custos deste sistema, haja vista que os extrativistas de castanha recebem uma remuneração muito baixa, dificultando a implantação de tecnologias. Depois da construção do sistema, foram acompanhados três testes de secagem no modelo para validação. Na Figura 36 pode-se observar a realização do processo de secagem para validação do sistema.



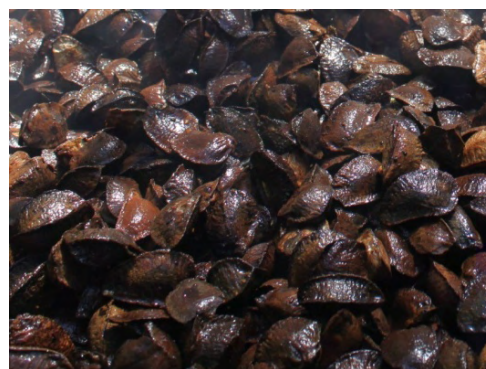
Figura 36 – Teste de validação com o secador proposto.

Vale ressaltar que, devido à escassez de informações sobre a Castanha-do-Brasil, principalmente no que diz respeito à pós-colheita do produto, observações importantes foram feitas durante os experimentos, o que não permitiu a total padronização das condições testadas.

Um fato relevante observado durante a validação do sistema (depois da realização dos testes com o protótipo), é que a castanha possui uma espécie de mucilagem, formada pela água que penetra no fruto e por materiais líquidos e sólidos produzidos pela própria castanha, que dificultam a secagem do produto. Na Figura 37 (a e b) pode-se observar a diferença entre a castanha sem passar pelo processo de lavagem e aquela que passou por este procedimento.



(a)



(b)

Figura 37 – Detalhe da castanha em condições naturais (a) e depois do processo de lavagem (b).

Assim, de forma a aumentar a capacidade de secagem do produto e melhorar sua aparência final, durante os testes de validação, as castanhas foram lavadas em água corrente (leito do rio) e logo depois de sua lavagem, que também permitiu a separação hidráulica das castanhas chochas, estas foram levadas para o secador.

Devido às condições inerentes à realização deste experimento na mata (ausência de energia elétrica e equipamentos), não foi possível a determinação do teor de água inicial e final do produto no momento dos testes, sendo as amostras retiradas, acondicionadas e levadas para estufa, aproximadamente, 24 h depois de sua retirada.

As temperaturas no secador foram obtidas utilizando-se um termômetro digital infravermelho, marca Minipa[®], modelo MT-395. A temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram obtidas por meio de um termohigroanemômetro, o mesmo utilizado nos testes com o protótipo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dimensionamento do secador

Câmara de secagem

A área da câmara de secagem obtida foi de 2 m², sendo constituída por 1 m de largura e 2 m de comprimento.

Trocador de calor

A configuração de trocador escolhida foi a de tubo com seção circular, em escoamento cruzado. Devido à área da câmara de secagem, o trocador de calor foi dimensionado para o comprimento de 2 m, aquela obtida para a câmara de secagem, haja vista que o trocador foi projetado paralelo a esta estrutura.

Na Tabela 4 podem-se observar os parâmetros obtidos para o dimensionamento do trocador de calor.

Tabela 4 – Parâmetros de dimensionamento do trocador de calor

Parâmetro	Valor	Referência
Vazão mássica do ar de secagem	0,9 kg · s ⁻¹	Forson <i>et al.</i> (2007)
Temperatura do ar que entra no secador	25 °C	Condição de projeto
Temperatura do ar que entra na massa de castanha	50 °C	Condição de projeto
Calor específico médio do ar	1007,4 J · kg ⁻¹ · K ⁻¹	Incropera <i>et al.</i> (2008)
Quantidade de energia útil	22.666,5 W	Equação 7
Temperatura na entrada do trocador	650 °C	Condição de projeto
Temperatura na saída do trocador	200 °C	Condição de projeto
Média logarítmica das diferenças de temperatura	344,9 °C	Equação 8
Coeficiente P	0,72	Figura 15
Coeficiente R	0,05	Figura 15
Coeficiente global de transferência de calor	25 W · m ⁻² · °C ⁻¹	Holman <i>et al.</i> (1983)

A partir da análise dos dados apresentados na Tabela 4, pode-se afirmar que o fator de correção para o uso da equação de fluxo contracorrente para fluxo cruzado (F) é igual a 1, conforme Figura 15. Isto se deveu ao fato de a diferença de temperatura do fluido a ser aquecido ser muito pequena, quando comparada à do interior do tubo trocador de calor. Assim, o comportamento do trocador é independente da configuração do fluxo.

Baseando-se nos dados da Tabela 4, a área de troca térmica necessária é de 2,63 m². Considerando-se o comprimento do tubo de 2 m e uma seção circular, o diâmetro do tubo foi de 0,41 m.

Para efeitos da avaliação do trocador de calor calculado, foi determinada sua efetividade teórica. A Tabela 5 encontram-se os parâmetros utilizados.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros utilizados para o cálculo da efetividade do trocador de calor

Parâmetro	Valor	Fonte
Taxa de capacidade calorífica do fluido frio	906,66 W · K ⁻¹	Equação 10
Taxa de capacidade calorífica do fluido quente	50,37 W · K ⁻¹	Equação 11
Taxa de transferência de calor máxima	31.418,25 W	Equação 9

Considerando-se os dados apresentados na tabela 5, a efetividade teórica do trocador de calor foi considerada igual a 0,72.

Fornalha

Câmara de combustão

A partir do resultado da taxa de capacidade calorífica do fluido quente, aplicando-se a Equação 13, determinou-se a vazão mássica do fluido que deve ser conduzida pela fornalha. Considerando-se a efetividade de 0,72, a vazão mássica teórica de ar aquecido a ser utilizado no trocador de calor foi de $0,047 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (Equação 11).

Na Tabela 6 estão mostrados os parâmetros utilizados no cálculo da taxa de consumo de combustível da fornalha.

Tabela 6 – Valores dos parâmetros para a determinação da taxa de consumo de combustível.

Parâmetro	Valor	Fonte
Vazão volumétrica do ar na fornalha	$13,08 \text{ m}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1}$	Equação 13
Calor específico médio do fluido quente	$1075,0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Incropera <i>et al.</i> (2008)
Poder Calorífico Inferior da lenha	$18000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Magalhães (2007)
Eficiência da fornalha	60%	Magalhães (2007)

O consumo teórico de combustível com base nos parâmetros mostrados na tabela 6 foi de $7,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$.

Dessa forma, considerando-se a carga térmica volumétrica de $200 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, o volume da câmara de combustão calculado foi de $0,19 \text{ m}^3$.

Em termos práticos de construção, as dimensões da câmara de combustão foram de $0,70 \text{ m} \times 0,70 \text{ m} \times 0,4 \text{ m}$ (largura \times comprimento \times altura), em formato de bloco retangular.

Grelha

O dimensionamento da grelha foi realizado empregando-se a Equação 16, sendo obtida uma área de grelha de $0,25 \text{ m}^2$.

Para efeitos da construção do secador, foi considerada a composição da grelha por 18 barras de aço CA-60 com 12,7 mm ($\frac{1}{2}$ ") de diâmetro com 0,70 m de comprimento, cada.

Considerando-se que a área total onde a grelha foi instalada é de 0,49 m² (0,70 m \times 0,70 m), obtém-se uma relação entre a superfície livre a superfície total igual a 0,48. Este valor é próximo aos utilizados por Lopes (2002) que obtiveram valores desta relação variando de 0,37 a 0,47 para fornalhas a carvão. Em razão das propriedades dos combustíveis serem muito variáveis, relações teóricas que descrevem estas propriedades não são encontradas com frequência, sendo parâmetros empíricos os mais abordados na literatura.

Câmara plenum

Com base no parâmetro vazão mássica do ar para a secagem de 0,9 kg \cdot s⁻¹ e na área da câmara de secagem de 2 m² obteve-se um fluxo volumétrico de ar de secagem de 23,9 m³ \cdot min⁻¹ \cdot m⁻². A partir desse dado e fazendo-se uma analogia para a perda de carga em uma camada de noz-macadâmia, obteve-se um valor de 15,41 Pa para uma camada de 0,20 m de Castanha-do-Brasil, conforme mostra a figura 38.

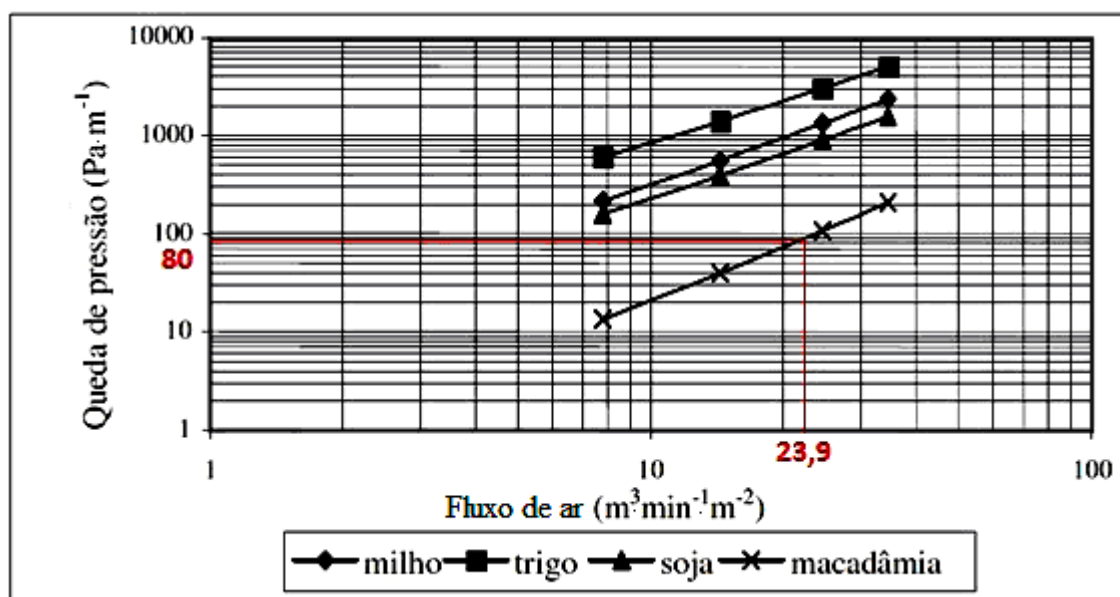


Figura 38 – Perda de carga por metro de coluna de produto, para noz-macadâmia em casca, milho, trigo e soja (Biaggioni *et al.*, 2005).

Com base na Figura 38, determinou-se uma queda de pressão de $80 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ para a camada de Castanha-do-Brasil. Considerando-se que a altura máxima da camada de produto a ser utilizada é de 0,20 m, tem-se uma queda de pressão total (ΔP_t) de 16 Pa.

Assim, aplicando-se a equação 12 obteve-se uma altura da câmara *plenum* de 1,20 m, dividida conforme Figura 39.

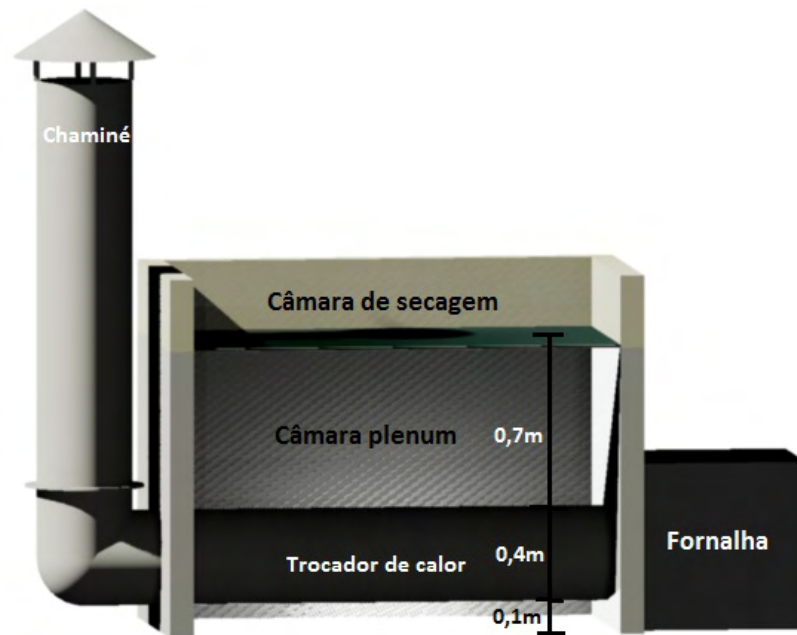


Figura 39 – Detalhe interno da câmara *plenum*: elementos e suas dimensões.

Chaminé

A perda de carga distribuída calculada para o sistema trocador de calor e chaminé conjuntamente foi de 0,06 Pa. Já a perda de carga localizada (curva) foi de 0,18 Pa, totalizando 0,24 Pa.

Dessa forma, aplicando-se a equação 18 para uma altura de chaminé de 2 m, verifica-se que esta configuração permite um fluxo de ar sob uma perda de carga máxima de 13 Pa, superior à calculada.

Testes com o protótipo

Na Tabela 7 estão organizadas as informações gerais sobre os cinco testes realizados com o protótipo, tais como: massa de castanha, teor de água inicial e final e tempo de secagem.

Observa-se que os testes apresentaram grande variabilidade entre si, principalmente no que tange aos teores de água do produto. Conforme discutido, não foi, ainda, desenvolvido um método rápido para a determinação dos teores de água da Castanha-do-Brasil durante o processo de secagem, o que impossibilitou a sua padronização.

Tabela 7 – Resumo das condições de execução dos testes com o protótipo: massa inicial (M_i), Espessura da camada (Esp.), Teor de água inicial (U_i), Teor de água final (U_f), Temperatura do ar na entrada da camada de produto ($T_{ar\ sec}$), Massa de água evaporada (M_{ae}), Tempo de secagem (T_s) e Capacidade de Secagem (C_s)

Teste	M_i (kg)	Esp. (cm)	U_i (% b.u.)	U_f (% b.u.)	$T_{ar\ sec}$ (°C)	M_{ae} (kg)	t_s (horas)	C_s (kg.h ⁻¹)
1	236,50	20	28,50	15,24	36,4	36,99	8,50	27,82
2	174,54	15	29,87	17,82	45,3	25,59	6,25	27,93
3	121,90	10	29,86	22,56	40,5	11,49	6,00	20,32
4	179,06	15	25,92	17,61	35,2	18,06	10,00	17,91
5	118,98	10	26,22	21,99	38,5	6,45	10,00	11,90

Destaca-se também que a Castanha-do-Brasil, diferente de outros produtos agrícolas, possui um tegumento muito rígido e compactado, dificultando muito a remoção da água do produto.

Além das diferenças significativas na espessura e temperatura do ar na camada de produto apresentados na tabela 7, na Tabela 8 estão apresentadas as condições do ar atmosférico durante a execução dos testes, bem como uma análise psicrométrica do aquecimento do ar ao passar pelo trocador de calor

Tabela 8 – Condições do ar ambiente durante a realização dos testes: Temperatura média (T_m) e Umidade Relativa Média (UR_m)

Teste	T_m (°C)	UR_m (%)
1	29,5	63,20
2	26,8	78,90
3	28,4	74,30
4	27,9	77,70
5	26,2	84,90

Com base nos dados apresentados na Tabela 8, verifica-se uma grande redução no potencial de secagem do ar ambiente, com redução de sua temperatura média e aumento da umidade relativa, para os testes que apresentaram maior tempo de secagem e, conseqüentemente, menor capacidade de secagem.

Ressalta-se que, sendo este um secador por convecção natural, as condições do ar ambiente influenciam drasticamente o rendimento do equipamento.

Os dados do perfil da temperatura no secador e do ar ambiente durante os testes podem ser visualizados nas Figuras 40 a 44.

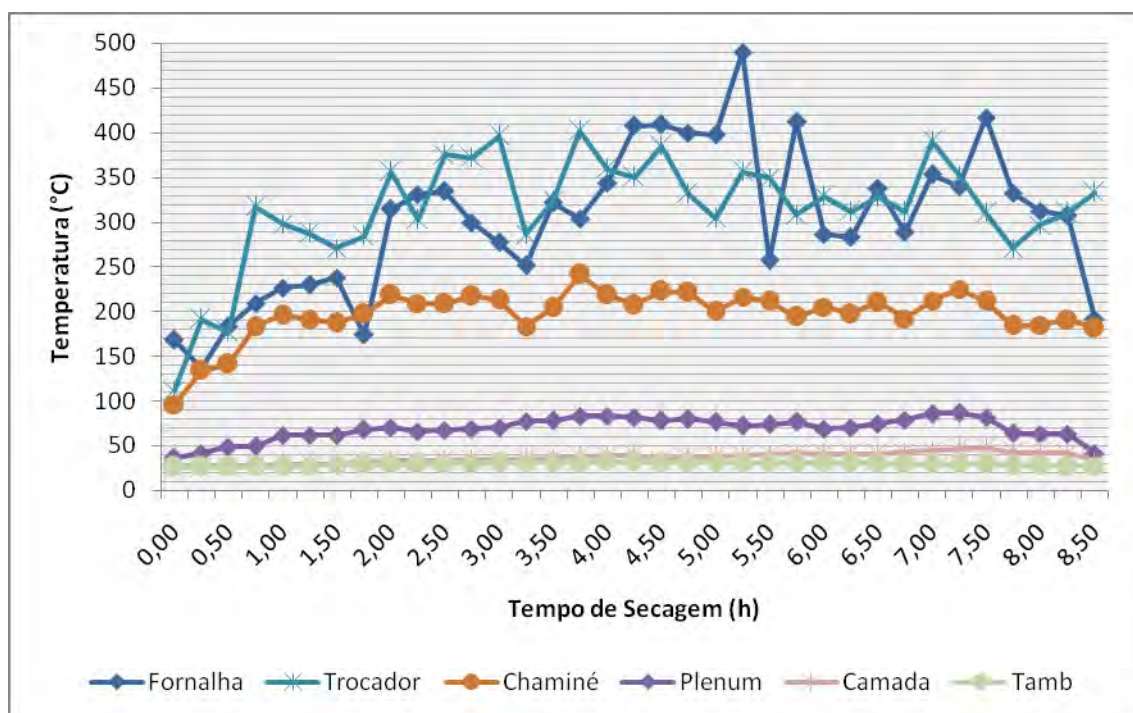


Figura 40 – Perfil de temperatura para o teste 1 com o protótipo.

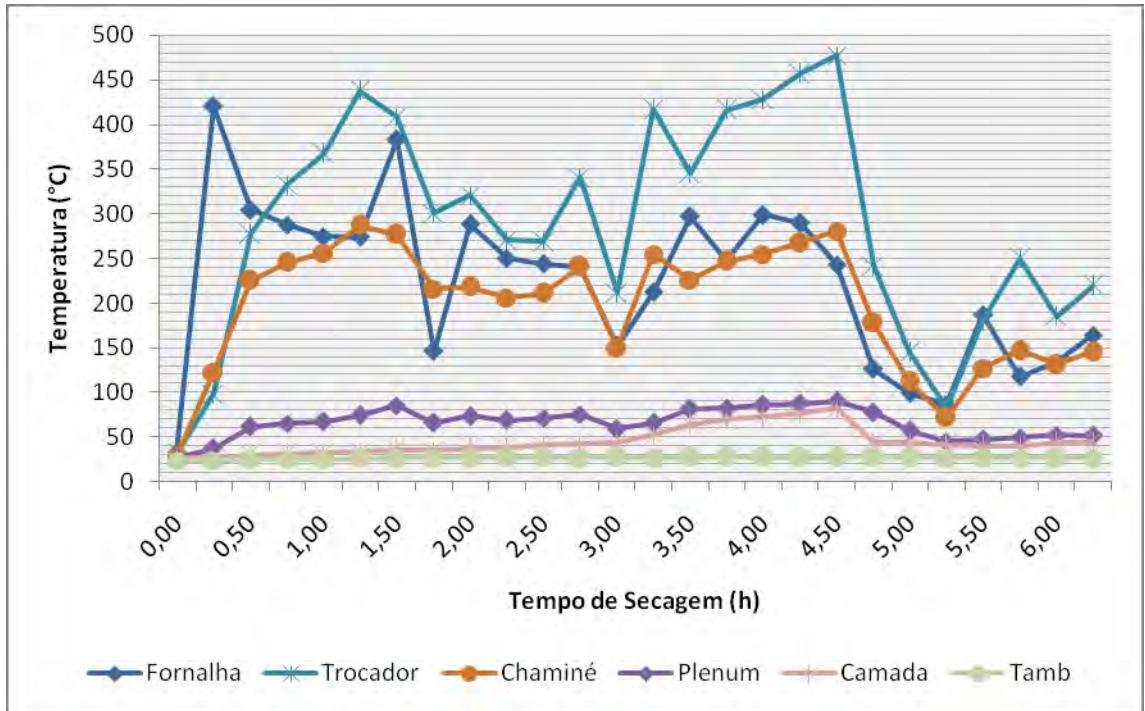


Figura 41 - Perfil de temperatura para o teste 2 com o protótipo.

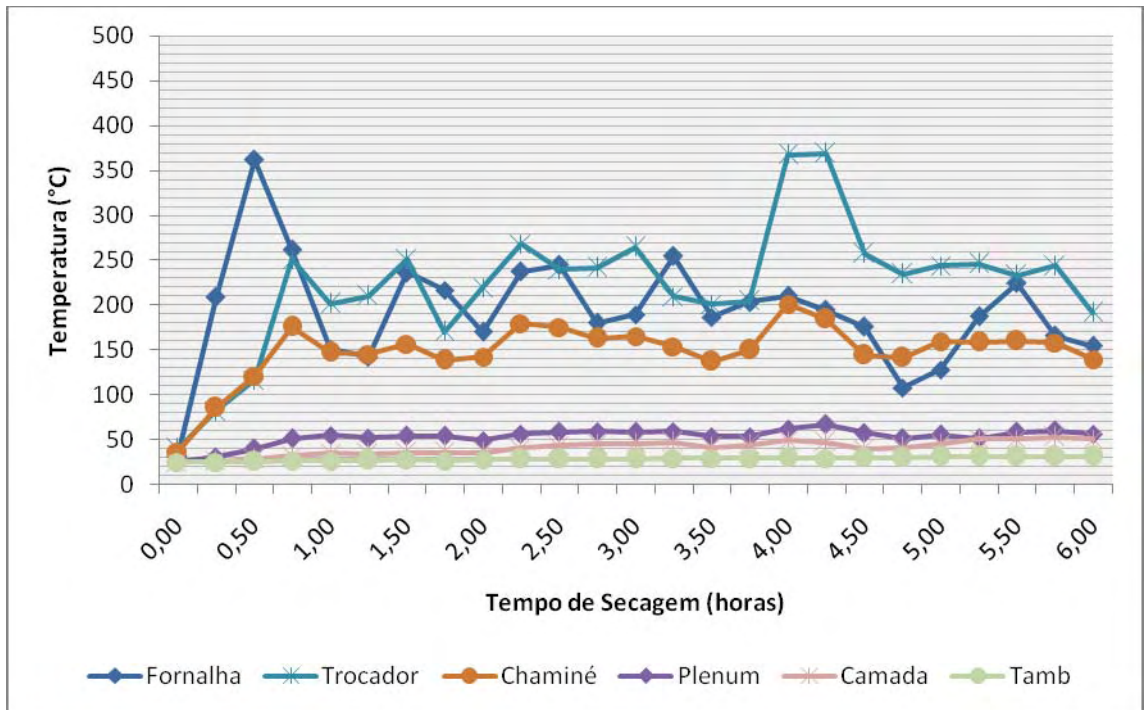


Figura 42 - Perfil de temperatura para o teste 3 com o protótipo.

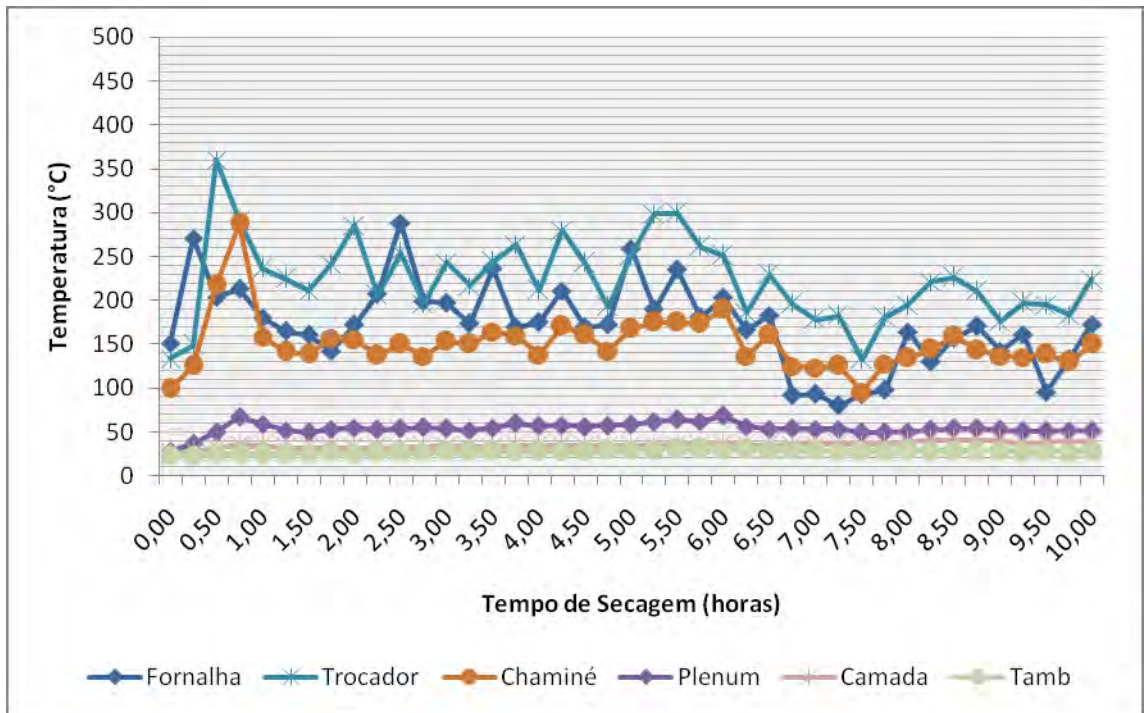


Figura 43 - Perfil de temperatura para o teste 4 com o protótipo.

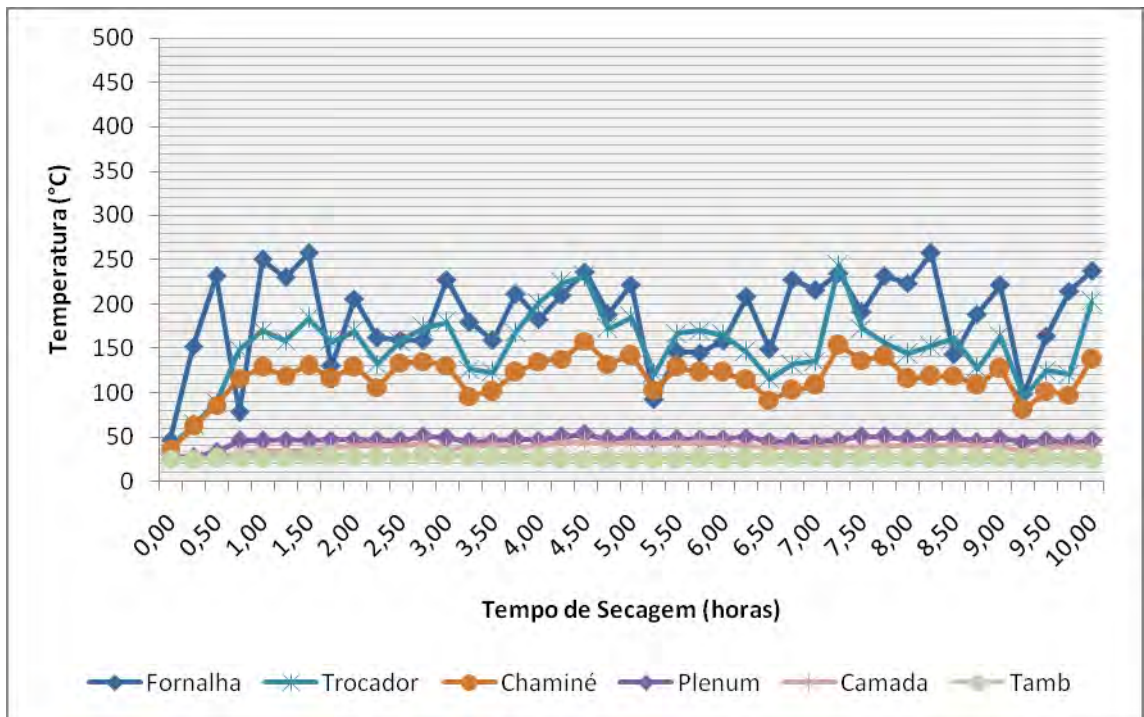


Figura 44 - Perfil de temperatura para o teste 5 com o protótipo – ouriço como combustível.

Com base nas Figuras 40 a 44, observa-se uma grande variação média nas temperaturas da fornalha, sendo este fato explicado pelo uso de

combustível sólido (lenha e ouriço) com alimentação manual, o que provoca uma discrepância na taxa de energia produzida na fornalha.

Observa-se que, nos testes 2 e 3 (Figuras 41 e 42), a temperatura na camada de produtos foi, em alguns momentos, superior à 50°C. Este fato ocasionou perda de qualidade final do produto, ocasionando rachaduras em seu tegumento (Figura 45). Esta observação é importante para trabalhos futuros com a secagem do produto, uma vez que isso pode inviabilizar o uso de algumas tecnologias.



Figura 45 – Rachaduras ocasionadas por elevada temperatura na massa de castanha.

É importante destacar que as temperaturas na fornalha tiveram uma redução do teste 1 para o teste 5, mantendo-se, praticamente, a mesma temperatura na câmara *plenum* e na massa.

Diferentemente dos outros testes com queima de lenha, o teste 5 foi realizado com a queima de ouriço. Neste teste observa-se a manutenção de valores de temperatura câmara *plenum* e na camada mais constantes, em relação aos testes realizados com lenha. Em virtude de sua dinâmica de degradação térmica, o ouriço garante uma combustão mais prolongada e constante em relação à lenha, não havendo também diferenciação entre o poder calorífico do combustível, uma vez que apenas uma espécie foi utilizada. Já para o caso da lenha, foram identificadas, pelo menos, 11 espécies diferentes de madeira na composição da lenha utilizada. Este fato pode ser explicado pela origem da madeira utilizada como lenha ser proveniente de

resíduos da indústria madeireira, logo, não existe homogeneidade nas espécies utilizadas.

Nas Figuras 46 a 50 estão mostradas as curvas de secagem da castanha para os testes de 1 a 5, respectivamente.

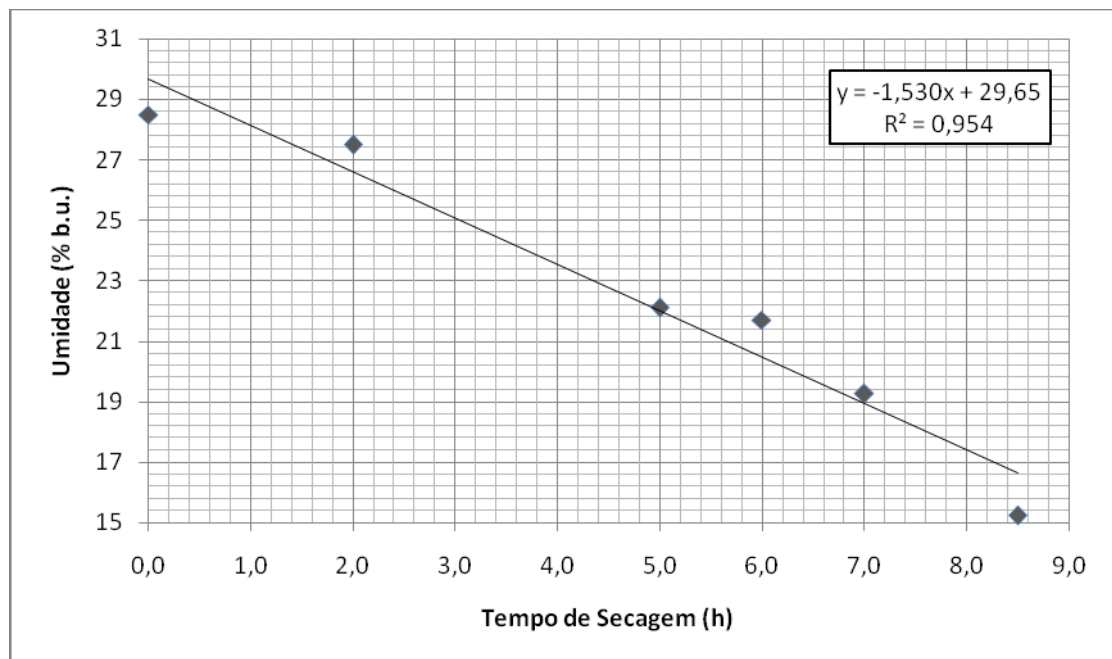


Figura 46 – Curva de secagem da Castanha-do-Brasil para o teste 1.

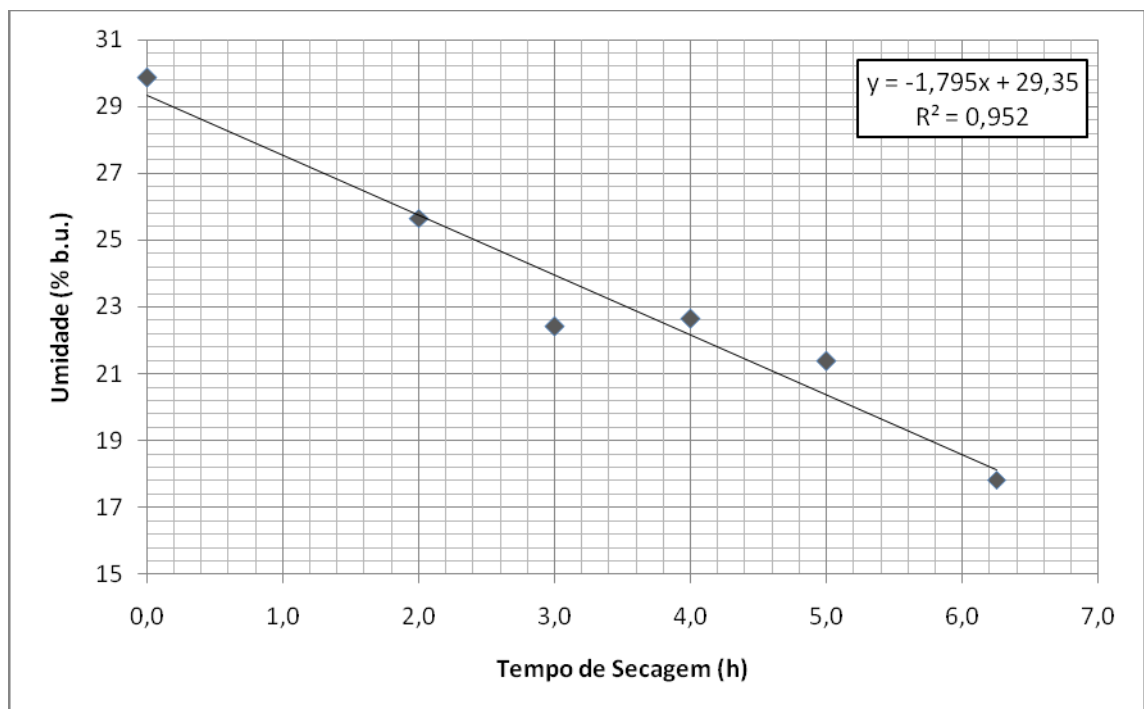


Figura 47 - Curva de secagem da Castanha-do-Brasil para o teste 2.

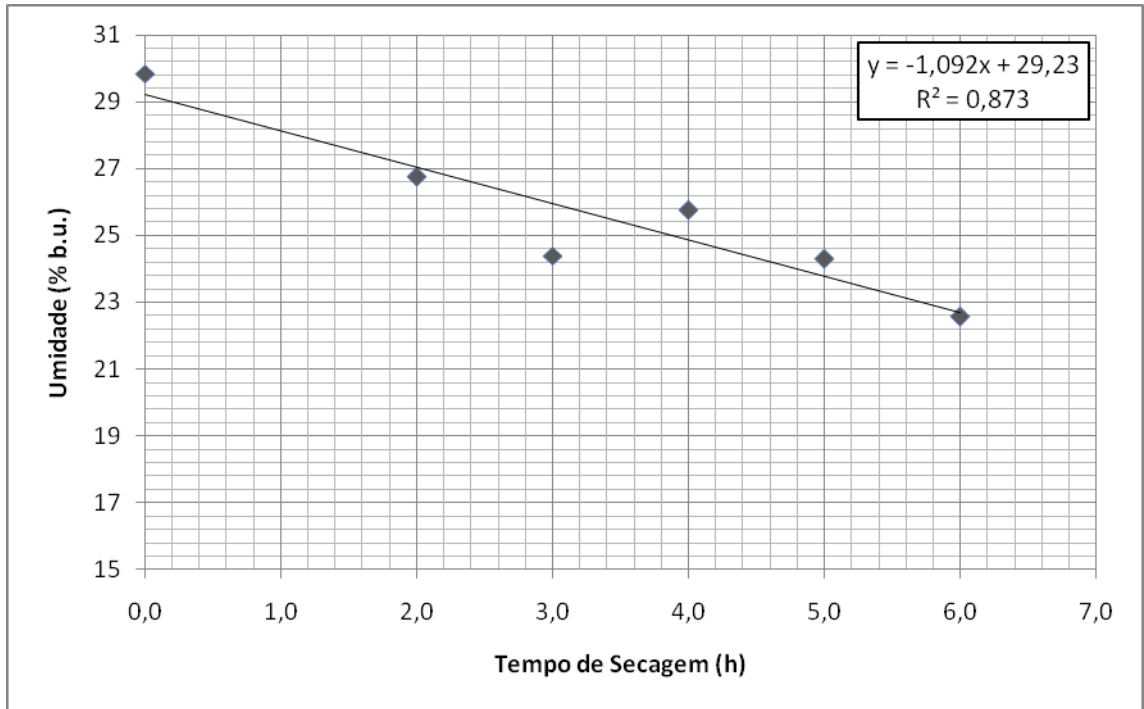


Figura 48 - Curva de secagem da Castanha-do-Brasil para o teste 3.

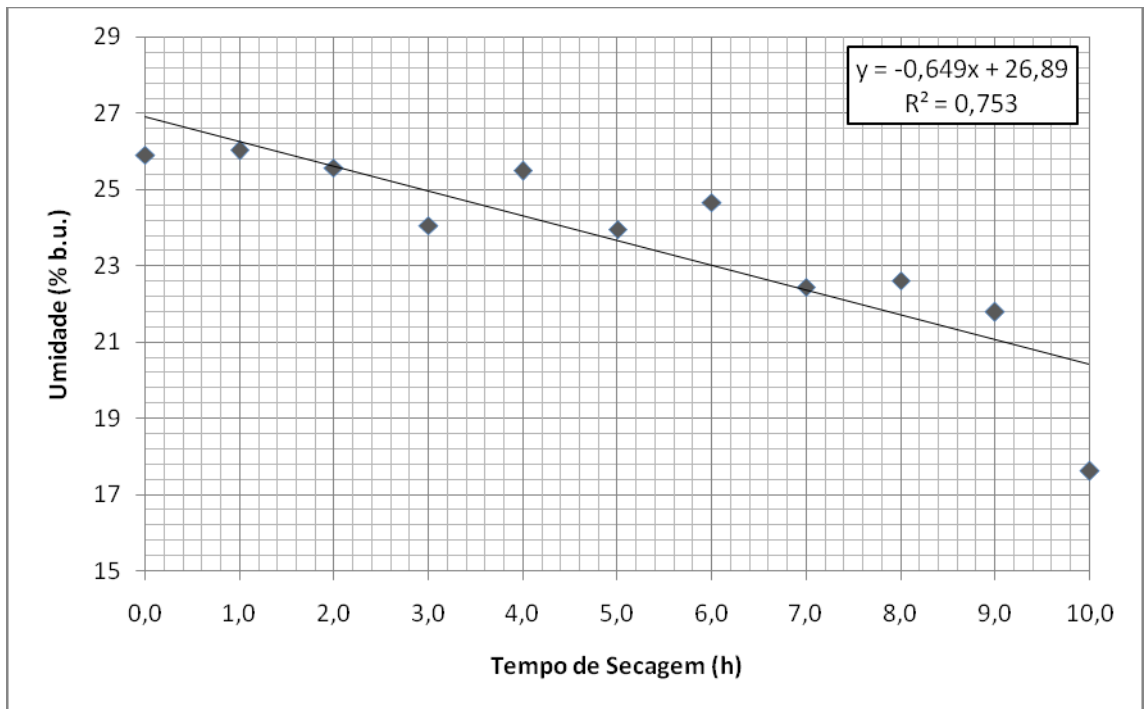


Figura 49 - Curva de secagem da Castanha-do-Brasil para o teste 4.

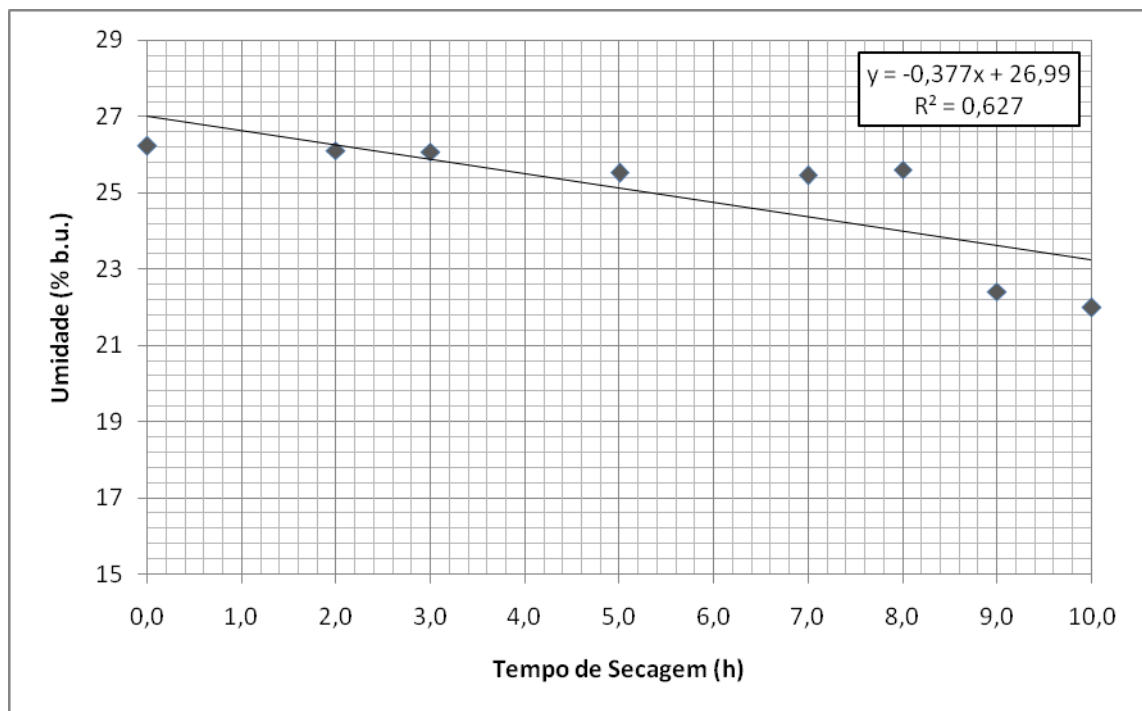


Figura 50 - Curva de secagem da Castanha-do-Brasil para o teste 5.

Com base nas curvas de secagem obtidas, observa-se um comportamento diferenciado da Castanha-do-Brasil quando comparada com outros produtos agrícolas. A partir da hipótese do movimento capilar da água durante a secagem, sabe-se que o processo pode ser dividido em dois períodos: o de taxa de secagem à razão constante e à razão decrescente. Porém, como evidenciado nas curvas de secagem obtidas, estes períodos não são bem definidos na castanha, uma vez que seu tegumento dificulta a migração da água do interior da semente para a sua superfície em contato com o ar de secagem.

Na tentativa de estabelecer um padrão para a secagem nos testes realizados, ajustou-se uma equação linear que traduz a interação entre o teor de água do produto e o tempo decorrido no processo de secagem. Observa-se, porém, que, para os testes 1, 2 e 3, este modelo ajustou-se bem às condições experimentadas, obtendo-se um coeficiente de determinação (R^2) de 0,954, 0,9522 e 0,8732, respectivamente. Já para os testes 4 e 5 tais modelos não apresentaram ajuste relevante para a condição estudada.

Na Tabela 9 encontram-se os dados referentes ao consumo de energia durante os testes de secagem. Para efeitos de determinação da quantidade de

energia consumida, o poder calorífico superior da lenha (amostra composta) foi de $19.609,13 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ e o do ouriço foi de $20.067,42 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tabela 9 – Massa de lenha consumida, energia disponível, tempo de secagem e taxa de consumo de combustível durante os testes com o protótipo

Teste	Massa de lenha (kg)	Energia Disponível (MJ)	Tempo de secagem (h)	Taxa de consumo de combustível ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1	69,90	1.370,68	8,50	8,22
2	62,20	1.219,69	6,25	9,95
3	54,17	1.062,22	6,00	9,02
4	82,70	1.621,68	10,00	8,27
5	70,21	1.408,93	10,00	7,02

Observa-se na Tabela 13 que as taxas de consumo de combustível, para a lenha, variaram de $8,22$ a $9,95 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Já para o teste com ouriço essa taxa foi de $7,02 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Magalhães (2007), trabalhando com fornalha para aquecimento indireto de ar consumindo lenha encontrou valores de consumo de combustível de 5 a $15 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Já Lopes *et al.* (2002), trabalhando com fornalha a carvão para aquecimento direto do ar encontraram um valor de $5,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Vale destacar que a taxa obtida foi próxima ao consumo teórico calculado, de $7,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$.

Na Tabela 10 encontram-se o consumo específico de energia obtido nos testes.

Tabela 10 – Consumo específico de energia (CEE) durante os testes com o protótipo

Teste	Massa de água evaporada (kg)	Energia consumida (kJ)	Consumo específico de energia (kJ·kg ⁻¹)
1	36,99	1.370.680,00	37.055,42
2	25,59	1.219.690,00	47.662,75
3	11,49	1.062.220,00	92.446,35
4	18,06	1.621.680,00	89.794,02
5	6,45	1.408.930,00	218.438,76

Considerando-se os dados apresentados Tabela 14, observa-se que o consumo específico de energia do protótipo construído em aço foi muito elevado, em razão de não possuir qualquer isolamento térmico. Porém, estes valores estão de acordo com os apresentados por Silva (2008), que cita que secadores por convecção natural podem atingir consumos específicos de energia bem maiores que os secadores de fluxo concorrente, contracorrente e cruzado, devido às perdas térmicas que o secador apresenta.

Porém, para o protótipo construído, observa-se que, pelo fato do equipamento não possuir isolamento térmico, o consumo específico de energia foi maior do que o esperado.

Assim, para a caracterização dos efeitos da convecção natural e forçada sobre as perdas de calor do secador e da fornalha para o ar ambiente, na Tabela 11 e 12 estão apresentados os valores da razão entre o número de Grashof e quadrado do número de Reynolds, para os testes executados, bem como os efeitos predominantes, para o secador e para a fornalha, respectivamente.

Tabela 11 – Caracterização do efeito predominante da convecção sobre o secador.

Teste	Gr_L	Re_L	$\frac{Gr_L}{(Re_L)^2}$	Efeito predominante
1	$2,923 \times 10^{10}$	$3,40 \times 10^5$	0,25	Convecção Forçada
2	$3,020 \times 10^{10}$	$3,15 \times 10^5$	0,30	Convecção Forçada
3	$2,057 \times 10^{10}$	$2,64 \times 10^5$	0,29	Convecção Forçada
4	$2,188 \times 10^{10}$	$5,03 \times 10^5$	8,63	Convecção Natural
5	$1,780 \times 10^{10}$	$1,23 \times 10^5$	1,17	Convecção Mista

Tabela 12 - Caracterização do efeito predominante da convecção sobre a fornalha

Teste	Gr_L	Re_L	$\frac{Gr_L}{(Re_L)^2}$	Efeito predominante
1	$5,06 \times 10^{10}$	$3,40 \times 10^5$	0,26	Convecção Forçada
2	$5,55 \times 10^{10}$	$3,15 \times 10^5$	0,48	Convecção Forçada
3	$5,55 \times 10^{10}$	$2,64 \times 10^5$	0,79	Convecção Forçada
4	$5,52 \times 10^{10}$	$5,03 \times 10^4$	21,78	Convecção Natural
5	$5,69 \times 10^{10}$	$1,23 \times 10^5$	3,74	Convecção Natural

Considerando-se os efeitos predominantes, nas Tabelas 13 e 14 estão apresentados os valores dos parâmetros para a estimativa das perdas no secador e na fornalha, relativas à convecção com o meio externo, considerando-se o efeito predominante na determinação do número de Nusselt.

Tabela 13 – Parâmetros para a estimativa da perda relativa à convecção das paredes do secador com o meio externo: Número de Grashof (Gr_L); Número de Rayleigh (Ra_L); Número de Reynolds (Re_L); Número de Nusselt (Nu_L); Coeficiente de convecção (h) e; Taxa de transferência de calor por convecção do secador ($q'_{conv,s}$)

Teste	Gr_L	Ra_L	Re_L	Nu_L	h ($J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	$q'_{conv,s}$ ($J \cdot s^{-1}$)
1	N/A	N/A	$3,40 \times 10^5$	344,35	4,81	1.364,64
2	N/A	N/A	$3,15 \times 10^5$	331,35	4,59	1.293,42
3	N/A	N/A	$2,64 \times 10^5$	303,89	4,15	731,84
4	$2,18 \times 10^{10}$	$1,54 \times 10^{10}$	N/A	391,89	5,36	1.010,43
5	$1,78 \times 10^{10}$	$1,26 \times 10^{10}$	$1,23 \times 10^5$	387,61	5,23	745,24

N/A: Não se aplica.

Tabela 14 - Parâmetros para a estimativa da perda relativa à convecção das paredes da fornalha com o meio externo: Número de Grashof (Gr_L); Número de Rayleigh (Ra_L); Número de Reynolds (Re_L); Número de Nusselt (Nu_L); Coeficiente de convecção (h) e; Taxa de transferência de calor por convecção da fornalha ($q'_{conv,f}$)

Teste	Gr_L	Ra_L	Re_L	Nu_L	h ($J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	$q'_{conv,f}$ ($J \cdot s^{-1}$)
1	N/A	N/A	$3,40 \times 10^5$	341,72	6,24	3.328,38
2	N/A	N/A	$3,15 \times 10^5$	329,14	5,56	2.141,21
3	N/A	N/A	$2,64 \times 10^5$	302,38	4,92	1.585,76
4	$5,52 \times 10^{10}$	$3,84 \times 10^{10}$	N/A	527,23	8,37	2.367,22
5	$5,69 \times 10^{10}$	$3,95 \times 10^{10}$	N/A	532,43	8,57	2.687,39

N/A: Não se aplica.

Com base nos dados apresentados nas Tabelas 13 e 14, observa-se que os valores do coeficiente de convecção obtidos para a convecção natural estão coerentes para a situação analisada. Incropera *et al.* (2008) citam valores de h entre 2 e $25 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ para a convecção natural de gases. Já para a convecção forçada, os valores estão abaixo daqueles citados pelos mesmos autores.

Ressalta-se, ainda, que as perdas por convecção na fornalha foram, significativamente, maiores que as perdas por convecção no secador, o que pode ser explicado pela maior diferença de temperatura entre a superfície e o fluido.

Na Tabela 15 estão contidos os valores dos parâmetros para a estimativa das perdas por radiação da superfície do secador para o meio externo. Na Tabela 16 encontram-se os dados de perda por radiação entre a superfície da fornalha e a sua vizinhança.

Tabela 15 - Parâmetros para a estimativa da perda relativa à radiação do secador para o meio externo: Emissividade (ϵ); Temperatura da superfície (T_s); Temperatura do fluido externo (T_f); Taxa de transferência de calor por radiação do secador ($q'_{rad,s}$)

Teste	Emissividade	T_s (K)	T_f (K)	$q'_{rad,s}$ ($J \cdot s^{-1}$)
1	0,95	342,05	302,65	2.054,93
2	0,95	339,05	299,95	1.985,69
3	0,95	326,05	301,55	1.176,21
4	0,95	327,25	301,05	1.262,31
5	0,95	319,15	299,35	909,37

Tabela 16 - Parâmetros para a estimativa da perda relativa à radiação da fornalha para o meio externo: Emissividade (ϵ); Temperatura da superfície (T_s); Temperatura do fluido externo (T_f); Taxa de transferência de calor por radiação da fornalha ($q'_{rad,f}$)

Teste	Emissividade	T_s (K)	T_f (K)	$q'_{rad,f}$ ($J \cdot s^{-1}$)
1	0,95	445,45	302,65	12.015,98
2	0,95	462,55	299,95	14.613,77
3	0,95	465,95	301,55	15.074,02
4	0,95	445,35	301,05	12.070,53
5	0,95	459,25	299,35	14.137,59

Considerando-se os dados apresentados nas Tabelas 15 e 16, ressalta-se a grande diferença entre as taxas de transferência de calor calculadas para o secador e para a fornalha. Isto pode ser explicado pelo fato de o efeito da diferença entre as temperaturas da superfície e da sua vizinhança ser elevada à quarta potência no cálculo da taxa de transferência. Assim, como já era esperado, a diferença entre a temperatura da fornalha e do ar é muito maior que a diferença entre a temperatura da parede do secador e do ar ambiente.

Resumindo tais informações, na Tabela 17 estão apresentadas as taxas de transferência de calor por convecção, obtidas para os testes com o protótipo, bem como a perda de calor considerada para o tempo de secagem.

Tabela 17 – Perda de calor por convecção para o secador e fornalha

Teste	Tempo de Secagem (h)	$q'_{conv,s}$ ($J \cdot s^{-1}$)	$q'_{conv,f}$ ($J \cdot s^{-1}$)	$q'_{conv,t}$ ($J \cdot s^{-1}$)	Perda de calor por convecção (kJ)
1	8,50	1.364,64	3.328,38	4.693,02	143.606,41
2	6,25	1.293,42	2.141,21	3.434,63	77.279,17
3	6,00	731,84	1.585,76	2.317,60	50.060,16
4	10,00	1.010,43	2.367,22	3.377,65	121.595,40
5	10,00	745,24	2.687,39	3.432,63	123.574,68

Com base nos dados apresentados na Tabela 17, observam-se valores elevados de perda de calor por convecção, principalmente quando se analisa as perdas na fornalha.

Na Tabela 18 estão apresentados os valores de taxas de transferência de calor por radiação, para o secador e para a fornalha, assim como a perda de calor por radiação total para cada teste.

Tabela 18 - Perda de calor por radiação para o secador e fornalha

Teste	Tempo de Secagem (h)	$q'_{rad,s}$ ($J \cdot s^{-1}$)	$q'_{rad,f}$ ($J \cdot s^{-1}$)	$q'_{rad,t}$ ($J \cdot s^{-1}$)	Perda de calor por radiação (kJ)
1	8,50	2.054,93	12.015,98	28.432,73	430.569,85
2	6,25	1.985,69	14.613,77	22.385,55	373.487,85
3	6,00	1.176,21	15.074,02	16.250,23	351.004,97
4	10,00	1.262,31	12.070,53	13.332,84	479.982,24
5	10,00	909,37	14.137,59	15.046,96	541.690,56

Com base nos valores da Tabela 18 pode-se observar que as perdas de calor por radiação são expressivas, sendo aquelas obtidas para a fornalha maiores que as obtidas para o secador, conforme esperado, devido à maior diferença de temperatura.

Na Tabela 19 apresenta-se um resumo das perdas de calor, bem como sua representatividade nas perdas totais.

Tabela 19 – Resumo das perdas de calor no secador e na fornalha

Teste	Perda de calor por convecção (kJ)	Perda de calor por radiação (kJ)	Perda de calor total	
			(kJ)	(%)
1	143.606,41	430.569,85	574.176,26	41,89
2	77.279,17	373.487,85	450.767,03	36,96
3	50.060,16	351.004,97	401.065,13	37,76
4	121.595,40	479.982,24	601.577,64	37,10
5	123.574,68	541.690,56	665.265,24	47,22

Observa-se que na Tabela 19 que grande parte da energia consumida na forma de combustível na fornalha foi perdida na forma de calor para o ambiente, quer seja por convecção, quer seja por radiação.

Na Figura 50 encontram-se o consumo específico de energia, desconsiderando-se as perdas, e os valores reais obtidos.

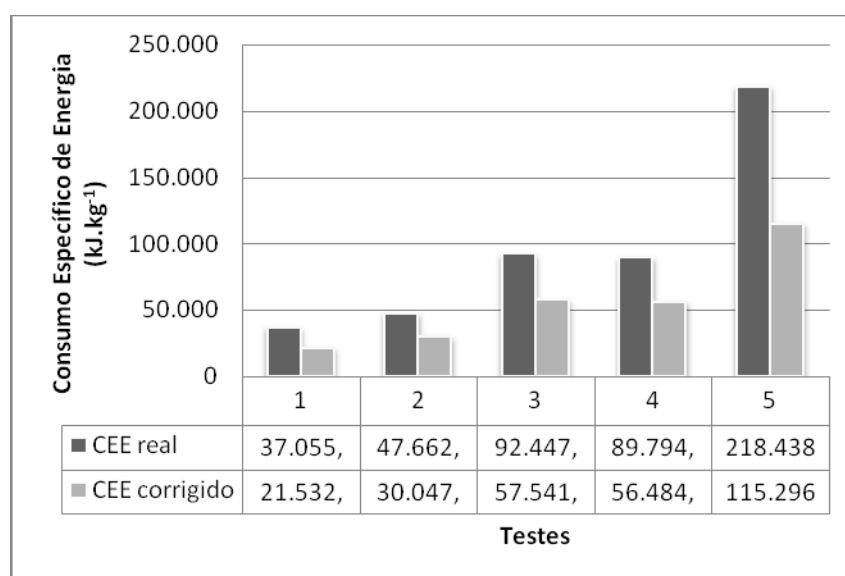


Figura 51 - Comparação entre o consumo específico de energia real e o consumo específico corrigido desconsiderando-se as perdas.

Com base na Figura 50, é possível inferir que o secador obteria consumos específicos de energia próximos aos descritos na literatura para esses modelos nos testes 1 a 4. Já no teste 5, o consumo ficou acima do esperado, o que pode ser explicado pelo fato de o produto utilizado neste teste possuir uma grande quantidade de mucilagem, dificultando sua secagem.

A eficiência do processo de secagem, considerando-se o consumo específico de energia real e o consumo específico de energia corrigido devido às perdas, pode ser observada na Tabela 20.

Tabela 20 – Eficiência da secagem para o consumo específico de energia real e corrigido

Teste	η_{real} (%)	η_{corr} (%)
1	6,75	11,61
2	5,25	8,32
3	2,70	4,34
4	2,78	4,43
5	1,14	2,17

Pelos dados apresentados na Tabela 20, observa-se a baixa eficiência energética do secador proposto, típico de sua configuração. Observa-se, ainda, que sua eficiência poderia ser aumentada caso o protótipo fosse isolado termicamente.

Testes de validação do secador

Os resultados obtidos durante os testes de validação com o secador construído em condições reais de uso podem ser visualizados na Tabela 21.

Tabela 21 – Condições de secagem para validação do secador

Teste	Massa produto (kg)	U_i (% b.u.)	U_f (% b.u.)	T_s (h)
1	136	23,2	16,6	8,00
2	109	21,5	15,4	6,25
3	82	22,9	9,2	4,50

É possível observar na Tabela 21 que o volume de castanha durante os testes foi variável, partindo de 9 latas até 17. Ressalta-se ainda que os teores de água finais durante os experimentos foram variáveis, devido à dificuldade

em se conhecer o teor de água final de maneira rápida, principalmente, dentro da floresta.

Destaca-se também que o último teste foi realizado com a castanha lavada, ou seja, com a mucilagem removida do tegumento. Isto facilitou muito a secagem do produto.

Na Tabela 22 estão apresentados os dados de temperatura obtidos durante os testes.

Tabela 22 – Condições energéticas durante os testes de validação com o secador utilizando ouriço como combustível

Teste	Massa de combustível (kg)	T _{camada} (°C)	T _{fornalha} (°C)
1	48	61,0	401,0
2	37	52,3	429,0
3	32	45,2	465,0

Considerando-se o consumo de combustível obtido para os testes com o protótipo, observa-se que o consumo de combustível no secador de aço foi, aproximadamente, duas vezes o consumo no secador de alvenaria. Assim, para testes futuros com protótipo construído em aço, este receberá isolamento de modo a obter dados mais próximos à realidade de uso.

Ao final dos testes de validação em condições de campo, observou-se que as condições de secagem obtidas com o teste número 3 produziram um produto de melhor qualidade ao final do processo, podendo ser observada visualmente na Figura 51.



Figura 52 – Aspecto visual da castanha obtida no teste 3.

Ressalta-se, ainda, que o custo de instalação do secador construído foi R\$ 380,00, valor compatível com a renda dos extrativistas de castanha.

Além do aspecto financeiro, observou-se que o secador possui uma boa adaptabilidade à rotina de coleta da castanha na mata, sabendo-se que o produto colhido durante o dia pode ser secado no período da noite, com a castanha com teor de água reduzido para seu armazenamento temporário seguro, evitando a proliferação de fungos produtores de aflatoxina.

Finalmente, destaca-se a demanda dos extrativistas que instalaram o equipamento em suas áreas de coleta de castanha para o aumento na capacidade de secagem do equipamento, adaptando-o a secar um volume de 30 latas de uma vez (aproximadamente 270 kg), o mais adequado para a secagem da produção diária. Assim, ao final deste trabalho, estudos devem ser realizados no sentido de viabilizar um equipamento de maior capacidade diária.

CONCLUSÕES

Com base nos dados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- As dimensões propostas para o secador atende à demanda diária do produto.
- O protótipo construído atingiu as expectativas de processamento da Castanha-do-Brasil.
- O consumo específico de energia do secador foi elevado por causa da ausência de isolamento térmico, entretanto, quando o secador foi construído em alvenaria;
- Depois da validação, pôde-se concluir que o equipamento está adaptado à realidade de produção da Castanha-do-Brasil e que possui grande potencial de utilização.
- Considerando-se a redução observada no teor de água das castanhas, o secador proposto tem potencial para reduzir o crescimento de fungos produtores de aflatoxina na Castanha-do-Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVARES, V. S. **Princípios para o Manejo Pós-Colheita da Castanha-do-Brasil**. Rio Branco-AC : EMBRAPA, 2009.

APIZ – Associação do Povo Indígena Zoró. **Boas Práticas de Coleta, Armazenamento e Comercialização da Castanha-do-Brasil**. Defanti Editora. 2008.

ANDRADE, E. B.; SASSERON, J. L.; OLIVEIRA FILHO, D. **Princípios sobre combustíveis, combustão e fornalhas**. Viçosa: CENTREINAR, 1984.

AOAC. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of AOAC**. 18. ed. Washington: AOAC, 2008.

BIAGGIONI, M. A. M., PIZA, P. L. B. T., FERREIRA, W. A.. **Queda de pressão estática por meio de uma coluna de noz macadâmia**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.2, p.499-507. 2005.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage of grains and oilseeds**. New York, The AVI Publishing Company, 450p. 1992.

CAMARGO, I. P.; CASTRO, E. M; GAVILANES, M. L. **Aspectos da Anatomia e Morfologia de Amêndoas e Plântulas de Castanheira-do-Brasil**. Cerne. V 6, N 2, p 11-18. 2000.

CHURCHILL, S. W.; CHU, H. H. S. **Correlating Equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate**. Int J. Heat Mass Transfer 18:1323–1329. 1975.

FORSON, F. K. NAZHA, M. A. A; AKUFFO, F. O.; RAJAKARUNA, H. **Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb**. Renewable Energy, 32, 2306–2319. 2007.

FOX, R. W; PRITCHARD, P. J.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Ed LTC. 7ª Ed. 2010.

HOLMAN, J. P. **Transferência de calor**. São Paulo – SP. Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1983.

INCROPERA, F. P. DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª. ed. [S.l.]: LTC Editora, 2008.

KOYUNCU, M. A.; KOYUNCU, F. E.; BAKIR, N. **Selected Drying Conditions and Storage Period and Quality of Walnut Selections** . Journal of Food Processing Preservation. 27, 2003.

LOPES, R. P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor como uma opção para aquecimento direto e indireto do ar**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa (Tese de doutorado). 2002.

LOPES, R. P.; SILVA, J. S.; MAGALHÃES, E. A.; SILVA, J. N. **Energia no Pré-processamento de produtos agrícolas**. In: Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas. Viçosa. Ed. Aprenda Fácil. 560p. 2008.

MAGALHÃES, E. A. **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa (Tese de doutorado). 2007.

MELO, F. A. O. **Projeto, construção e avaliação de uma fornalha para aquecimento de ar utilizando combustíveis particulados finos**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa (Dissertação de mestrado). 2003.

MURSALIM, S.; DEWI, Y. S. **Drying of Cashew Nut in Shell Using Solar Dryer**. Science and Technology. N. 3, Vol. 2 pag 25-33. 2002.

NEJAD, M. K.; TABIL, L. G.; MORTAZAVI, A.; KORDI, A. S.; NAKAHEI, M.; NIKKHO, M. **Effect of Drying Methods on Quality of Pistachio Nuts**. Saskatoon, Saskatchewan, CANADA : ASAE/CSAE North-Central Intersectional Meeting. MBSK 02-213 2002.

OLIVEIRA, J. M. C.; LOBO, P. C.. **Avaliação do potencial energético de resíduos de biomassa Amazônica**. Anais do 4º Encontro de Energia no Meio Rural. 2002.

OLIVEIRA, V. H.; ANDRADE, A. P. S. E.; PAIVA, F. F. A. **Colheita e Pós-Colheita de Castanha de Cajueiro-Anão Precoce na Produção Integrada de Frutas**. Fortaleza-CE : EMBRAPA-CNPAT. Circular Técnica 18. 2004.

PIAGENTINI, A.; PIZA, J. T. **Manual de Orientação Técnica para Beneficiamento de Macadâmia**. Espírito Santo do Pinhal - SP : PINHALENSE - Máquinas Agrícolas, 2007.

PRICHAVUDHI, K.; YAMAMOTO, H. Y. **Effect of Drying Temperature on Chemical Composition and Quality of Macadamia Nuts**. s.l.: CMS Yearbook, 1987.

SANTOS, J. U. M.; BASTOS, M. N. C.; GURGEL, E. S. C.; CARVALHO, A. C. M. **Bertholletia excelsa Humboldt & Bonpland (Lecythidaceae): aspectos morfológicos do fruto, da semente e da plântula**. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais, Belém, PA, v. 1, n. 2, 2006.

SILVA, J.S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa, MG. UFV. 2008.

SILVA, F.A.; MARSAIOLI Jr., A. **Aspecto Econômico de um Processo de Secagem de Amêndoas de Castanha do Brasil (Bertolletia Excelsa) Assistida a Microondas**. Revista Ciências Exatas e Naturais. N 5 Vol. 2, Jul/Dez 2003.

SILVA, J. S.; GOMES, R. A. R.; HARA, T. **Estudo de uma fornalha para secagem de grãos com aquecimento direto**. Engenharia na Agricultura. Série Armazenamento. Viçosa, MG, v.1. n.2, 1991.

SIMÕES, A. V. Impactos de Tecnologias Alternativas e do Manejo da Castanha-do-Brasil (*Bertolletia excelsa*, HUMB. & BONPL., 1908) no Controle da Contaminação por Aflatoxinas em Sua Cadeia Produtiva. Manaus : Universidade Federal do Amazonas (Dissertação de mestrado). 2004.

- CAPÍTULO 3 -
PRODUÇÃO DE CARVÃO A PARTIR DO OURIÇO DA
CASTANHA-DO-BRASIL

INTRODUÇÃO

O extrativismo constitui a base da economia dos povos que vivem na floresta Amazônica, sendo a coleta de Castanha-do-Brasil uma das atividades de maior importância econômica na região.

Este modelo econômico é sazonal, sendo a renda obtida somente durante o período de safra. Durante a entressafra a renda das famílias que dependem desta atividade é bastante reduzida, sendo então necessária uma atividade alternativa que remunere o trabalhador.

O modelo de coleta da castanha é bastante diferenciado na região amazônica. Por exemplo, no estado do Acre, as famílias que dependem dessa atividade, residem na área de coleta. Na entressafra da castanha, a família do “colhedor de castanha” sobrevive com a obtenção de outros produtos da floresta, como a andiroba, a copaíba, o açaí, dentre outros. Na região norte do estado de Mato Grosso, os extrativistas de castanha possuem residência nos centros urbanos e a atividade de coleta é realizada mediante um contrato de arrendamento dos castanhais, assim, na entressafra da castanha, os extrativistas trabalham como pedreiro, servente, vendedor, pintor, dentre outras profissões de pouca remuneração e, muitas vezes, sem contrato de trabalho.

Dessa forma, outra possibilidade para aumentar a renda para o período de entressafra da castanha é a agregação de valor aos subprodutos gerados, como o ouriço (fruto da castanha), por exemplo.

Durante a coleta da castanha, o ouriço é deixado na mata devido a não possuir valor agregado e ser uma grande carga a ser levada para a residência do coletor. Oliveira e Lobo (2002) citam que o fruto da Castanha-do-Brasil tem, em média, 2,4 kg de massa, e que, aproximadamente, 1/3 de sua massa é constituído pelas sementes. Logo, para cada fruto coletado, tem-se, em média, 1,6 kg de resíduo, ou ainda, para cada 1 kg de castanha coletada, tem-se a geração de 2 kg de ouriço, que pode ser aproveitado.

A produção de castanhas no ano de 2009 foi de 37.467 toneladas, sendo o estado do Amazonas responsável por 42,74% desta produção, seguido pelo estado do Acre, com 27,53% da produção nacional. Em seguida vem o estado do Pará (18,72%), de Rondônia (5,62%), de Mato Grosso (4,07%), do Amapá (1,04%) e de Roraima (0,28%) (IBGE, 2010).

Com base nesses dados, foram deixadas na mata 74.934 t de ouriço, que poderiam servir como fonte de renda para a população envolvida com a coleta e beneficiamento da castanha. Oliveira e Lobo (2002) estudaram o potencial para o uso energético do ouriço da Castanha-do-Brasil e obtiveram um valor de poder calorífico superior (PCS) de $19.769 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Quirino *et al.* (2004) estudaram o poder calorífico superior de 258 espécies de madeira e de 18 tipos de resíduos lignocelulósicos e encontraram valor médio de poder calorífico superior de $19.721 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ para as espécies florestais e de $18.941 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ para os resíduos lignocelulósicos. Assim, verifica-se o potencial do ouriço para o uso como fonte de energia.

Atualmente, o ouriço da castanha já vem sendo utilizado pelas comunidades tradicionais como fonte de calor a partir da combustão, principalmente para cocção. Porém, o seu uso ainda está muito aquém do seu potencial, sendo o volume aproveitado irrisório perante o total produzido.

Um processo com potencial para agregar valor ao ouriço da Castanha-do-Brasil é a carbonização ou pirólise, que é um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas relativamente baixas (500 a 800 °C) em atmosfera não oxidante, dando lugar à formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (líquido pirolenhoso). As proporções destes compostos dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características do material a ser tratado (BEENACKERS; BRIDGEWATER, 1989).

O processo de pirólise consiste em um conjunto de reações químicas complexas acompanhadas de processos de transferência de calor e massa. A composição heterogênea das frações produzidas e as possíveis interações entre si tornam ainda mais complexo o processo. As reações que incidem diretamente sobre o substrato celulósico são denominadas reações primárias e aquelas que incidem na decomposição dos produtos intermediários, tais como vapores orgânicos, são denominadas reações secundárias. Estas reações ocorrem durante a degradação dos principais componentes da biomassa: a hemicelulose, celulose e lignina (PINHEIRO *et al.*, 2001).

Moura & Nascimento (2007) estudaram a produção de carvão, a partir do ouriço da Castanha-do-Brasil, e afirmam que este é um insumo energético

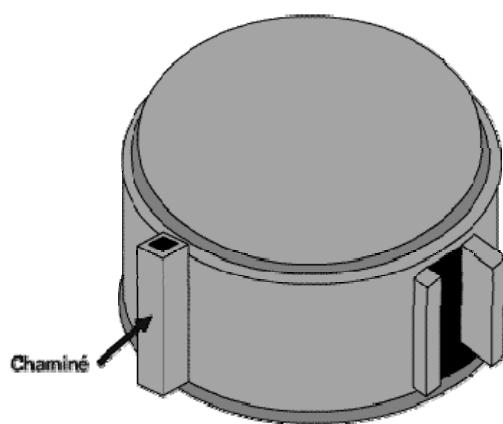
viável, além de possuir potencial econômico atrativo, podendo ser transformado em um fator de inclusão social, desenvolvimento regional e de fixação do homem no campo.

O carvão produzido a partir do ouriço da castanha possui elevada massa específica ($838,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) quando comparada com madeiras tradicionalmente usadas para fins energéticos. Por exemplo, a massa específica do *Eucaliptus grandis*, do *Eucaliptus saligna* e da *Acacia mangiun* foram de $391 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $476 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $596,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente. Com relação à densidade energética, o resíduo do fruto da castanha apresentou valor de $15.169 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, enquanto os outros exemplares apresentaram valores menores, sendo o de *Eucaliptus grandis* de $7.848 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$; *Eucaliptus saligna* de $9.751 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ e *Acacia mangiun* de $12.019 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente (MOURA; NASCIMENTO, 2007).

Como a pirólise é uma reação que acontece somente sob uma atmosfera aquecida e reduzida, são necessários equipamentos especiais chamados reatores ou fornos de carbonização para garantir as condições ideais do processo (LÓPEZ; SILVA, 1998).

Dentre tais equipamentos, destacam-se os fornos de superfície (Figura 1), utilizados na produção de carvão para a indústria siderúrgica. São fornos de aquecimento interno, fixos e que trabalham por cargas, construídos de tijolos comuns, possuem formato cilíndrico e são fechados no topo por uma abóbada também de tijolos, funcionando em agrupamentos denominados “baterias”.

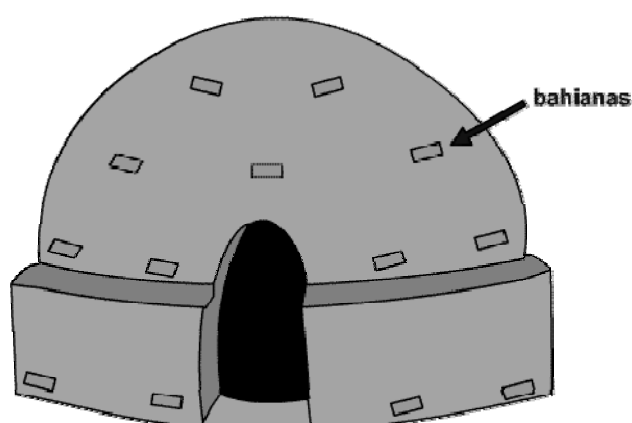
Nesses fornos não se consegue o controle rigoroso dos parâmetros da carbonização. A energia necessária para o processo é obtida por meio da combustão de parte do material a ser carbonizado, ocorrendo uma perda total dos materiais voláteis que são liberados para a atmosfera.



Fonte: CETEC (1982).

Figura 1 - Forno de superfície.

Outro equipamento com destaque são os fornos “rabo-quente” (Figura 2), que são mais baratos, de construção mais simples e, possivelmente, os mais difundidos dos fornos de carbonização de carga, porém são recomendados apenas para locais planos.



Fonte: CETEC (1982).

Figura 2 - Forno rabo-quente.

O forno “rabo quente” é construído utilizando-se apenas tijolos de barro cozido e argamassa de barro e areia. A operação do forno compreende o seu carregamento, isto é, a colocação da lenha em seu interior, a carbonização e a descarga do carvão produzido. A utilização de lenha seca é fundamental para que se tenha uma boa carbonização, pois o teor de água da lenha influi diretamente no rendimento do forno.

O comprimento e o diâmetro das toras de lenha também influem no processo de carbonização. Lenha grossa demais (diâmetro acima de 25 cm) ou comprida demais (com mais de 2 m), atrasa a carbonização podendo resultar em maior quantidade de “tiços”. Depois de feito o carregamento do forno, procede-se ao fechamento da porta e ao acendimento. No início da combustão, a fumaça sai pela própria abertura de acendimento e é de cor esbranquiçada. Quando a fumaça torna-se escura é sinal de que a combustão está sucedendo, e neste momento pode-se completar o fechamento da porta.

Já os fornos de encosta (Figura 3) são uma adaptação dos fornos “rabo-quente”, onde sua principal característica é aproveitar o desnível natural de terrenos acidentados. Para construí-lo, corta-se o barranco com a forma circular, apoiando-se a cúpula sobre a borda do terreno, que funciona como se fosse a parede do forno. A operação do forno de encosta é semelhante àquela do forno “rabo-quente”.



Foto: Profª Angélica Cássia de Oliveira Carneiro. DEF/UFV

Figura 3 - Fornos de encosta.

Por fim, os fornos metálicos (Figura 4), de diferentes formas e tamanhos, têm a vantagem de ser móveis, podendo sempre ser instalados próximos às áreas de corte de lenha. Tem a desvantagem de perder muito calor através das paredes, tendo, por isto, baixos rendimentos, quando comparados aos fornos de alvenaria. Já está sendo empregado com sucesso na região norte de Minas Gerais para a carbonização de coco de babaçu. Este tipo de forno é muito aconselhado para carbonização de resíduos de madeira, tanto para os provenientes da exploração, quanto para aqueles provenientes da indústria, como serrarias e carpintarias.



Foto: Profª Angélica Cássia de Oliveira Carneiro. DEF/UFV

Figura 4 - Forno metálico para a produção de carvão.

Para o caso específico da carbonização de resíduos, como o ouriço da Castanha-do-Brasil, Quirino (2002) afirma que fornos simples e populares, construídos com tambores de aço, são largamente utilizados no Pacífico Sul para a produção de carvão vegetal de cascas de coco. Além do baixo custo, estes equipamentos permitem a produção de carvão no próprio local, sem a necessidade de transporte dos resíduos.

Alguns programas de sucesso estão em andamento no Brasil, para a produção de carvão a partir de resíduos não madeireiros, como o caso do carvão do coco do babaçu produzido na região de Januária-MG, idealizado pelo IEF-Regional do Alto e Médio São Francisco. Tal projeto inspirou a realização deste trabalho, apresentando um elevado grau de adaptabilidade a outras matérias-primas.

Vale ressaltar que, durante a carbonização, são formados, além do carvão, outros compostos (líquidos e gasosos), que podem ter interesse industrial.

Potencialmente, os produtos da pirólise de biomassa têm várias aplicações. Algumas aplicações, como os sabores de defumados, já são comerciais. No caso da carbonização no Brasil, o produto principal é o carvão vegetal, mas também pode ser produzido o licor pirolenhoso e os gases. Nesse caso, o carvão geralmente já tem seu mercado definido para o uso industrial (ferro-gusa, aço ou ferro-ligas), doméstico (cocção, churrasco, calefação, etc.)

ou comercial (pizzarias, churrascarias, padarias, etc.). Os líquidos e gases podem ou não ser aproveitados. Caso sejam descartados em forma de voláteis (vapores e gases) para a atmosfera, eles geram poluição e representam, em média, 75 % da massa de lenha enfiada.

Dessa forma, a produção de carvão a partir do ouriço pode ser uma alternativa que atende às questões sociais envolvidas com os povos que dependem da coleta da castanha, bem como às questões ambientais relativas à produção e consumo do carvão vegetal.

Atualmente, grande parte do carvão vegetal consumido no país, quer seja na indústria, comércio ou residências, vem de áreas de desmatamento ilegal. Assim, a utilização de resíduos para a produção de carvão pode reduzir, significativamente, a pressão sobre as florestas para este fim.

Com base no que foi apresentado, neste trabalho teve-se como objetivo a adaptação do método do tambor para a carbonização dos ouriços da Castanha-do-Brasil. Como objetivos específicos têm-se:

- Avaliar a adaptabilidade do método do tambor para a produção de carvão a partir do ouriço da Castanha-do-Brasil;
- Analisar a qualidade do carvão produzido;
- Avaliar seu potencial quanto ao uso energético depois de carbonizado.

MATERIAIS E MÉTODOS

O ouriço utilizado neste trabalho foi obtido de áreas de produção de castanha no município de Sinop-MT, durante a safra 2010/2011. Foram realizados três testes de carbonização no laboratório de Energia e Pós-Colheita da Universidade Federal de Mato Grosso.

Reator

Para a execução da carbonização foram utilizados tambores cilíndricos metálicos com volume de 0,2 m³, provenientes do reuso de recipiente de óleo lubrificante (Figura 5).



Figura 5 – Reator cilíndrico utilizado para a carbonização do ouriço da Castanha-do-Brasil.

De forma a garantir a carbonização, as tampas foram removidas de ambas as extremidades, sendo uma removida totalmente e a outra parcialmente, de forma a garantir a permanência de uma borda de apoio, conforme pode ser observado nas Figuras 6a e 6b.

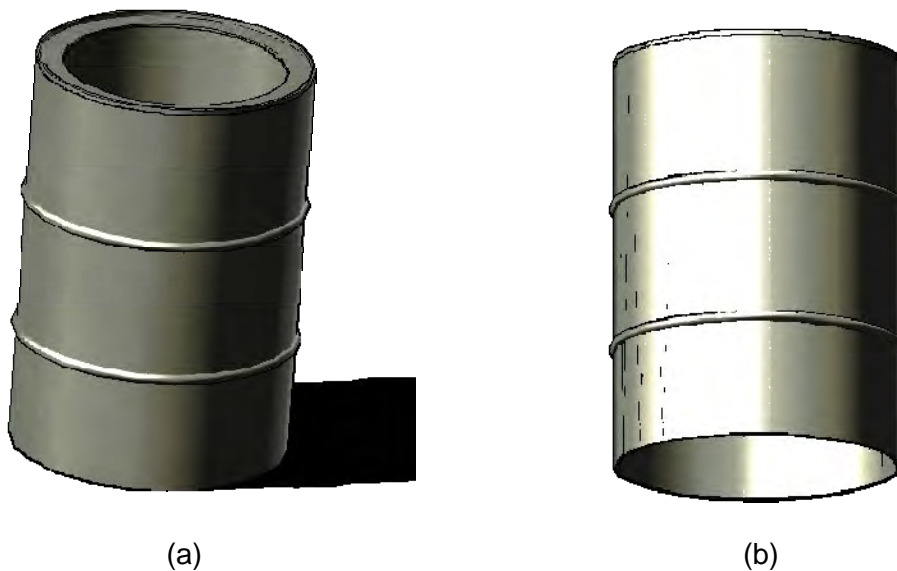


Figura 6 – Detalhe do reator para carbonização: (a) Detalhe superior, e; (b) Detalhe do fundo do tambor.

Para o uso do tambor como reator, é necessário o controle do ar. Assim, a peça retirada do fundo foi utilizada como tampa e apoiada na parte superior do reator, para garantir a vedação do sistema, conforme Figura 7.



Figura 7 – Detalhe da tampa para vedação do reator.

Carbonização

A carbonização foi iniciada depois da pesagem e abastecimento do reator com uma massa de ouriço da castanha correspondente a, aproximadamente, 80 % da altura total do reator, conforme mostra a Figura 8.



Figura 8 – Pesagem e abastecimento do reator.

Para a realização do processo de carbonização é necessário o controle da entrada do comburente dentro do reator. Assim, no processo desenvolvido neste trabalho, o oxigênio presente no ar atmosférico (comburente) entrou no reator através de aberturas na base do tambor, feitas cavando-se duas

canaletas, em forma de cruz, com altura média de 10 cm, no solo imediatamente abaixo do tambor (Figura 9).



Figura 9 – Detalhe das aberturas para entrada do comburente.

As entradas de ar também foram utilizadas para iniciar o processo de carbonização. A carbonização teve início com o auxílio de um maçarico conectado a um botijão de gás doméstico de 13 kg (Figura 10) pela base do reator, de forma que os ouriços localizados na base do tambor sofressem combustão para fornecer calor suficiente para o processo de pirólise (Figura 11).



Figura 10 – Detalhe do maçarico utilizado para o início da combustão.



Figura 11 – Combustão dos ouriços localizados na base do reator para garantir a temperatura necessária à pirólise.

Durante a realização dos testes, observou-se que o processo tornou-se mais eficiente, com a geração de mais carvão em relação a materiais não carbonizados, quando se aumentou a captação de comburente. Dessa forma, testou-se a produção de carvão pelas entradas de ar no solo e pela instalação de uma base elevada com fundo perfurado de forma a aumentar a área livre para admissão de ar (Figura 12). O terceiro teste foi realizado com esta modificação.



Figura 12 – Base elevada para instalação do reator.

Transcorrido o tempo de carbonização determinado pela movimentação da frente de calor até a altura média da massa de ouriços, foi efetuada a vedação das entradas de ar na base do reator, de modo a garantir o ambiente reduzido necessário à carbonização, conforme Figura 13.



Figura 13 – Detalhe da vedação das entradas de comburente.

A vedação total do reator foi realizada instalando-se a tampa metálica (Figura 14) e vedando-se a parte superior com uma massa formada por terra e água, de modo a reduzir a perda de calor e a entrada de oxigênio, conforme Figura 15.



Figura 14 – Vedação do reator com a tampa metálica.



Figura 15 – Detalhe da vedação da parte superior do reator com massa.

O momento da vedação do reator foi determinado pela presença de chamas na parte superior, de modo a garantir a temperatura suficiente à carbonização ao longo de todo o reator, conforme mostra a Figura 16.

Depois da vedação do reator, ocorreu a pirólise propriamente dita e o resfriamento da massa carbonizada. Como o reator não possui qualquer tipo de isolamento térmico, o resfriamento se deu por convecção natural pelo ar na superfície lateral do forno.

Finalizado o processo de pirólise e resfriamento, procedeu-se a abertura do reator e a retirada da massa carbonizada, cuja amostra foi retirada para análise química imediata e caracterização energética do carvão produzido.



Figura 16 – Presença de chamas na parte superior do reator, caracterizando o momento de sua vedação.

Rendimento gravimétrico

A avaliação do rendimento gravimétrico foi realizada pesando-se a massa de ouriço no início da carbonização bem como a massa carbonizada no final do processo.

A partir da massa carbonizada foi separada a fração correspondente ao ouriço com carbonização incompleta (“tiço”), de modo que a fração sólida foi dividida entre carbonizada e não carbonizada.

Neste trabalho, não foram coletados os gases oriundos da carbonização, devido esse processo não ser adaptado à realidade de produção de carvão na mata. A análise da fração perdida na forma de gás foi obtida aplicando-se a Equação 1.

$$F_g = 100 - (F_{cg} + F_{ci}) \quad (1)$$

Em que:

F_g = Fração de gases gerados na carbonização (%);

F_{cg} = Fração correspondente ao carvão gerado (%);

F_{ci} = Fração correspondente ao material com carbonização incompleta (%).

Densidade aparente e a granel

A massa específica a granel foi obtida pesando-se a massa de carvão contida em um volume conhecido, conforme metodologia utilizada por Silva *et al.* (2007). Como volume de referência utilizou-se um *Becker* com volume total de três litros.

Na Figura 17 pode-se observar o aparato utilizado.



Figura 17 – Aparato para determinação da massa específica a granel do carvão do ouriço da castanha.

Já a massa específica relativa aparente foi determinada utilizando-se a metodologia da estereometria por imersão, que utiliza o princípio de Arquimedes. Nesta metodologia, a amostra foi pesada diretamente em balança semi-analítica (Figura 18a) e, posteriormente, seu volume determinado pela variação de peso do líquido, em razão da imersão da amostra de carvão em mercúrio metálico (Figura 18b), conforme descrito por Vital (1984) e ASTM D-2395 (1999).



(a)



(b)

Figura 18 – Aparato para determinação da massa específica básica.

Análise química imediata

O material carbonizado obtido nos testes foi enviado ao laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) do Departamento de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Viçosa para determinação do teor de água, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e de carbono fixo, conforme a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986).

O material utilizado para a análise foi moído em moinho de facas e a fração utilizada para análise foi aquela com partículas recolhidas pelo material que passou pela peneira de malha 40 e que ficou retida na peneira de malha 20.

O teor de água foi determinado levando-se uma massa conhecida de carvão à estufa previamente aquecida a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 2 horas.

O teor de voláteis foi determinado levando-se a amostra preparada à mufla a $950 \pm 10^\circ\text{C}$ por 11 minutos. A diferença de massa obtida pela pesagem do material antes e depois do procedimento representa a fração de voláteis do material carbonizado.

Já para a análise do teor de cinzas, levou-se a amostra à mufla a $600 \pm 10^\circ\text{C}$ por um período de 6 horas, até sua calcinação completa. A razão entre a massa do resíduo da calcinação e a massa inicial da amostra seca representa o teor de cinzas.

Finalmente, o teor de carbono fixo é determinado pela aplicação da Equação 2.

$$C_f = 100 - (F_{vl} + F_{cz}) \quad (2)$$

Em que:

C_f = Teor de carbono fixo (%);

F_{vl} = Teor de materiais voláteis (%);

F_{cz} = Teor de cinzas (%).

Poder calorífico superior

Para a determinação do poder calorífico superior do carvão, as amostras foram enviadas ao LAPEM-UFV.

O poder calorífico superior foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica.

De modo a permitir uma análise da efetividade do processo de carbonização, foi analisado, também, o poder calorífico superior do ouriço utilizado como matéria-prima para a carbonização.

Análises estatísticas

Devido ao fato de não haver tratamentos a serem avaliados, neste trabalho foram aplicados apenas os conceitos da estatística descritiva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 pode-se observar a massa de matéria-prima e de carvão para a carbonização.

Tabela 1 – Massa inicial de carvão e massa com carbonização incompleta obtidas nos testes 1, 2 e 3

Teste	Massa inicial (kg)	Massa de carvão (kg)	Massa de carbonização incompleta (kg)
1	51,10	7,55	22,75
2	50,20	8,35	18,80
3	43,40	11,25	11,00

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, pode-se observar que o teste 3 produziu a maior quantidade de massa de carvão e, conseqüentemente, menor quantidade de massa de material com carbonização incompleta. Vale ressaltar que este teste foi realizado com a base elevada, garantindo maior admissão de ar comburente no reator.

Na Figura 19 apresenta-se uma análise comparativa do rendimento gravimétrico para os três testes. Observa-se que o teste 3 foi o que garantiu o melhor rendimento gravimétrico em carvão. A média de rendimento em carvão foi de $19,11\% \pm 5,97\%$; de massa com carbonização incompleta foi de $35,77\% \pm 9,70\%$ e da fração gasosa foi de $45,12\% \pm 4,07\%$.

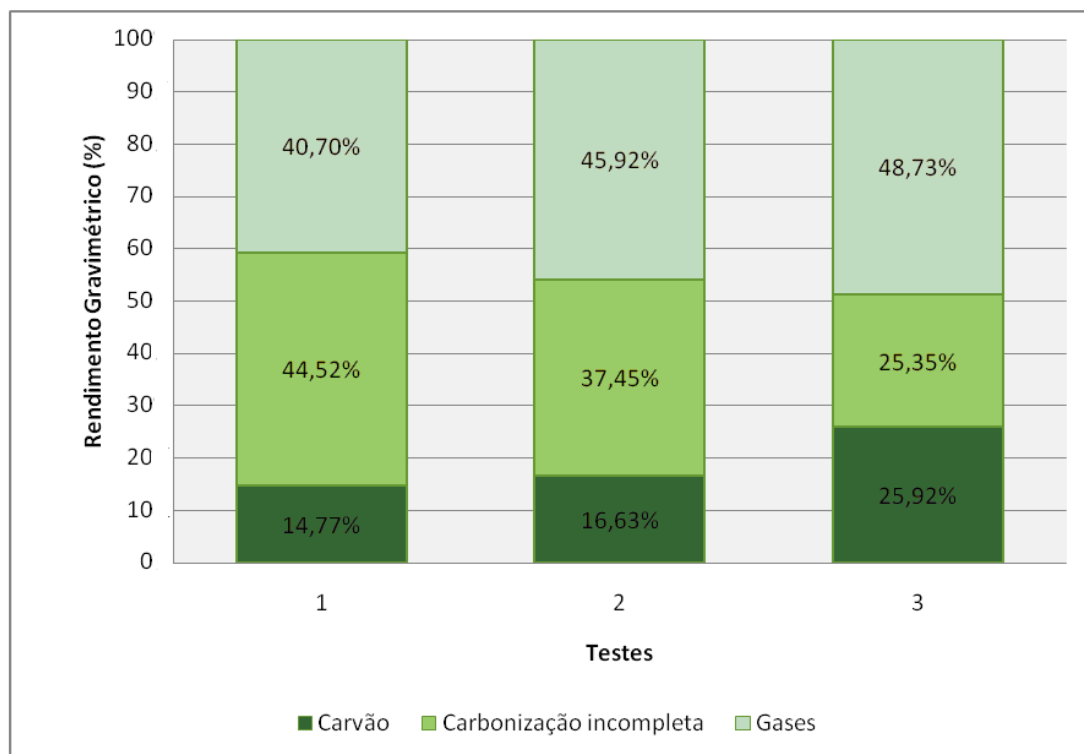


Figura 19 – Comparativo do rendimento gravimétrico entre os testes.

Vilas Boas *et al.* (2010), estudando a carbonização de endocarpo de macaúba, em mufla com temperaturas variando de 450°C a 650°C, encontraram rendimento gravimétrico médio do carvão de 35,13 %. Silva *et al.* (1986) comparam o rendimento gravimétrico do carvão de madeira de eucalipto, do endocarpo de babaçu e de macaúba, obtido a partir da carbonização em mufla, com temperaturas variando de 300°C a 700°C. Neste trabalho os autores encontraram valores de 31,97 %, 33,49 % e 39,37 % para o eucalipto, o babaçu e a macaúba, respectivamente. Assim, observa-se que os valores de rendimento gravimétrico encontrados neste trabalho estão abaixo dos encontrados para outros resíduos não-madeireiros. Vale destacar, porém, que, neste trabalho, não foi utilizada a mufla para a carbonização, sendo a análise do processo feita em condições reais de operação do sistema. Assim, não foi possível controlar as condições da carbonização, sendo os dados obtidos os que estão previstos na aplicação prática do método.

De forma a permitir uma análise comparativa entre a matéria-prima e o produto final, na Figura 20 pode ser observado o aspecto do ouriço utilizado para carbonização, e na Figura 21 o carvão produzido a partir da carbonização

deste ouriço. Na Figura 22 observa-se o aspecto do ouriço submetido à carbonização incompleta.



Figura 20 – Ouriço utilizado na carbonização.



Figura 21 – Carvão produzido a partir do ouriço.



Figura 22 – Ouriço com carbonização incompleta.

Com base nas Figuras 20, 21 e 22, destaca-se que, em razão do ouriço não ser uma estrutura maciça, o carvão produzido possui uma parede fina, quando comparado ao carvão de madeira, facilitando, assim, a quebra e a geração de um grande volume de materiais com pequenas dimensões.

Ressalta-se, ainda, que o material considerado como carbonizado incompletamente pode retornar ao reator, na parte superior, de forma a ser utilizado como fonte de calor ao processo de pirólise.

Na Tabela 2 estão apresentados os tempos decorridos durante a carbonização, nos testes executados.

Tabela 2 – Caracterização dos períodos de tempo transcorridos durante os testes de carbonização

Teste	Tempo de ignição (h)	Tempo de pirólise + Resfriamento (h)	Tempo total (h)
1	0,67	3,75	4,42
2	0,75	4,00	4,75
3	0,67	4,92	5,58

Com base nos dados apresentados na Tabela 2, é possível observar que o tempo de carbonização foi pequeno quando comparado ao tempo decorrido para a carbonização de endocarpo de macaúba, que, segundo Vilas Boas *et al.* (2010), para a carbonização em mufla, variou de 8 a 10 horas.

Ressalta-se que o fator tempo foi decisivo para o elevado teor de material não carbonizado na massa de ouriços, pois não houve tempo suficiente para a carbonização completa da massa antes do resfriamento do reator.

Assim, observa-se que o fato do reator utilizado não possuir qualquer isolamento térmico fez com que o resfriamento fosse iniciado antes da completa carbonização.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de massa específica básica e a granel do carvão obtido.

Tabela 3 – Densidade básica e a granel do carvão do ouriço da castanha

Amostra	Massa específica básica (g·cm ⁻³)	Massa específica a granel (g·cm ⁻³)
1	0,637	0,233
2	0,630	0,240
3	0,625	0,220
Média	0,631	0,231

Com base nestes resultados observa-se que o carvão produzido pode ser considerado de média densidade quando comparado ao carvão produzido a partir de madeira e a partir do endocarpo de frutos de palmeiras, como a macaúba e o babaçu. Silva *et al.* (1986) encontraram valores de massa específica básica de 0,457 g·cm⁻³, 1,085 g·cm⁻³ e 1,161 g·cm⁻³ para o carvão de madeira de eucalipto, do endocarpo do babaçu e do endocarpo da macaúba, respectivamente. Já Vilas Boas *et al.* (2010) encontraram valores médios de massa específica básica de 0,906 g·cm⁻³ para o carvão do endocarpo de macaúba. Silva *et al.* (2007) encontraram valores de massa específica de 0,53 g·cm⁻³, 0,52 g·cm⁻³ e 0,38 g·cm⁻³ para o carvão de maçaranduba, sapucaia e timborana, respectivamente.

Com relação à massa específica a granel, neste trabalho os valores encontrados foram próximos aos citados por Silva *et al.* (2007) para a maçaranduba, sapucaia e timborana, que foram 0,231 g·cm⁻³, 0,202 g·cm⁻³ e 0,178 g·cm⁻³, respectivamente.

O resultado da análise química imediata é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise química imediata do carvão do ouriço da Castanha-do-Brasil

Parâmetro	Resultado (%)
<i>Teor de água</i>	4,71 ± 0,12
<i>Teor de materiais voláteis</i>	20,79 ± 0,20
<i>Teor de cinzas</i>	0,87 ± 0,08
<i>Teor de carbono fixo</i>	78,33 ± 0,28

Com base nos resultados apresentados na Tabela 30, verifica-se que o carvão produzido a partir do ouriço da Castanha-do-Brasil possui propriedades

químicas bastante aproximadas do carvão de madeira, quando comparada com dados obtidos por Silva *et al.* (2007). Estes autores, analisando a carbonização de três espécies madeireiras, encontraram teor de cinzas variando de 0,8 a 1,5%; teor de materiais voláteis variando de 24,44 a 26,00 %; o carbono fixo variou de 72,66 a 74,49 %.

Comparando-se, porém, tais valores com os encontrados por Vilas Boas *et al.* (2010) para a carbonização do endocarpo da macaúba verifica-se valores superiores de carbono fixo, da ordem de 84,73 %. Já para materiais voláteis, os autores encontraram valores médios de 9,11 % e para cinzas 6,14 %.

Vale ressaltar que os dados citados por Silva *et al.* (2007) foram obtidos em condições de campo, já Vilas Boas *et al.* (2010) analisaram a carbonização em condições de laboratório. Assim, os dados obtidos neste trabalho estão próximos às condições reais de carbonização.

Na Tabela 5 apresenta-se uma análise comparativa entre o poder calorífico superior (PCS) do ouriço não carbonizado (*in natura*) e do carvão produzido pelo método do tambor.

Tabela 5 – Valores médios do poder calorífico superior do ouriço *in natura* e da biomassa carbonizada

Produto	Poder Calorífico Superior (kcal·kg ⁻¹)
Ouriço <i>in natura</i>	4.793,02
Carvão	7.252,98

Comparando-se o PCS do ouriço obtido neste trabalho com o resultado encontrado por Oliveira e Lobo (2002) para o mesmo produto, 4.721,74 kcal·kg⁻¹, verifica-se um valor pouco maior do que este.

Já Vilas Boas *et al.* (2010) encontraram valores médios de 4.996,18 kcal·kg⁻¹ para a macaúba *in natura* e 7.819,29 kcal·kg⁻¹ para a biomassa carbonizada. Ressalta-se que os valores encontrados para a macaúba são ligeiramente superiores aos observados para o ouriço da Castanha-do-Brasil.

Quando se compara os valores de PCS do ouriço obtido neste trabalho com o do carvão de espécies de madeira nativa como a maçaranduba, a

sapucaia e a timborana, verifica-se que os valores obtidos para o ouriço foram, em média, 11,33 % maior (SILVA *et al.*, 2007).

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir o seguinte:

- O método do tambor é adaptado à produção de carvão a partir do ouriço da Castanha-do-Brasil, porém, melhorias no isolamento térmico do reator podem ser propostas para trabalhos futuros.
- O rendimento gravimétrico em carvão foi baixo, quando comparado ao rendimento por outros métodos de carbonização, possivelmente, devido à falta de isolamento térmico.
- O tempo de carbonização no reator foi consideravelmente menor que os obtidos para a carbonização em mufla de laboratório de produtos similares.
- O carvão produzido pelo método do tambor apresentou características químicas, físicas e térmicas comparáveis ao carvão de outras espécies madeireiras e não-madeireiras.
- O método testado pode ser considerado bastante simples e adequado às condições de produção em regime extrativista, podendo ser levado para o local de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112:1986 Carvão vegetal - Análise imediata**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633:1984 Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 13p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-2395**. Philadelphia, PA. 1999.

BEENACKERS, A. A. C. M.; BRIDGEWATER, E. A. V.. **Gasification and Pyrolysis of Biomass in Europe**. Pyrolysis and Gasification, p. 129-155. 1989.

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Séries Técnicas CETEC, Belo Horizonte, 393 p. 1982

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2010. Disponível em: <HTTP://www.ibge.gov.br> . Acesso em 01 de Julho de 2011.

LÓPEZ, J. C. F.; SILVA, E. H.. **Teoria e Equipamentos da Carbonização e Propriedades do Carvão Vegetal**. Viçosa: UFV, 1998.

MOURA, P. R. G.; NASCIMENTO, C. C. **Fruto da Castanha-do-Brasil: potencialidade de uso como fonte de matéria-prima para a rede energética do estado do Amazonas**. Anais da 59ª Reunião da SBPC. 2007.

OLIVEIRA, J. M. C.; LOBO, P. C. **Avaliação do potencial energético de resíduos de biomassa amazônica**. Anais do 4º Encontro de Energia no Meio Rural. 2002.

PINHEIRO, P. C.; SAMPAIO, R. S.; REZENDE, M. A.; BASTOS FILHO, J. G. **Fundamentos e Prática da Carbonização de Biomassa**. Belo Horizonte: ed. Autores, 2001.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Apostila do curso de Capacitação de Agentes Multiplicadores em Valorização da Madeira e dos Resíduos Vegetais, MMA/IBAMA, 2002.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. **Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos**. Biomassa & Energia. V.1; n.2; 2004.

SILVA, A. M. B. **Retratos sem sombras: Um esboço sobre as neo-senzalas carvoeiras no novo Mundo do Trabalho**. Revista da RET. Ano I. N. 2. 2008.

SILVA, J. C.; BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **Endocarpos de babaçu e de macaúba comparados a madeira de Eucalyptus grandis para a produção de carvão vegetal**. IPEF, n.34, p.31-34. 1986.

SILVA, M. G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. **Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA**. Acta Amazônica. V. 37(1). P. 61 – 70. 2007.

VILAS BOAS, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L.; MARTINS, M. A.. **Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal**. Scientia Forestalis. V.38, n.87, p. 481-490. 2010.

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

CONCLUSÕES GERAIS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, foi possível concluir o seguinte:

- As propriedades físicas para a Castanha-do-Brasil, obtidas neste trabalho estão de acordo com a literatura.
- Os resultados de propriedades físicas foram fundamentais para o dimensionamento do sistema de secagem proposto.
- As dimensões propostas para o secador estão de acordo com a demanda do produto.
- Depois de testado e validado o equipamento, pôde-se concluir que o equipamento está adaptado à realidade de produção da castanha e que possui um grande potencial de utilização.
- O método do tambor é adaptado à produção de carvão a partir do ouriço da Castanha-do-Brasil, porém, este poderia se tornar mais eficiente caso houvesse um isolamento térmico do reator.
- O rendimento gravimétrico em carvão foi baixo, quando comparado ao rendimento obtido por outros métodos, possivelmente, devido à falta de isolamento térmico.
- O carvão produzido pelo método do tambor apresentou características químicas, físicas e térmicas comparáveis ao carvão de outras espécies madeireiras, bem como do endocarpo de frutos de palmáceas.