

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA CASTANHA DE CAJU
(Anacardium occidentale L.) PARA FINS DE BENEFICIAMENTO
E DESENVOLVIMENTO DE DECORTICADOR DE CILINDROS
ROTATIVOS

Tese submetida à banca examinadora para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Agrícola na área de concentração em Máquinas
Agrícolas.

MAX CÉSAR DE ARAÚJO

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2005

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado defendida por **MAX CÉSAR DE ARAÚJO**, aprovada pela Comissão Julgadora em 24 de fevereiro de 2005.

Campinas, 14 de fevereiro de 2006.


PROF. DR. ANTONIO CARLOS DE OLIVEIRA FERRAZ
Presidente

UNIDADE	Ar15c
Nº CHAMADA	Ar15c
V	EX
TOMBO BC	67277
PROC.	16.123.06
C	☐
D	☒
PREÇO	11.00
DATA	08/3/06
Nº CPD	

Bib. id 36220+

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ar15c Araújo, Max César de
Caracterização mecânica da castanha de caju
(*Anacardium occidentale* L.) para fins de beneficiamento e
desenvolvimento de decortificador de cilindros rotativos /
Max César de Araújo.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Antonio Carlos de Oliveira Ferraz.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Castanha-de-caju – Propriedades mecânicas. 2.
Descascamento. 3. Máquina agrícola. 4. Castanha-de-
caju – Processamento. I. Ferraz, Antonio Carlos de
Oliveira. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Mechanical characterization of the cashew nut with aim
improvement, and development of rotary cylinders
decorticator

Palavras-chave em Inglês: Mechanical properties – Cashew nut,
Decortication, Agricultural machinery e Process
Cashew nut

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Jayme de Toledo Piza e Almeida Neto, Clóvis Isberto
Bissegli, Oscar Antonio Braunbeck e Inácio Maria Dal
Fabbro

Data da defesa: 24/02/2005

... Porque ter uma mente boa não é o bastante; o principal é aplicá-la bem. As maiores almas são capazes tanto das maiores virtudes quanto dos maiores vícios, e aqueles que marcham lentamente podem avançar muito mais, se seguirem o caminho certo, do que os que correm, porém dele se afastam.

Descartes, discurso sobre o método, parte I (1637)

*Aos meus pais, Valfredo e Sofia,
aos meus filhos, Thiago e Júlia,
a minha esposa, Maristela.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, causa primeira de todas as coisas.

A minha esposa, Maristela Santana, pelo apoio e paciência nas horas difíceis.

Aos meus filhos, Júlia Araújo e Thiago Araújo, pela compreensão da ausência nos momentos de trabalho.

Aos meus pais Valfredo Araújo e Sofia Araújo, pelas palavras de incentivo durante a realização deste trabalho e exemplo de vida.

A CAPES, pelo apoio financeiro concedido durante a vigência do curso.

A Universidade Federal do Piauí, pela liberação das atividades acadêmicas.

A UNICAMP, pela oportunidade concedida para o aprimoramento de conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos de Oliveira Ferraz, pela orientação, ensinamentos e todo o estímulo prestado no decorrer do curso.

A Embrapa Instrumentação Agropecuária nas pessoas do Dr. Clovis Biscegli e Dr. Ricardo Inamasu, pelo apoio na condução e construção do protótipo.

A Embrapa Agroindústria Tropical nas pessoas Antonio Calixto Lima e Francisco Fábio Paiva, pelas informações técnicas e primeiros incentivos na realização do tema de pesquisa.

Ao SINDICAJU, na pessoa do Antonio José Carvalho, pelo apoio financeiro e informações técnicas disponibilizadas.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP pelos ensinamentos ministrados.

Aos técnicos dos Laboratórios de Protótipos, Propriedades Mecânicas e Pós-colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, pela colaboração na realização dos experimentos.

Aos técnicos da oficina mecânica da Embrapa Instrumentação Agropecuária pela esmerada construção do protótipo decortificador.

Ao Cláudio Kenmochi, Edgar Lombardi e Robison Orsini, pela confecção dos desenhos técnicos.

Aos bolsistas, Elayne Moraes, Antoniane Roque, Júlio Martins, Guilherme Mastrorosa e Fausto Araújo, pela valiosa ajuda nos experimentos.

Aos Professores Dr. Roy Edward Bruns, Luis Ernesto Brossard Perez e ao amigo Ânoar El-Aouar pelas valiosas discussões acerca da análise estatística.

Aos colegas do curso de pós-graduação, Daniel Albiero, Fausto Lacerda, Luciane Yokoyama, Vitor Mazzeti, pela amizade no decorrer do curso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xx
RESUMO	xxii
ABSTRACT	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Aspectos botânicos	4
2.2. Considerações gerais e preparação da castanha de caju para a decorticação	7
2.3. Teor de água	9
2.4. Princípios e rendimentos dos mecanismos utilizados para decorticação da castanha de caju e outras nozes	10
<i>Sistemas decortecedores utilizados para a castanha de caju</i>	10
<i>Sistemas decortecedores utilizados para a noz macadâmia</i>	14
2.5. Características do material biológico	15
2.5.1. Aspectos viscoelásticos	15
2.5.2. Teorias de ruptura	18
2.6. Impacto entre corpos	18
2.7. Microscopia eletrônica de varredura	21
ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DA FRAGILIDADE DO	
3. ENDOCARPO E RIGIDEZ DA AMÊNDOA DA CASTANHA DE CAJU	
‘CCP 76’ APÓS TRATAMENTO TÉRMICO	22
3.1. Introdução	22
3.2. Metodologia	23
<i>Umidação e tratamento térmico da castanha de caju: preliminares</i>	23
<i>Planejamento experimental</i>	24
<i>Procedimentos para umidação e tratamento térmico das castanhas de caju</i>	26

	<i>Dimensões, massa e volume das castanhas de caju antes e após tratamento térmico</i>	27
	<i>Determinação do teor de água</i>	29
	<i>Avaliação do efeito combinado de umidificação e tratamento térmico nas propriedades do endocarpo</i>	30
	<i>Cisalhamento do endocarpo</i>	30
	<i>Avaliação do efeito combinado de umidificação e tratamento térmico nas propriedades da amêndoa</i>	32
	<i>Penetração da amêndoa</i>	32
	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i>	32
3.3.	Resultados e discussão	33
	<i>Avaliação das dimensões, massa e volume antes e após o tratamento térmico</i>	33
	<i>Determinação do teor de água</i>	34
	<i>Efeito combinado de umidificação e tratamento térmico nas propriedades do endocarpo</i>	36
	<i>Efeito combinado de umidificação e tratamento térmico nas propriedades da amêndoa</i>	40
	<i>Resultados da microscopia eletrônica de varredura</i>	43
	<i>Discussões finais</i>	44
3.4.	Conclusões	45
3.5.	Referências bibliográficas	45
4.	ARTIGO 2: DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA LIMITE E EFEITO DA UMIDIFICAÇÃO E TRATAMENTO TÉRMICO NA DECORTICAÇÃO DA CASTANHA DE CAJU “CCP 76” ATRAVÉS DE IMPACTO ÚNICO E DIRECIONADO	47
4.1.	Introdução	47
4.2.	Metodologia	48
	4.2.1. Ensaio de impacto para a determinação da deformação específica limite	48
	<i>Castanhas de caju</i>	48

<i>Determinação de Umidade</i>	49
<i>Dispositivo de impacto</i>	49
<i>Critério de avaliação da qualidade da ruptura da castanha e condição da amêndoa</i>	51
4.2.2. Ensaio de impacto para castanhas submetidas a diversos tratamentos	52
<i>Castanhas de caju</i>	52
<i>Ensaio de impacto</i>	52
<i>Planejamento estatístico</i>	52
4.3. Resultados e discussão	53
4.3.1. Resultados do ensaio de impacto para determinação da deformação específica limite	53
<i>Dimensões médias e massa das castanhas ensaiadas</i>	53
<i>Ensaio para determinação da deformação específica limite</i>	53
4.3.2. Resultados do ensaio de impacto para as castanhas submetidas a diferentes tratamentos	56
<i>Dimensões médias e massa das castanhas de caju</i>	56
<i>Umidade</i>	57
<i>Ensaio de impacto com aplicação da deformação específica limite de 19%</i>	58
<i>Resultado da análise estatística</i>	59
<i>Ruptura total da casca com amêndoa inteira</i>	59
<i>Ruptura parcial da casca com amêndoa protegida</i>	60
<i>Ruptura parcial da casca com a amêndoa exposta</i>	61
<i>Ruptura total da casca e amêndoa danificada</i>	63
<i>Discussões finais</i>	65
4.4. Conclusões	65
4.5. Referências Bibliográficas	65

ARTIGO 3: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO

5. PARA DECORTICAÇÃO DA CASTANHA DE CAJU POR MECANISMO CILÍNDRICO ROTATIVO	67
5.1. Introdução	67
5.2. Metodologia	68
<i>Considerações preliminares e princípios básicos</i>	68
<i>Dimensionamento dos diâmetros dos cilindros</i>	69
<i>Equações de equilíbrio estático</i>	69
<i>Construção e avaliação de desempenho do protótipo</i>	70
<i>Confecção do protótipo</i>	70
<i>Procedimentos de preparação dos lotes de castanha de caju</i>	70
<i>Deformação específica limite para os ensaios de desempenho</i>	71
<i>Ensaio de desempenho do protótipo</i>	71
<i>Procedimentos de preparação dos lotes de castanha de caju</i>	71
<i>Determinação da rotação de trabalho dos cilindros</i>	71
<i>Estimativa da velocidade da castanha no instante do impacto</i>	72
<i>Ensaio de desempenho do protótipo modificado</i>	72
<i>Determinação de umidade</i>	73
5.3. Resultados e discussão	73
Protótipo decortificador	73
<i>Dimensionamento dos cilindros</i>	73
<i>Partes constituintes do protótipo</i>	75
<i>Ensaio de desempenho do protótipo</i>	76
<i>Modificações no protótipo</i>	79
Protótipo decortificador modificado	80
<i>Partes constituintes do protótipo</i>	80
<i>Resultado de desempenho a diferentes rotações</i>	82
<i>Resultado do cálculo estimado da velocidade da castanha</i>	82
<i>Ensaio de desempenho do protótipo modificado</i>	83
<i>Resultado da análise estatística</i>	85
<i>Ruptura total da casca com amêndoa inteira</i>	85

<i>Ruptura parcial da casca com amêndoa protegida</i>	86
<i>Ruptura parcial da casca com a amêndoa exposta</i>	88
<i>Ruptura total da casca e amêndoa danificada</i>	90
<i>Discussões finais</i>	92
5.4. Conclusões	93
5.5. Referências Bibliográficas	93
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	95
<i>Conclusões</i>	95
<i>Recomendações para trabalhos futuros</i>	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS	97
APÊNDICES	102
Rotina para gerar as equações do sistema MATLAB 6.5	102
Rotina para cálculo do diâmetro do cilindro MATLAB 6.5	104
Material utilizado na construção do protótipo	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Vista dos frutos e pseudofrutos de um cajueiro anão precoce	5
Figura 2.2	Parte da casca de uma castanha de caju, após tratamento térmico em LCC, mostrando o epicarpo (a), mesocarpo (b), endocarpo(c) e amêndoa (d)	6
Figura 2.3	Representação esquemática da decorticação da castanha de caju através de martelo	10
Figura 2.4	Representação esquemática da decorticação da castanha de caju com lâmina (A) e a máquina utilizada para a decorticação(B)	11
Figura 2.5	Representação esquemática da decorticação da castanha de caju por impacto aleatório mostrando o fluxo de castanhas no mecanismo (A) e o disco que arremessa as castanhas (B)	12
Figura 2.6	Ilustração da variação do módulo de elasticidade para resposta elástica e viscoelástica	17
Figura 2.7	Ilustração da excitação e resposta sinusoidais características de um material viscoelástico	17
Figura 2.8	Curvas característica do impacto elástico e plástico	19
Figura 3.1	Castanhas de caju, em repouso num recipiente hermético, durante a umidificação	26
Figura 3.2	Tratamento térmico de lote de castanhas de caju em fritadeira elétrica (A), com termômetro de mercúrio para acompanhamento das variações de temperatura (B)	27
Figura 3.3	Dimensões características da castanha de caju: comprimento (a), largura (b) e espessura (c)	28
Figura 3.4	Arranjo experimental para identificar as alterações de volume (A) com detalhe para a castanha submersa em água (B)	29
Figura 3.5	Vista do dispositivo, projetado e construído para a decorticação	

	manual das castanhas de caju, através de lâminas afiadas	30
Figura 3.6	Representação esquemática do dispositivo para avaliação do cisalhamento de parcela do endocarpo de castanhas tratadas termicamente	31
Figura 3.7	Vista do dispositivo de cisalhamento acoplado a máquina universal de ensaios mostrando a célula de carga (a), a ponteira (b) e a base plana (c)	31
Figura 3.8	Vista da ponteira utilizada no ensaio de penetração da amêndoa, mostrando a ponteira (a), a amêndoa (b) e a base plana (c)	32
Figura 3.9	Porta-amostra utilizado na microscopia mostrando o stub (a), disco de endocarpo (b)	33
Figura 3.10	Relações força-deformação características, para o ensaio de cisalhamento do endocarpo com tratamento térmico, ensaio 1 e sem tratamento térmico, ensaio 12	37
Figura 3.11	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a deformação específica no endocarpo em função do tempo de umidificação e tempo de residência	39
Figura 3.12	Relações força-deformação característica para o ensaio de penetração da amêndoa com tratamento térmico, ensaio 1, e sem tratamento térmico, ensaio 12	40
Figura 3.13	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a energia na amêndoa em função do tempo de umidificação e tempo de residência	43
Figura 3.14	Microfotografia do endocarpo da castanha in natura, evidenciando a disposição das fibras(a)	44
Figura 3.15	Microfotografia do endocarpo da castanha após 86 horas de umidificação e 150s de residência no LCC a 210°C, evidenciando a disposição das fibras (a)	44
Figura 4.1	Representação esquemática do dispositivo de impacto mostrando a aplicação direcionada da força e deformação limitada (δ)	50
Figura 4.2	Configuração construtiva do dispositivo de impacto utilizado no	

	ensaio de deformação específica limite mostrando o conduto vertical (a), base plana (b) e a castanha de caju (c)	50
Figura 4.3	Detalhe do dispositivo de impacto. Duto vertical (a), martelo plano (b), castanha (c), base plana horizontal(d)	51
Figura 4.4	Castanhas submetidas ao ensaio de impacto, mostrando cada critério estabelecido. a – ruptura total da casca e amêndoas inteiras, b – ruptura parcial da casca e amêndoas protegidas, c – ruptura parcial da casca e amêndoa exposta, d – ruptura total da casca e amêndoa danificada	54
Figura 4.5	Desempenho da ruptura das castanhas através do impacto único e direcionado na <i>ruptura total da casca e amêndoas inteiras, ruptura parcial da casca e amêndoas protegida, ruptura parcial da casca e amêndoa exposta, ruptura total da casca e amêndoa danificada</i> , expresso em porcentagem, para a deformação específicas de 19%.	58
Figura 4.6	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura total da casca e amêndoa inteira em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio de impacto	60
Figura 4.7	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura parcial da casca e amêndoa protegida em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio de impacto	61
Figura 4.8	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura parcial da casca e amêndoa exposta em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio de impacto	63
Figura 4.9	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura total da casca e amêndoa danificada em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio de impacto	64
Figura 5.1	Representação esquemática da concepção inicial do decortificador proposto mostrando a vista geral (A), a interação castanha cilindro (B) e o alimentados trapezoidal (C)	69
Figura 5.2	Dimensão característica da largura (a) da castanha de caju	70
Figura 5.3	Representação esquemática do equacionamento estático do	

	mecanismo proposto	74
Figura 5.4	Relação da força horizontal versus diâmetro dos cilindros para o seu dimensionamento	75
Figura 5.5	Vista do protótipo decortificador de castanha de caju com mecanismo cilíndrico rotativo mostrando seus principais componentes	76
Figura 5.6	Relação de força horizontal versus diâmetro dos cilindros para o protótipo modificado	80
Figura 5.7	Vista do protótipo decortificador modificado de castanha de caju por mecanismo cilíndrico rotativo mostrando seus principais componentes	81
Figura 5.8	Vista da interação entre castanha e cilindro decortificador (a) e da placa de impacto (b)	81
Figura 5.9	Desempenho do protótipo de decorticação na <i>ruptura total da casca</i> e amêndoas inteiras, <i>ruptura parcial da casca</i> e amêndoas protegida, <i>ruptura parcial da casca</i> e amêndoa exposta, <i>ruptura total da casca</i> e amêndoa danificada, de castanha de caju, expresso em porcentagem, numa deformação específicas de 19% e rotação de 1150-1750 rpm	84
Figura 5.10	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a <i>ruptura total da casca</i> e amêndoa inteira em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio do protótipo	86
Figura 5.11	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a <i>ruptura parcial da casca</i> e amêndoa protegida em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio do protótipo	88
Figura 5.12	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a <i>ruptura parcial da casca</i> e amêndoa exposta em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio do protótipo	90
Figura 5.13	Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a <i>ruptura total da casca</i> e amêndoa danificada em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio do protótipo	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Variáveis codificadas e decodificadas do planejamento experimental para avaliação do efeito combinado de umidificação e tratamento térmico submetido a castanha de caju “CCP 76”	24
Tabela 3.2	Dimensões médias, massa e volume da castanha de caju, antes e após tratamento térmico com LCC	34
Tabela 3.3	Valores percentuais médios de umidade (b.s.) para a amêndoa e casca da castanha de caju ‘CCP 76’, submetidos a diversos tratamentos térmicos	35
Tabela 3.4	Valores médios de força máxima (N), deformação específica correspondente (mm/mm) e energia (J) do endocarpo submetido ao ensaio de cisalhamento em diversos tratamentos	38
Tabela 3.5	Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para a deformação específica no ensaio de cisalhamento do endocarpo	39
Tabela 3.6	Valores médios de força máxima (N) e energia (J) da amêndoa de caju submetido ao ensaio de penetração em diversos tratamentos	41
Tabela 3.7	Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para a energia no ensaio de penetração da amêndoa	42
Tabela 4.1	Desempenho do impacto único e direcionado, em castanhas de caju, em porcentagem de castanhas ensaiadas a várias deformações específicas	55
Tabela 4.2	Desempenho do impacto único e direcionado na abertura de castanhas de caju, expresso em porcentagem, com deformação específicas de 19%, para 50 castanhas	56
Tabela 4.3	Valores percentuais médios de umidade em base úmida (b.s.) para a castanha de caju “CCP 76”, submetidos a diversos tratamentos térmicos	57
Tabela 4.4	Efeitos estimados erro puro e grau de significância estatística para a ruptura total da casca e amêndoa inteira no ensaio de impacto da castanha de caju ‘CCP 76’	59

Tabela 4.5	Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para a ruptura parcial da casca e amêndoa protegida no ensaio de impacto da castanha de caju ‘CCP 76’	61
Tabela 4.6	Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para as castanhas com ruptura parcial da casca e amêndoa exposta no ensaio de impacto da castanha de caju ‘CCP 76’	62
Tabela 4.7	Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para as castanhas com ruptura total da casca e amêndoa danificada no ensaio de impacto da castanha de caju ‘CCP 76’	64
Tabela 5.1	Resultado da avaliação de desempenho do protótipo a várias rotações de trabalho com castanhas de tamanho médio entre 26 e 31mm com 50 castanhas	78
Tabela 5.2	Resultados da avaliação de desempenho do protótipo modificado a várias rotações de trabalho com castanhas de tamanho médio entre 22,31 e 33,22mm	82
Tabela 5.3	Efeitos estimados erro puro e grau de significância estatística para ruptura total da casca e amêndoa inteira no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju ‘CCP 76’	85
Tabela 5.4	Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para a ruptura parcial da casca e amêndoa protegida no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju ‘CCP 76’	87
Tabela 5.5	Análise de variância para a ruptura parcial da casca e amêndoa protegida no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju ‘CCP 76’	87
Tabela 5.6	Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para as castanhas com ruptura parcial da casca e amêndoa exposta no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju ‘CCP 76’	89
Tabela 5.7	Análise de variância para a ruptura parcial da casca e amêndoa exposta no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju ‘CCP 76’	89

Tabela 5.8	Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para as castanhas com ruptura total da casca e amêndoa danificada no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju ‘CCP 76’	91
Tabela 5.9	Análise de variância para a ruptura total da casca e amêndoa danificada no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju ‘CCP 76’	91

LISTA DE SIMBOLOS

Latinas

C	comprimento
$^{\circ}C$	graus Celsius
cm	centímetro
cv	cavalo vapor
ϕ	diâmetro do cilindro
E	módulo de elasticidade ou modulo de Young
e	distância entre a superfície do cilindro
e'	coeficiente de restituição
G	módulo de elasticidade transversal
g	grama
h	hora
ha	hectare
h_f	altura final
h_i	altura inicial
K	módulo volumétrico
Kg	kilograma
L	largura
m	metro
m	massa
mm	milímetro
N	Newton
N	resultado da reação horizontal
N_1	reações normais 1
N_2	reações normais 1
R_1	forças resultantes
R_2	forças resultantes
rpm	rotação por minuto

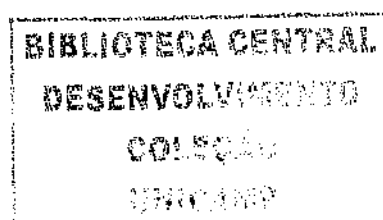
T_u	tempo de umidificação
T_r	tempo de residência
t	tempo
r	raio do cilindro
R_{tAi}	ruptura total da casca e amêndoa inteira
R_{pAp}	ruptura parcial da casca e amêndoa protegida
R_{pAe}	ruptura parcial da casca e amêndoa exposta
R_{tAd}	ruptura total da casca e amêndoa danificada
V_t	velocidade tangencial do cilindro
v_f	velocidade final
v_i	velocidade inicial
v	volume
W	velocidade angular do cilindro
W_1	velocidade angular cilindro 1
W_2	velocidade angular cilindro 2

Gregas

ψ	função fluência (psi)
ϕ	função relaxação (fi)
ε	deformação específica (epsilon)
σ	Tensão (sigama)
ν	módulo de Poisson (nii)
Θ_1	posiciona angularmente a base 1 com relação a base inercial (teta)
Θ_2	posiciona angularmente a base 2 com relação a base inercial (teta)
δ	deformação limitada (delta)

RESUMO

A agroindústria do caju tem como principal produto econômico a amêndoa da castanha e, atualmente, utiliza o impacto aleatório como princípio de decorticação, com perdas de 40 a 50% de amêndoas inteiras. O desenvolvimento de mecanismos mais adequados para a ruptura da casca e liberação de amêndoas inteiras, exige conhecimento e aplicação de parâmetros associados às propriedades mecânicas do material. Este trabalho investigou algumas destas propriedades da castanha 'CCP 76', tais como: variações nas dimensões características, massa e volume, microestrutura, fragilidade do endocarpo e rigidez da amêndoa. Investigou-se também, a deformação específica limite como parâmetro tecnológico para a abertura das castanhas, através de ensaios de impacto. Com os resultados obtidos nestes estudos, desenvolveu-se um protótipo decortificador de cilindros rotativos que utiliza o princípio da compressão combinado com um impacto direcionado. Utilizou-se a metodologia de superfície de resposta para avaliar os resultados dos ensaios mecânicos e de desempenho do protótipo proposto, com castanhas tratadas em diferentes níveis de umidificação e tratamento térmico. Os resultados obtidos evidenciaram alterações nas dimensões características, na massa e volume das castanhas, como também, na microestrutura do endocarpo. Os resultados do ensaio de cisalhamento do endocarpo e resistência da amêndoa apontaram diferenças entre material *in natura* e o tratado termicamente. Nos ensaios de impacto, obteve-se 77,55% de abertura das castanhas com liberação da amêndoa inteira utilizando-se a deformação específica limite de 19%, aplicada ao longo da largura. O protótipo decortificador proposto apresentou desempenho de 67,35% para ruptura total da casca e amêndoa inteira liberada, com apenas uma passada pelos cilindros, utilizando a rotação combinada de 1150-1750rpm. A preparação das castanhas através do efeito combinado do tempo de umidificação e tratamento térmico não afetou o desempenho do protótipo na faixa de variação utilizada, mas apontou a região de tendência onde às respostas são mais adequadas.



ABSTRACT

The cashew industry has as its main product the kernel of the cashew nut. Currently, it uses by large the random impact as decortication method which produces losses from 40 to 50% of whole kernels. The development of more appropriate mechanisms to rupture of shell and to release of whole kernel, demands knowledge and application of parameters associated with the mechanical properties of the nut. This work aimed to investigate some of these properties of cashew nut 'CCP 76', such as: variations in characteristic dimensions, mass and volume, microstructure, brittleness of the endocarp and rigidity of kernel associated with nut treatment prior to cracking. It was also investigated, the limit specific deformation as technological parameter using a specially designed impact tester. Based in those studies, it was designed and constructed a nut decorticator prototype with rotary cylinders to combine compression and impact to crack the shell. The response surface methodology was used to evaluate the results of the mechanical tests and the performance of the prototype when cashew nuts treated in different humidity levels and thermal treatment were used. The results showed changes in the characteristic dimensions, in the mass and volume of the cashew nuts as well as in the microstructure of the endocarp after heat treatment. The results for the shear tests in the endocarp and stiffness of the kernel pointed differences between *in natura* and thermally treated nuts. For the impact test, it was obtained 77,55% of free whole kernels using the limit specific deformation of 19%, applied along the width of the nut. The nut decorticator proposed was able to release 67,35% free whole kernel with just one pass between the cylinders, using the cylinders combined rotation of 1150-1750rpm. The combined effect of time of humidity and thermal treatment used in the preparation of the cashew nuts didn't seem to affect the performance of the prototype, in the range of used. However, it pointed out to an area in the response surface where the combination of treatments would be more appropriate.

1. INTRODUÇÃO

O cajueiro é cultivado em 26 países, embora em termos de importância sua exploração restrinja-se à Índia, Brasil, Vietnã, Tanzânia, Indonésia, Moçambique e Guiné-Bissau. Em conjunto, estes países são responsáveis por 81% da produção mundial, média do período de 1995 a 1997. O Brasil contribui com 19% da produção mundial (FIGUEIREDO, 1998).

A área de plantio brasileira corresponde a aproximadamente 700.000ha. A região Nordeste responde por mais de 99% da área colhida e da produção nacional, com maiores concentrações principalmente nas faixas litorâneas e de transição do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte, que juntos possuem cerca de 88% da área de cultivo do país (IBGE, 1996).

Os produtos do cajueiro são a castanha e o pedúnculo ou pseudofruto. Este último, além do consumo *in natura*, dá origem a doces, bebidas, sucos e outros. Da castanha é possível se obter o líquido da casca da castanha (LCC), a película, rica em tanino, e o óleo da amêndoa, todos com diversas aplicações industriais e o principal produto econômico é a amêndoa da castanha de caju (ACC), de alto valor nutritivo, constituindo um produto de comércio mundial.

O Brasil ocupa lugar de destaque, sendo o terceiro maior exportador de castanha de caju, com cerca de 41 mil toneladas/ano, estando atrás da Índia, com 120 mil toneladas/ano e do Vietnã, com 50 mil toneladas/ano. A amêndoa é um produto de grande valor nas exportações da região Nordeste do Brasil, exportando cerca de 21% da produção anual que é de 165.200 toneladas, chegando a gerar divisas na ordem de 143 milhões de dólares segundo dados do IBGE (2003). Os principais consumidores são os Estados Unidos, Canadá, países da União Européia e alguns do Oriente Médio, que atualmente importam 90% das amêndoas brasileiras.

A indústria beneficiadora de castanha de caju emprega cerca de 20 mil pessoas e oferece em torno de 280 mil postos de trabalho no campo. Nas atividades agrícolas, a ocupação de pessoal está sujeita a sazonalidade, requisitando-se maior número de pessoas nas operações de colheita, contribuindo na geração de emprego na entressafra das principais culturas da região (LOPES NETO, 1997).

Para a obtenção da amêndoa da castanha de caju empregam-se três sistemas distintos: manual, semimecanizado e mecanizado. O elemento que determina a diferença entre os sistemas é a tecnologia utilizada na abertura da casca da castanha. Atualmente existem diversas máquinas de decorticação da castanha de caju, seja com alimentação automática ou manual, utilizando o impacto aleatório ou o cisalhamento da casca. Entretanto, o nível tecnológico, principalmente dos equipamentos utilizados pela indústria, tem provocado danos elevados às amêndoas, oscilando entre 40 a 50% do total beneficiado e o índice de amêndoas inteiras determina o valor do produto.

Os sistemas mais utilizados são decorticação por impacto, com uma grande capacidade operacional, mas que provoca elevados danos às amêndoas, e o sistema com lâminas, que obtém maiores índices de amêndoas inteiras, porém, possui baixa capacidade operacional.

Encontrar a correlação entre as propriedades mecânicas, o princípio de decorticação e as características peculiares do material, que torna-se a solução tecnológica mais eficiente, é um grande salto para desenvolver uma máquina de decorticação, que promova alta capacidade operacional, aliada a um alto rendimento de amêndoas inteiras e baixo índice de danificadas.

Dentro deste contexto, o presente trabalho propõe e investiga um princípio de decorticação para a obtenção de maior índice de amêndoas inteiras partindo de propriedades mecânicas da castanha ‘CCP 76’ para, então, desenvolver e construir o mecanismo decortificador, avaliando o seu desempenho em função de castanhas preparadas com combinação de diferentes níveis de tempo de umidificação e tratamento térmico próxima à faixa utilizada pela indústria.

O trabalho é apresentado na forma de artigos técnicos. O primeiro, intitulado “Caracterização da fragilidade do endocarpo e rigidez da amêndoa da castanha de caju ‘CCP 76’ antes e após o tratamento térmico” descreve a avaliação das propriedades mecânicas realizada no endocarpo e na amêndoa da castanha de caju. O segundo, intitulado “Deformação específica limite para o rompimento da casca da castanha de caju ‘CCP 76’ após tratamento térmico” discorre sobre a determinação da deformação específica limite necessária para o rompimento da casca e liberação da amêndoa. Os resultados obtidos nos dois primeiros são utilizados no desenvolvimento e avaliação do protótipo decortificador de cilindros rotativos,

apresentados no terceiro artigo, intitulado “Desenvolvimento e avaliação de protótipo para decorticação da castanha de caju por mecanismo de cilindros rotativos”.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos botânicos

O cajueiro encontra-se disperso em larga faixa do mundo tropical, compreendida entre os paralelos 27° N, no sul da Flórida, e 28° S, na África do Sul. Apesar da adaptabilidade a uma faixa ecológica relativamente ampla, as maiores concentrações situam-se em áreas costeiras, tipicamente tropicais, da América do Sul, África e Ásia, entre os paralelos 15° S e 15° N, não significando serem estas as melhores condições para seu desenvolvimento vegetativo e produções elevadas. Os limites de altitude favoráveis à planta estão correlacionados com a latitude, isto devido à sensibilidade da cultura às baixas temperaturas e às geadas. A maior concentração de cajueiros encontra-se nas regiões as quais apresentam altitude máxima de 600m (FROTA e PARENTE, 1995).

O principal centro de diversidade do gênero *Anacardium* é a região amazônica, que apresenta florestas úmidas, matas de galeria e cerrado, com um centro secundário de diversidade nos cerrados do Planalto Central. A maior diversidade de *Anacardium occidentale* L., única espécie cultivada e a de maior dispersão do gênero (MITCHELL e MORI, 1987), é no nordeste brasileiro (BARROS, 1991), onde pode ser encontrada em diversos ecossistemas, principalmente nas zonas costeiras, fazendo parte da vegetação de praias e dunas e nas formações de restinga (LIMA, 1986). Essa espécie encontra-se em quase todo mundo tropical (BARROS e CRISÓSTOMO, 1995). Toda discussão sobre sua origem fundamenta-se em provas circunstanciais, tais como, primeiras referências bibliográficas, distribuição geográfica, comportamento ecológico, padrões de variação da espécie, utilização humana e outras, que indicam o Brasil como centro de origem da espécie (SOARES, 1986 e BARROS *et al.* 1993),

O cajueiro pertence ao gênero *Anacardium*, é uma planta perene, flores andromonóicas, ou seja, seu sistema reprodutivo constitui-se de flores masculinas e hermafroditas, folhas coreáceas, simples, inteiras e alternas, com ramificações (BARROS e CRISÓSTOMO, 1995). Em geral, tem o caule com diâmetro superior a 20cm, erecto, com copa simétrica e na forma de umbela. O sistema radicular caracteriza-se por uma pivotante bem desenvolvida que pode ultrapassar a 10m de profundidade. Apresenta ainda um sistema lateral sub-superficial considerado muito importante para a planta (BARROS e MELO, 1987).

A posição sistemática do gênero *Anacardium*, de acordo com BAILEY (1942), esta na divisão *Spermatophyta*, na subdivisão *Angiospermae*, na classe *Dicotyledoneae*, na subclasse *Archichlamideae*, na ordem *Sapindales* e na família *Anacardiaceae*.

O fruto da castanha de caju é um aquênio reniforme preso à extremidade de um pedúnculo hipertrofiado (Figura 2.1), comumente chamado de maçã do cajueiro ou pseudofruto (JOHNSON, 1974). O fruto (castanha) completa seu desenvolvimento entre seis a oito semanas, após a polinização (WAIT e JAMIESON, 1986).



Figura 2.1 Vista dos frutos e pseudofrutos de um cajueiro anão precoce.

A castanha é composta por um epicarpo, mesocarpo, endocarpo, película (rica em tanino), e amêndoa (Figura 2.2). O mesocarpo é constituído de células esponjosas onde se localiza o LCC. O conjunto formado pelo do epicarpo, mesocarpo e endocarpo é chamado de pericarpo.



Figura 2.2 Parte de uma castanha de caju, após tratamento térmico em LCC, mostrando o epicarpo (a), mesocarpo (b), endocarpo (c) e amêndoa (d).

AGNOLONI e GIULIANI (1977) relataram que o florescimento geralmente coincide com o final da estação chuvosa, variando consideravelmente de país para país, de acordo com o hemisfério e a latitude. O período de florescimento se estende por vários meses, apresentando variação no tempo e no espaço, em função das condições edafoclimáticas predominantes (BARROS, 1988). Os cajueiros, no nordeste do Brasil, florescem continuamente ao longo de dois a três meses e, como as florações das árvores não são sincronizadas, não ocorrem simultaneamente, a colheita pode prolongar-se por um período de cinco a seis meses (JOHNSON, 1974).

O cajueiro pode se propagar vegetativamente (reprodução assexuada), mediante enxertia, ou por sementes (reprodução sexuada) com polinização predominantemente cruzada, efetuada por insetos, principalmente a abelha (BARROS e CRISÓSTOMO, 1995).

A reprodução por sementes gera uma planta, onde os seus frutos terão uma variabilidade maior em termos de tamanhos e uma baixa produtividade, quando comparados com plantas geradas pela reprodução assexuada.

2.2. Considerações gerais e preparação da castanha de caju para a decorticação

A industrialização do caju pode ser dividida em dois grupos: a indústria de beneficiamento da castanha e a indústria de transformação do pedúnculo. A primeira obtém amêndoa tendo como principais subprodutos o LCC, a casca, película e o óleo da amêndoa. A indústria da transformação do pedúnculo possui segmentos na indústria de bebidas, doces, condimentos, farinhas, ração, entre outros.

No beneficiamento da castanha de caju, as operações que antecedem a decorticação são: colheita, secagem, armazenagem, limpeza, classificação, umidificação, tratamento térmico e resfriamento. Estas são sucintamente descritas a seguir.

A secagem das castanhas é feita espalhando-se as mesmas em terreiros ou quadra de cimento, por um período que pode alcançar cinco dias ou até obter 7 a 9% de umidade, dependendo da região. As castanhas devem ser amontoadas, em camadas de até 30 cm de espessura, com revolvimentos pelo menos duas vezes por dia, sendo, no período da noite, coberta com lona ou plástico, para evitar re-umidificação pelas chuvas e proteger de agentes externos. PAIVA *et al.* (2000) relatam que, como a safra do caju é de curta duração, as indústrias formam estoques para trabalhar o ano todo.

É conveniente manter as castanhas limpas, livres de folhas, pedras, areia, pedaços de pedúnculo e outras impurezas, que são fonte de contaminação e aceleram a deterioração durante a armazenagem. A limpeza pode ser efetuada em peneiras manuais ou em chapas perfuradas utilizadas para a classificação.

A classificação consiste em separar as castanhas por tamanho, em chapas perfuradas de calibres diversos. Essa etapa é importante para o tratamento térmico, submetido às castanhas antes da decorticação, permitindo penetração uniforme de calor para decorticação em máquinas que são reguladas para determinado tamanho de castanha. Os mesmos autores relatam que a classificação pode ser feita com cilindro rotativo, ou com peneiras manuais de malha de arame, ou chapas perfuradas.

A castanha depois de seca, limpa e classificada, pode ser armazenada por mais de um ano. O armazenamento em sacos é mais recomendável, que devem ser empilhados sobre estrados, em local arejado, limpo e seco. As pilhas de sacos devem ficar afastadas uma das outras para permitir a circulação de ar.

A pesagem permite melhorar o controle do estoque e a qualidade da matéria-prima armazenada, uma vez que pode indicar processo de re-umidificação da castanha, evitando perdas do produto estocado.

Atualmente utilizam-se, no Brasil, dois procedimentos para o tratamento térmico na castanha de caju. O primeiro com vapor d'água a 110° C através de autoclave, por 10 minutos. O outro, um banho no LCC a 210°C por um tempo médio de 150s. Neste último faz-se necessário uma umidificação dos lotes das castanhas a serem beneficiadas. O tempo de umidificação, de residência no LCC e a temperatura a serem utilizados variam em função do tamanho, procedência e período da safra das castanhas. Após tratamento térmico, as castanhas são colocadas em local arejado, para o seu resfriamento e eliminação do excesso de líquido, facilitando a sua decorticação. Esta operação pode ser realizada de duas maneiras: para o tratamento térmico feito em sistemas caseiros (sem pressão), o resfriamento e secagem são feitos em lugar arejado, levando até 6 horas. Já no tratamento térmico sob pressão, as castanhas ficam dentro da autoclave por 20 minutos e depois são retiradas e resfriadas por cerca de 2 horas.

Para o tratamento térmico em banho de LCC as castanhas seguem para a retirada do excesso superficial do LCC em centrífugas e logo após passam por um período de duas horas resfriando. Este tipo de tratamento térmico é utilizado pela indústria brasileira de beneficiamento da castanha de caju.

Na Índia, é usado o método do tambor rotativo incandescente para preparação das castanhas para a decorticação, onde se dá a perda total do LCC, ou então o banho em LCC quente, quando uma boa parte do líquido é retirada antes da decorticação.

O tratamento térmico da castanha de caju tem por objetivo: o endurecimento da casca, tornando-a frágil, para permitir a decorticação por impacto utilizado pela indústria.

MEDINA *et al.*, (1978) comentam que o beneficiamento da castanha de caju enfrenta algumas dificuldades. A primeira delas é a consistência coriácea do pericarpo, que não permite a sua quebra por percussão sem antes passar por um tratamento prévio e segundo é a presença do LCC, cáustico, de ação vesicante, presente no mesocarpo. Este líquido não deve contaminar a amêndoa.

Como já foi dito, antes da decorticação a castanha de caju passa por diversas etapas, como secagem, classificação, umidificação, até chegar ao tratamento térmico que visa

fragilizar a casca facilitando a sua decorticação. O controle de todas essas etapas, antes da decorticação, aliado a um decortificador adequado favorece um beneficiamento eficiente, implicando, em bons rendimentos de amêndoas inteiras. Após a decorticação a amêndoa da castanha de caju passa por diversos processos, como secagem, despêliculagem, classificação e embalagem, no entanto, estas etapas, não serão estudados neste trabalho.

2.3. Teor de água

A qualidade do produto agrícola beneficiado está diretamente ligado ao percentual do teor de água presente durante o seu armazenamento. Segundo RUSSEL (1969) a castanha de caju “in natura”, deve ser armazenada nos galpões, com umidade inferior a 9%. LOPES NETO (1972) recomenda umidade de 6,5% e CORREIA (1963) entre 10 e 12%. PAIVA *et al.* (2000) relatam que as castanhas devem ser armazenadas com uma umidade entre 7% e 9% para que não haja contaminação por fungos.

A umidade ideal das castanhas antes do tratamento térmico em banho de LCC é de 11 a 12% (FIGUEIREDO, 1998; SILVA, 1998).

OLOSO e CLARKE (1993) estudando o efeito da umidade na decorticação da castanha de caju observaram que, o aumento da umidade provoca uma maior deformação de ruptura e um aumento na energia absorvida no ponto de ruptura.

LIANG (1980) relata que a umidade influi na eficiência do decortificador de noz macadâmia.

ARAÚJO (1999) relata que o teor de água em produtos agrícolas influi na eficiência de máquinas beneficiadoras de amendoim.

Após o tratamento térmico em banho de LCC, ocorre uma redução do teor de água da castanha de caju, tornando-a mais frágil e fácil de romper. Quanto maior a umidade da castanha, maior será a viscoelasticidade do material e conseqüentemente mais difícil a ruptura da casca.

2.4. Princípios e rendimentos dos mecanismos utilizados para decorticação da castanha de caju e outras nozes

Sistemas decortecedores utilizados para a castanha de caju

Atualmente os mecanismos existentes no mercado são: o que utiliza lâminas, classificado como semimecanizado e mecanizado, rompendo a casca por tração; e o que utiliza a força de impacto, podendo ser manual ou mecanizado.

Uma forma rudimentar de romper a casca da castanha, bastante utilizada na Índia, é através de martelo. A castanha é apoiada manualmente em cima de um tampo de madeira e recebe um impacto direcionado como ilustrado na Figura 2.3.

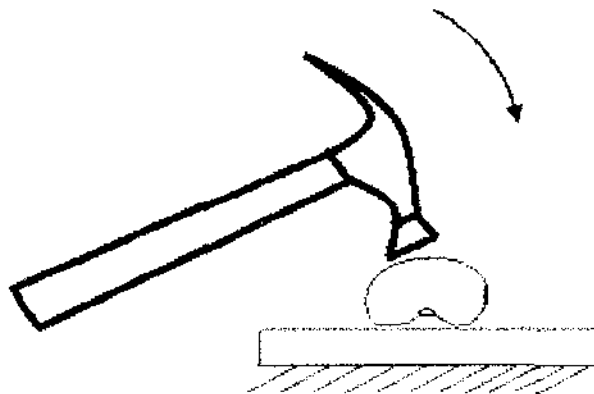


Figura 2.3. Representação esquemática da decorticação da castanha de caju através de martelo

No sistema semimecanizado a decorticação é feita em um equipamento com alavanca manual e um pedal, ou em grandes sistemas mecanizados. Tais máquinas são dotadas de lâminas curvas, acompanhando o contorno da castanha. Uma representação esquemática do mecanismo que rompe por cisalhamento com lâminas pode ser observado na Figura 2.4 A e B.

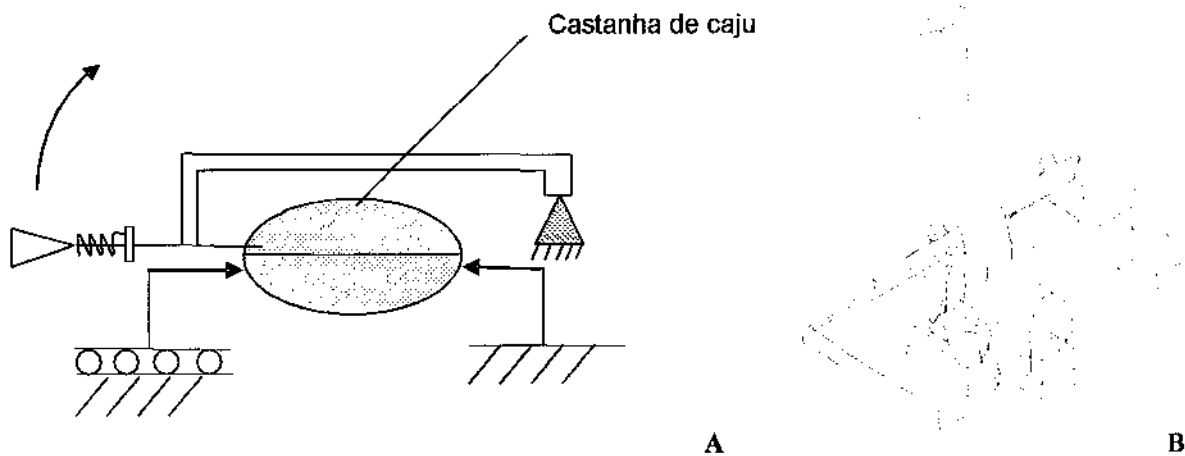


Figura 2.4. Representação esquemática da decorticação da castanha de caju com lâmina (A) e a máquina utilizada para a decorticação (B)

SOARES (1986) relata que no sistema semimecanizado o rendimento de amêndoas inteiras é de 95%. Um operário experiente consegue de 3,2 a 3,4 kg de amêndoas inteiras por hora de trabalho.

O mecanismo utilizado pela indústria brasileira na decorticação da castanha por impacto aleatório é observado na Figura 2.5.

No sistema de decorticação por impacto (Figura 2.5), as castanhas deslizam através de uma canaleta e encontram um disco com alta rotação e são então, lançadas contra a parede da máquina onde ocorre o impacto e conseqüentemente ruptura da casca. No sistema mecanizado as castanhas são arremessadas por um disco giratório regulado entre 1200 e 1800rpm a uma velocidade de 250 km/h contra placa plana (CORREIA, 1963).

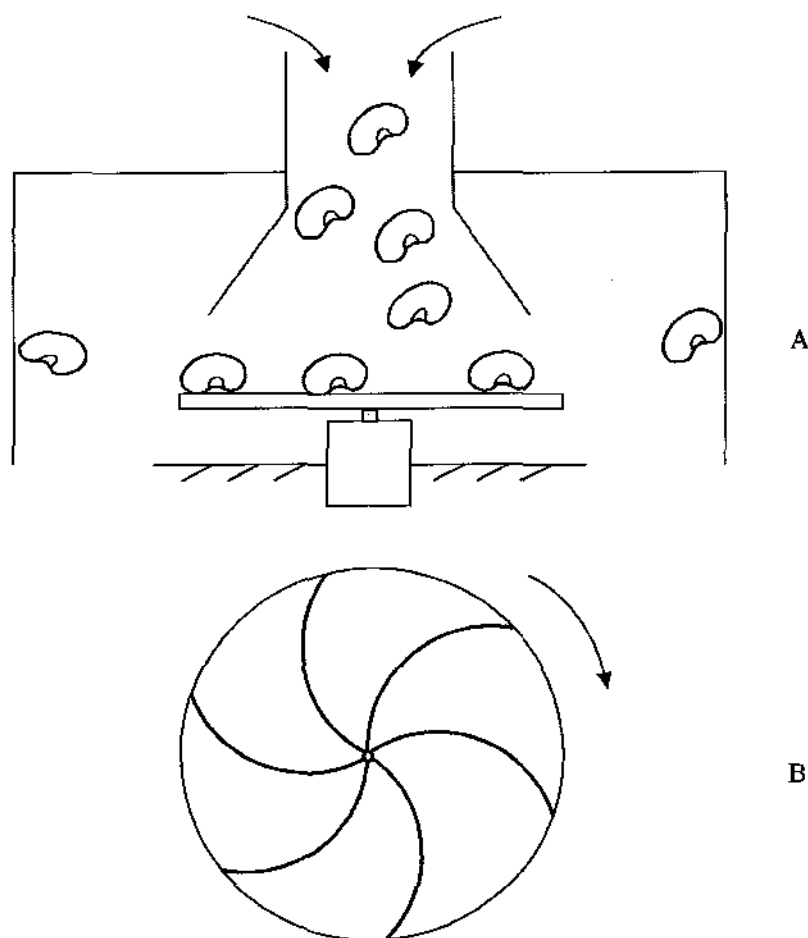


Figura 2.5. Representação esquemática da decorticação da castanha de caju por impacto aleatório mostrando o fluxo de castanhas no mecanismo (A) e o disco que arremessa as castanhas (B)

Os sistemas mecanizados mais conhecidos são o Cashco, japonês, e o Oltremare, italiano, ambos utilizando lâminas para a decorticação da castanha, e o Sturtevant, de origem inglesa, rompe a casca da castanha por impacto. No Brasil, utiliza-se um sistema mecanizado adaptado do sistema Sturtevant.

JAIN e KUMAR (1997) desenvolveram uma máquina de processamento de castanha de caju, cujo princípio de funcionamento é o cisalhamento da casca através de dois discos, um móvel e o outro fixo. O acionamento da máquina é feito por um motor elétrico de 2cv com uma rotação de 1500rpm. Após teste de avaliação concluíram que a capacidade da máquina é

de 18 kg/dia operando a 320rpm com uma eficiência de decorticação de 70%, sendo 50% de amêndoas inteiras e 28% de amêndoas danificadas.

No sistema italiano (Oltremare) as máquinas de corte são operadas individualmente e obtém-se um rendimento médio por máquina de 20 kg/h de castanhas descascadas (CASSADIO, 1971). O mesmo autor comenta que a decorticação pelo sistema Oltremare gera um rendimento de 90 a 95% em amêndoas inteiras após a decorticação e 65 a 70% no final do processo (embalagem). No sistema Inglês (Sturtevant), tais rendimentos são, respectivamente, 75% e 50 a 55%.

SILVA (1998) comenta que no sistema mecanizado, o rendimento de amêndoas inteiras, em relação à quantidade total de amêndoas beneficiadas, pode chegar a 75%, após a decorticação e de 55% a 60% no final do processo. FRANÇA (1991) afirma que os empresários brasileiros consideram o sistema mecanizado economicamente viável.

Nos sistemas mecanizados por impacto a porcentagem de amêndoas inteiras em relação às quebradas é em torno de 50 a 55% (LEITE, 1994).

MONTEIRO (1984) desenvolveu e patenteou um protótipo industrial de uma máquina decortadora de castanha de caju com serras circulares de alta rotação, que tem uma capacidade operacional de 36 kg/h ou 120 castanhas por minuto, com um peso médio de 5g. Após testes de decorticação, com 70 toneladas de produto, apresentou um rendimento de amêndoas inteiras de 97%, no final do processo de 86,15%.

Pelo sistema manual, o operário consegue em 8 horas de trabalho, uma média de 7kg de amêndoas inteiras, ou 28kg de castanhas fritas ou 31,5kg de castanhas cruas por dia, a uma velocidade de 10 castanhas por minuto (RUSSEL 1969).

CASSADIO (1971) comenta que o sistema Oltremare processa 90 castanhas por minuto e sua alimentação é manual, obtendo-se um rendimento de 90 a 95% em amêndoas inteiras após o descasque e 65 a 70% após a despêculagem. Quando se automatiza essa alimentação o rendimento de amêndoas inteiras cai cerca de 10%.

O sistema Sturtevant, que utiliza a força centrífuga para o rompimento da casca da castanha de caju, tem rendimento variável. Foi projetado para uma taxa de alimentação máxima de 270 kg/h de castanhas. Com uma taxa de alimentação de 216kg de castanhas/hora, obteve-se 80% de amêndoas inteiras, e quando alimentada a uma taxa de 271 kg de castanha /hora, o rendimento caiu para 70 a 73% (COWARD, 1971).

A abertura da casca da castanha de caju pelo sistema Sturtevant (impacto) ocorre na linha de colagem natural dos cotilédones (DUVERNEUIL e HAENDLER, 1973).

COSTA (2001) construiu e avaliou um protótipo de uma decortadora de castanha de caju, semi-automática, com três solenóides. Um dos solenóides é responsável pelo corte da castanha através de lâminas que penetram no epicarpo entre 3 e 4mm, estas lâminas são conectadas ao solenóide por intermédio de mecanismo de barras que serve como amplificador de força. Os outros dois solenóides são responsáveis pela separação das partes cortadas da castanha. A decorticação é de duas castanhas por acionamento. Após avaliação obteve-se um rendimento em amêndoas inteiras de 72,5% e 22,5% de amêndoas danificadas.

Os rendimentos em amêndoas inteiras, verificados nos trabalhos, mostram que existem poucos estudos destinados à compreensão das causas de rendimentos tão baixos, perdas na ordem de 40 a 50%. Apesar da variedade das abordagens e mecanismos propostos às perdas continuam altas. Muitos dos mecanismos propostos não são funcionais, logo caem em descrédito ou são pouco usados. Outros têm um custo de aquisição muito alto com uma manutenção complexa.

Sistemas decortadores utilizados para a noz macadâmia

LIANG (1977) construiu e testou uma máquina de abertura da noz macadâmia, cujo princípio do mecanismo é a quebra da casca por baixa compressão. Os mecanismos são compostos por dois pequenos rolos, dois grandes rolos e um pequeno e grande rolo acoplado a uma placa estacionária. Os rolos pequenos têm por objetivo melhorar a qualidade de quebra.

Continuando os estudos nesta linha de quebradores de nozes macadâmia LIANG (1980) desenvolveu uma máquina de extração da noz de diversos tamanhos, através de rolos convergentes e cuja compressão era controlada.

TANG *et al.* (1982) estudaram a deformação necessária para a romper diversos tamanhos de noz macadâmia. A abertura de cada noz era feita através de rolos que submetiam cada noz a diferentes taxas de deformação.

RODRIGUES (1996) Pesquisou a utilização de indentes cônicos para a abertura da noz macadâmia. O desempenho dos indentes foi avaliado pelo nível de carga de atuação, pelo

grau de fracionamento da casca e pelo dano mecânico causado a amêndoa. A variação da deformação específica ($7,7\% < \varepsilon < 9,5\%$) e o comportamento em termos de quebra da noz tiveram pouca influência quando se utilizou impacto associado a tensões concentradas. O processo de abertura da noz macadâmia com indentes indicou que existe uma relação entre casca em metade e obtenção de amêndoas inteiras.

O conhecimento dos mecanismos de cilindros paralelos para a obtenção da noz macadâmia fornece subsídios para uma análise de viabilidade técnica da utilização desse sistema para a decorticação para a castanha de caju.

Em suma, estes trabalhos mostram que a limitação da deformação pode ser uma alternativa para decorticar a castanha de caju.

2.5. Característica do material biológico

2.5.1. Aspectos viscoelásticos

O comportamento da maioria dos materiais é descrito, considerando-se pequenas deformações, pela Lei de Hooke da elasticidade linear expressa, em uma dimensão através da equação

$$\sigma_{ij} = E \cdot \varepsilon_{ij} \quad (01)$$

Onde E representa o módulo de elasticidade, σ a tensão e ε a deformação específica.

Na realidade todos os materiais desviam da lei de Hooke de várias maneiras, por exemplo, ao exibir comportamento elástico não linear e dependência temporal. **Materiais viscoelásticos** são aqueles para os quais as relações tensão-deformação dependem do tempo. Sólidos **anelásticos** constituem uma subclasse dos viscoelásticos, pois apresentam configuração única de equilíbrio de forma a se recuperar totalmente após a remoção da carga transiente.

Associa-se a materiais viscoelásticos um aumento da deformação ao longo do tempo, quando se mantém a tensão constante. Já para uma deformação constante, a tensão decresce

com o tempo. Quando se aplicam cargas cíclicas tem-se uma histerese, com dissipação de energia. A rigidez efetiva depende da taxa de aplicação da carga.

Todos os materiais exibem alguma resposta viscoelástica. Em metais comuns como, aço, alumínio, quartzo à temperatura ambiente e pequenas deformações, o comportamento não se desvia muito da elasticidade linear. Polímeros sintéticos, madeira, tecido humano, assim como, metais a altas temperaturas mostram efeitos viscoelásticos significativos. Em algumas aplicações mesmo com uma pequena resposta viscoelástica pode ser significativo. Para serem completos, a análise ou projeto, deve contemplar o estudo do comportamento viscoelástico. O conhecimento da resposta viscoelástica de um material é baseada em medidas. A formulação matemática da teoria da elasticidade permite previsões da resposta do material a uma história arbitrária de carregamento (Anotações de aulas).

Para os materiais viscoelásticos o equacionamento pode ser expresso da seguinte forma:

$$\sigma_{ij}(t) = f(\varepsilon(t), E(t), \nu(t), G(t), K(t)) \quad (02)$$

Onde ε a deformação específica, E representa o módulo de elasticidade, ν o coeficiente de Poisson, G o módulo de elasticidade transversal e K o módulo volumétrico. Todas dependentes do tempo.

A expressão do relacionamento viscoelástico em termos das funções em função do tempo $\varepsilon(t)$, $E(t)$, $\nu(t)$, $G(t)$ e $K(t)$, caracterizam o comportamento mecânico do material viscoelástico, da mesma forma que as constantes elásticas caracterizam o material elástico.

As respostas para materiais viscoelásticos podem ser expressas através das funções **fluência** ($\psi(t)$) e **relaxação** ($\phi(t)$). O relacionamento de $\psi(t)$ e $\phi(t)$ com $\varepsilon(t)$, $E(t)$, $\nu(t)$, $G(t)$ e $K(t)$ é simples.

O comportamento elástico pode ser diferenciado do viscoelástico através de *ensaios* simples. Um ensaio uniaxial conduzido em corpos de prova a diferentes taxas de deformação ($\dot{\varepsilon}_{11}$) ou de tensão ($\dot{\sigma}_{11}$), indicará a variação de E e das outras constantes elásticas, devido à dependência do tempo, caso o material exiba comportamento viscoelástico. A não dependência do tempo e, portanto, a ocorrência de comportamento elástico será notada quando

E e as demais constantes elásticas mantiverem valores constantes. Apresenta-se na Figura 2.6 um gráfico comparativo (Anotações de aulas).

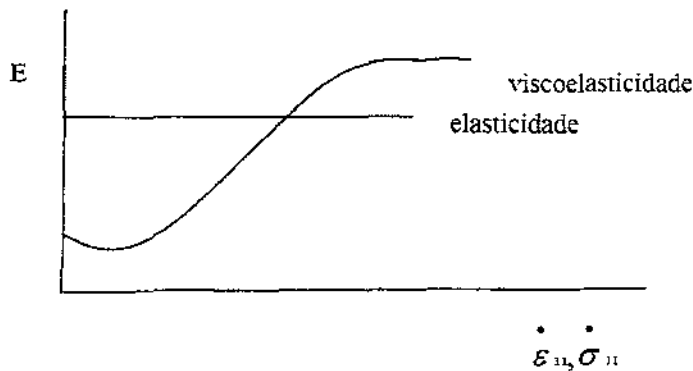


Figura 2.6. Ilustração da variação do módulo de elasticidade para resposta elástica e viscoelástica.

Uma outra maneira de se evidenciar o comportamento viscoelástico é através de ensaio dinâmico uniaxial com imposição de tensão ou deformação específica como uma função periódica do tempo para gerar respostas, respectivamente, em termos de deformação específica e tensão. Em se tratando de comportamento elástico, excitação e resposta serão imediatas. No caso do comportamento viscoelástico a resposta será defasada (**time lag**) conforme ilustra a Figura 2.7.

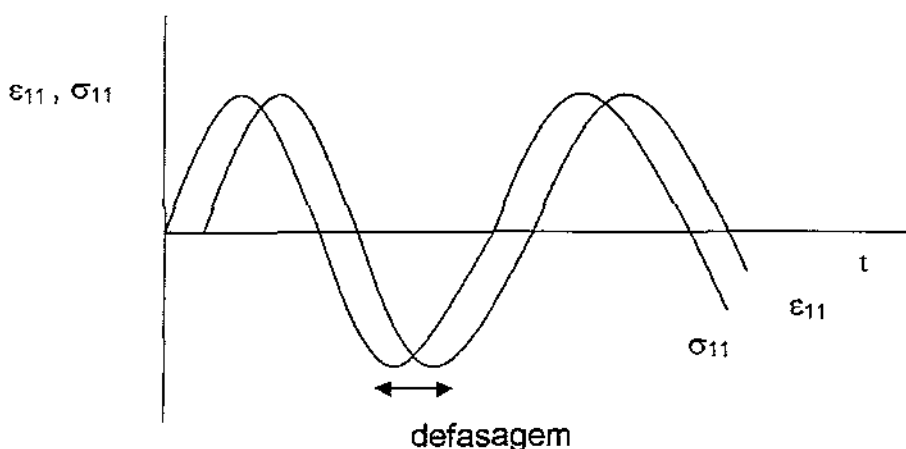


Figura 2.7. Ilustração da excitação e resposta sinusoidais características de um material viscoelástico.

2.5.2. Teorias de ruptura

O material vegetal possui o ponto de ruptura próximo ao limite elástico, no entanto, é considerado, homogêneo, isotrópico e contínuo, sendo então possível aplicar as teorias clássicas de ruptura descritas por PRAGUER (1959). Sabe-se que a componente hidrostática do tensor *tensão* não provoca ruptura (MENDELSON, 1965). Materiais não homogêneos exibem diferentes valores de ruptura em tração e compressão.

As teorias de ruptura são classificadas de acordo com os critérios considerados sejam eles *energia* (*Teoria da energia da deformação específica constante e da energia de distorção*), *tensão* (*Teoria de tensão normal e de cisalhamento máxima entre outras*) ou *deformação* (*Teoria da máxima deformação e da deformação máxima de cisalhamento*).

O espaço geométrico estabelecido por todas as teorias de ruptura pode ser representado por uma figura sólida, conhecida como hiper espaço de Higher - Westergaard. Esse espaço é formado pelos eixos das tensões principais tendo o eixo hidrostático como mediatriz, ou seja, passando pela origem do sistema de forças.

SEGERLIND e DAL FABBRO (1978) em estudo com espécimes de maçãs verificaram que a ruptura ocorria quando se ultrapassava a deformação normal máxima.

Espera-se também, romper a casca da castanha de caju pela condição de deformação normal máxima. O conhecimento destes parâmetros implica em um diferencial substancial para o projeto de máquinas.

2.6. Impacto entre corpos

O impacto entre dois corpos é caracterizado por forças relativamente grandes em curto espaço de tempo. A linha perpendicular ao plano de contato entre os dois corpos é chamada de linha de impacto. Se o centro de gravidade dos corpos estiver na linha de impacto este será chamado de impacto central, caso contrário impacto excêntrico. Se o momento linear dos corpos estiver direcionado ao longo da linha de impacto, o mesmo será chamado de colinear, caso contrário, oblíquo. Durante a colisão a energia cinética é absorvida pela

deformação dos corpos. Quando a restauração da energia de deformação for completa o impacto é considerado elástico e quando não, plástico (BAUMEISTER *et al.*, 1978).

Um impacto elástico é caracterizado pela simetria da curva força versus tempo, conforme MOHSENIN (1970). Mas, o impacto plástico é caracterizado pela assimetria dessa mesma curva, de acordo com a Figura 2.8.

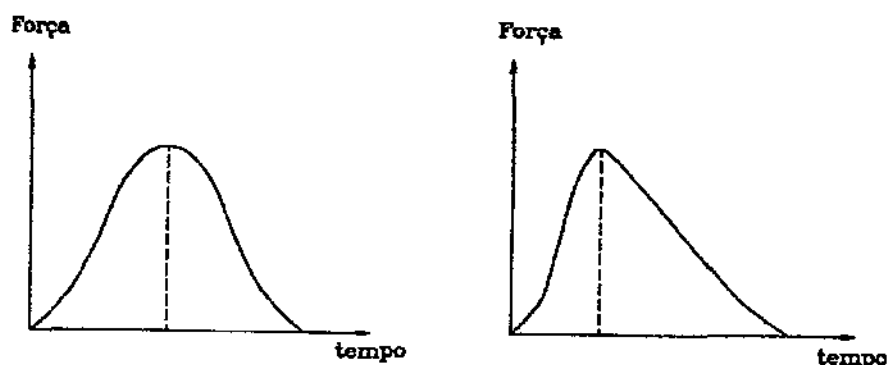


Figura 2.8. Curvas característica do impacto elástico e plástico.

Além disso, pode-se dividir o impacto entre dois corpos em quatro fases distintas. A primeira é a deformação elástica inicial, em que os corpos se comportam segundo a teoria elástica de Hertz. A segunda fase é o início da deformação plástica onde se tem um tempo de duração muito curto e nela, parte da energia dos corpos será absorvida por deformações plásticas. Essa fase é considerada elástica-plástica. A terceira é a de deformação completamente plástica, onde toda deformação que ocorrer permanecerá após a colisão. E a quarta é a recuperação elástica, na qual será liberado todo o *stress* elástico armazenado nos corpos (TIMOSHENKO e GOODIER, 1970).

Um corpo que colide contra uma superfície rígida, terá parte de sua energia cinética absorvida por uma deformação plástica. Essa variação na energia cinética causará uma diferença entre a velocidade ou altura final e inicial.

Assim, pode-se definir o coeficiente de restituição (e'), como:

$$e' = \frac{v_f}{v_i} \quad (03)$$

Onde v_f – velocidade final

v_i – velocidade inicial

ou:

$$e' = \left(\frac{h_f}{h_i} \right)^{1/2} \quad (04)$$

Onde h_f – altura final

h_i – altura inicial

A variação de energia cinética será dada por:

$$\Delta Energia = \frac{mv_i^2(e'^2 - 1)}{2} \quad (05)$$

Onde m – massa do corpo

v_i – velocidade inicial

e'^2 – coeficiente de restituição

2.7. Microscopia eletrônica de varredura

Uma das formas de se entender o comportamento dos materiais biológicos é através do conhecimento de sua estrutura, isto é, do arranjo espacial dos elementos estruturais e suas interações (HEERTJE, 1999).

A microscopia é uma das técnicas mais apropriadas para uma avaliação das mudanças na textura e estrutura de materiais biológicos submetidos a um processamento (KALÁB *et al*, 1995).

SCHOONMAM *et al*, 2001 relata que a porosidade da estrutura dos materiais tem um efeito significativo nas suas propriedades mecânicas, tais como, tensão, deformação, dureza e resistência. A microestrutura dos sólidos pode ser influenciada pelas condições a que foram submetidas, de temperatura ou umidade resultando em ruptura, cristalização e tenacidade.

O uso de imagens de microscopia para identificar possíveis alterações na estrutura da castanha de caju será mais uma técnica utilizada para um melhor entendimento das mudanças estruturais sofridas pela castanha após o tratamento térmico.

3. ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DA FRAGILIDADE DO ENDOCARPO E RIGIDEZ DA AMÊNDOA DA CASTANHA DE CAJU ‘CCP 76’ ANTES E APÓS TRATAMENTO TÉRMICO

3.1. Introdução

A castanha de caju *in natura* apresenta características viscoelásticas que dificultam a sua decorticação. Para alterar essas características utiliza-se da umidificação e um tratamento térmico que tornam a casca mais frágil e, portanto, mais fácil de romper com aplicação de uma pequena deformação. O tratamento térmico, no entanto, não deve afetar a amêndoa, evitando o seu escurecimento e conseqüente depreciação.

O tratamento térmico, através do banho das castanhas no LCC em alta temperatura, realizado na indústria de beneficiamento, tem como objetivos, além de tornar a casca frágil, promover uma folga (espaço) entre casca e amêndoa. Os parâmetros de controle mais importantes envolvidos no tratamento térmico são a umidade, temperatura e o tempo de residência. As transferências de calor e massa no processo são muito complexas e, devido à geometria e distribuição irregular de massa da castanha, fica difícil obter um tratamento térmico uniforme. Assim, as extremidades se aquecem mais rapidamente que o restante da amêndoa. Uma situação ideal seria a de um corpo perfeitamente esférico onde as trocas de calor ocorreriam de maneira uniforme.

PERSSON (1987) levanta a hipótese que a ruptura do material fibroso ocorre quando a tensão de cisalhamento excede o valor crítico. Esta tensão na parede fibrosa pode ser ocasionada pela combinação de tensão de tração na direção da fibra, e da tensão de compressão na direção perpendicular a fibra. OLOSO e CLARKE (1993) estudando alguns aspectos das propriedades mecânicas da castanha de caju, concluíram que a deformação de ruptura e a energia absorvida no ponto de ruptura aumentavam com o acréscimo do teor de água de castanhas tratadas termicamente no LCC a 190°C por 150s.

Embora as propriedades mecânicas do endocarpo e da amêndoa tenham grande relevância no processo de decorticação, estas têm sido pouco estudadas. A determinação

destas propriedades favorece uma adequação do processo térmico, bem como, fornece subsídios para concepção de projetos de máquinas.

Quando se projetam mecanismos decorticadores baseados na compressão a uma dada deformação específica, alguns fatores devem ser considerados, dentre eles: as alterações nas dimensões das castanhas devido ao tratamento térmico; a fragilidade da casca; a rigidez da amêndoa; e a deformação imposta no momento da decorticação, uma vez que o espaço existente entre casca e amêndoa é, via de regra, muito reduzido.

Com base no exposto, este trabalho teve como objetivos: comparar as variações das principais dimensões, massa e volume da castanha antes e após tratamento térmico; avaliar o efeito do tratamento térmico, através das propriedades mecânicas do endocarpo e amêndoas, apontando para o melhor tratamento térmico; e ilustrar possíveis alterações na estrutura do endocarpo, antes e após o tratamento térmico, através de imagens de microscopia eletrônica de varredura.

3.2. Metodologia

Umidificação e tratamento térmico da castanha de caju: preliminares

Ensaio preliminares foram realizados tomando como base dados fornecidos pela indústria brasileira de beneficiamento da castanha de caju, para estabelecimento dos tempos de umidificação e de residência no LCC para a castanha ‘CCP 76’.

Foram separados diversos lotes de 25 castanhas de tamanho médio submetendo-os a umidificação e tratamento térmico no LCC em vários intervalos de tempo, com o objetivo de determinar o tratamento mais adequado para a castanha. Em seguida, avaliaram-se os referidos lotes visualmente, pela cor da amêndoa, observando se o tratamento térmico tinha sido excessivo a ponto de comprometer a sua qualidade. Metodologia semelhante é aplicada na indústria de beneficiamento. Os valores encontrados para umidificação foram de 86 horas e 150s para o tempo de residência no LCC a 210°C. Estes valores foram utilizados como ponto central do planejamento experimental.

Planejamento experimental

Aplicou-se a metodologia de superfície de resposta (BARROS NETO *et al.* 2002), para estudar o efeito combinado do tempo de umidificação e tempo de residência no LCC. A resposta para identificar o melhor tratamento térmico para a castanha de caju, foi avaliada através de índices de fragilidade do endocarpo ao cisalhamento, quantificando-se a força máxima, deformação específica correspondente e energia de deformação. Os efeitos na amêndoa foram avaliados pela resistência à penetração, através de avaliação de força máxima e energia de deformação.

O delineamento experimental escolhido foi o fatorial 2^2 , com 3 pontos na região central e 4 pontos axiais, totalizando 11 pontos experimentais. Os valores experimentais para os níveis das variáveis do tempo de umidificação e tempo de residência no LCC são mostrados na Tabela 3.1. A ordem dos fatores foi aleatória.

Tabela 3.1. Variáveis codificadas e decodificadas do planejamento experimental para avaliação do efeito combinado de umidificação e tratamento térmico submetido a castanha de caju 'CCP 76'

Ensaio	Codificado		Decodificado	
	Tu	Tr	Tu (h)	Tr(s)
1	-1	-1	79	135
2	1	-1	93	135
3	-1	1	79	165
4	1	1	93	165
5	0	0	86	150
6	0	0	86	150
7	0	0	86	150
8	-2	0	72	150
9	2	0	100	150
10	0	-2	86	120
11	0	2	86	180

Tu – tempo de umidificação e Tr – Tempo de residência no LLC a 210°C

Este tipo de planejamento estatístico gera um modelo quadrático onde o valor das variáveis dependentes Y (força máxima, deformação específica e energia) é função das

variáveis independentes (tempo de umidificação e tempo de residência no LLC a 210°C), conforme descreve a equação 3.1.

$$Y = \varphi (Tu, Tr) = \beta_0 + \beta_1 Tu + \beta_2 Tr + \beta_{11} Tu^2 + \beta_{22} Tr^2 + \beta_{12} Tu Tr \quad 3.1$$

Os pontos centrais servem para estimar o erro experimental e determinar a precisão da equação polinomial. Os pontos axiais ($\pm\alpha$) são utilizados para a ampliação do modelo linear, tornando-o modelo quadrático.

Os modelos de regressão foram gerados através do software STATISTICA 6.0, sendo considerado preditivo o modelo com regressão significativa ao nível de 95% de confiança, falta de ajuste não significativa ao mesmo nível de confiança e alto valor de R^2 (BARROS NETO *et al.* 2002).

Como resultado, o *efeito estimado*, indica o quanto cada fator influi nas respostas estudadas. Quanto maior é o seu valor maior é a influência, e um efeito de sinal positivo indica que ao passar de um valor mínimo a um valor máximo da variável, a resposta aumenta. Contrariamente, um efeito de sinal negativo indica que ao passar de um valor mínimo para o valor máximo, a resposta diminui.

O planejamento estatístico indicará uma região de máximo ou de mínimo na resposta, em função do tempo de umidificação e de residência no LCC, ou seja, a região na qual as características mecânicas do material apontem para o que se deseja. A superfície de resposta pode proporcionar uma economia de tempo ou redução de custo no processo de beneficiamento da castanha de caju para a indústria. Resultados iguais na mesma região poderão sugerir um ponto de ótimo visando minimizar os custos e o tempo gasto no processo de beneficiamento.

Após esta análise, procedeu-se a uma comparação de médias entre os diversos tratamentos e o material *in natura* (testemunha) pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A escolha do melhor parâmetro (força máxima, deformação específica ou energia), a ser utilizada na caracterização da fragilidade do endocarpo e rigidez da amêndoa da castanha de caju foi feita em função do menor coeficiente de variação apresentado.

Procedimentos para umidificação e tratamento térmico das castanhas de caju

Após a identificação do ponto central para a umidificação e tratamento térmico, procedeu-se à preparação dos lotes para a determinação da umidade, caracterização dimensional, medidas de massa, assim como, volume e ensaios mecânicos.

Utilizaram-se castanhas de tamanho médio do clone ‘CCP 76’ fornecidas pela Embrapa – Agroindústria Tropical, Fortaleza – CE.

Os lotes de vinte e cinco castanhas *in natura* foram imersos em água, em recipiente fechado, por período de 2 horas. Em seguida, drenou-se a água e as castanhas foram colocadas em recipiente hermético por um período de repouso durante 86 horas para a umidificação (Figura 3.1). Após este tempo foram submetidas ao tratamento térmico em LCC à 210°C (Figura 3.2), por 150s, utilizando-se uma ‘fritadeira’ elétrica comercial Croydon, modelo F1B-200000-A0 com capacidade de 4,5 litros, que se mostrou adequada para a preparação de pequenos lotes. Para medir o tempo de residência no LCC utilizou-se um cronômetro digital Casio modelo HS10W.



Figura 3.1. Castanhas de caju, em repouso num recipiente hermético, durante a umidificação.



Figura 3.2. Tratamento térmico de lote de castanhas de caju em fritadeira elétrica (A), com termômetro de mercúrio para acompanhamento das variações de temperatura (B).

Dimensões, massa e volume das castanhas de caju antes e após tratamento térmico

Para identificar possíveis variações nas dimensões, massa e volume das castanhas foram realizadas medidas antes e após o tratamento térmico, através de paquímetro digital (DIGIMESS) com resolução centesimal e balança com 0,1g de precisão. As dimensões consideradas da castanha tais como o comprimento, largura e espessura, são representadas, esquematicamente, na Figura 3.3.

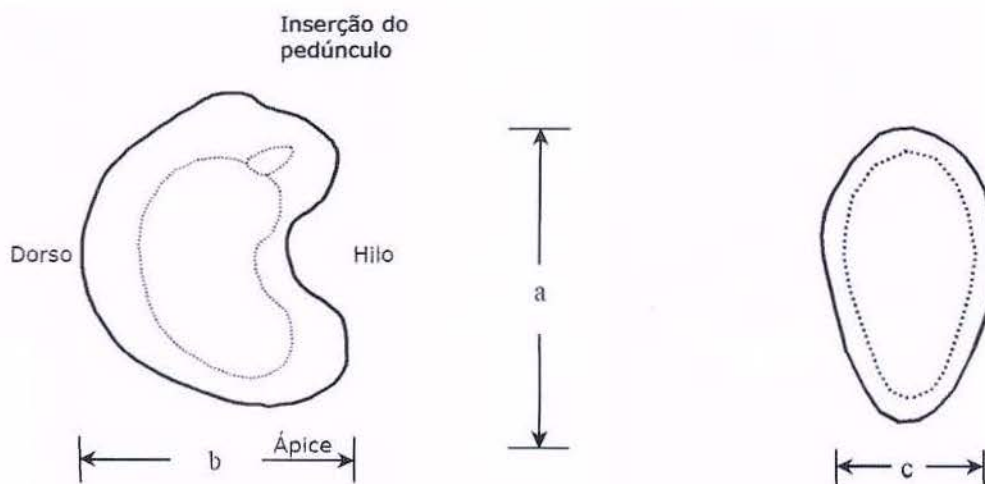


Figura 3.3. Dimensões características da castanha de caju. Comprimento (a), largura (b) e espessura (c)

É ilustrado na Figura 3.4 o arranjo experimental utilizado para mensurar o volume de trinta castanhas antes e após o tratamento térmico. Cada castanha foi perfurada com um arame de aço pela inserção do pedúnculo e introduzida, com o auxílio de uma haste de altura regulável, em recipiente contendo quantidade conhecida de água. Mediu-se, então, a massa de cada castanha submersa, através das leituras da balança, calculando-se o seu respectivo volume pela relação de densidade (MOHSENIN, 1970). Para valores de densidade da água considera-se a sua temperatura. Em seguida, as castanhas passaram por 86h de repouso, em processo de umidificação e 150s de residência em LCC a 210°C repetindo-se o procedimento para determinação do volume.



Figura 3.4. Arranjo experimental para identificar as alterações de volume (A) com detalhe para a castanha submersa em água (B).

Determinação do teor de água

Para a determinação do teor de água das castanhas utilizou-se inicialmente a metodologia proposta por OLOSO e CLARKE (1993) com estufa de ar forçado e temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$, até atingir peso constante, sem trituração do material. No entanto, observaram-se grandes oscilações de peso no acompanhamento diário e a metodologia foi considerada inadequada. Optou-se, então, pela metodologia proposta por MELO *et al.* (1998), utilizando-se a temperatura de 65°C , com o material triturado, até atingir peso constante, tanto para a amêndoa como para casca.

Foram realizadas determinações em três repetições com 50 castanhas de cada lote tratado termicamente, utilizando-se 5g de amêndoa triturada e 10g de casca triturada para cada repetição. Recipientes e tampas foram identificados e secos em estufa antes de serem usados. Foi utilizada estufa com circulação forçada (Fanem 320 SE) a $65 \pm 3^\circ\text{C}$, pesando-se em balança analítica (Gehaka BG2000), com carga máxima 2100g e precisão de 0,0001, diariamente até atingir peso constante.

Avaliação do efeito combinado de umidificação e tratamento térmico nas propriedades do endocarpo

Cisalhamento do endocarpo

Após o tratamento térmico retirou-se o LCC superficial, de cada castanha, com papel toalha, submetendo-as a um período de repouso de 2 horas para resfriamento. Cada castanha foi decortificada através de dispositivo manual construído para esse fim, apresentado na Figura 3.5, tomando-se o cuidado de preservar a integridade das amêndoas.

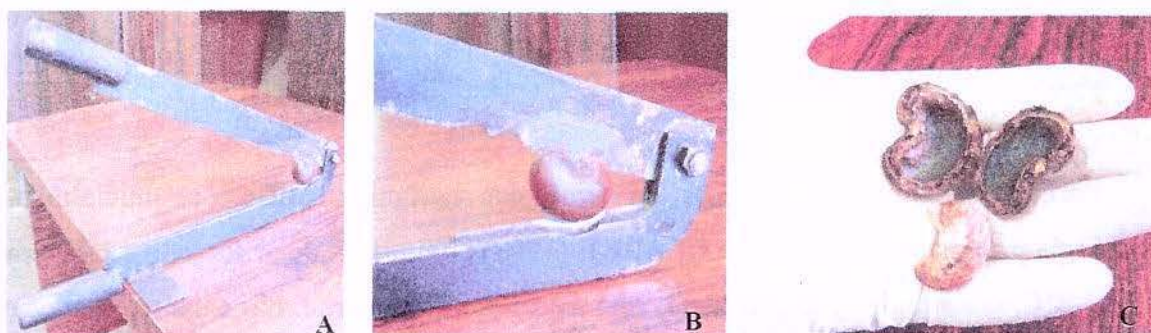


Figura 3.5. Vistas do dispositivo, projetado e construído para a decorticação manual das castanhas de caju, através de lâminas afiadas.

Após a decorticação retirou-se o epicarpo e o mesocarpo, através de escarificação com faca afiada obtendo-se o endocarpo. Em seguida, posicionou-se o espécime no dispositivo para o ensaio de cisalhamento.

Para avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades do endocarpo concebeu-se um método que avaliasse o nível de fragilidade do endocarpo, através de dispositivo de cisalhamento, cujo princípio de funcionamento é mostrado, esquematicamente, na Figura 3.6. O dispositivo é composto por ponteira cilíndrica de 3,6mm de diâmetro (faca), em aço inox e base com orifício central (contra-faca), em aço 1020 temperado.

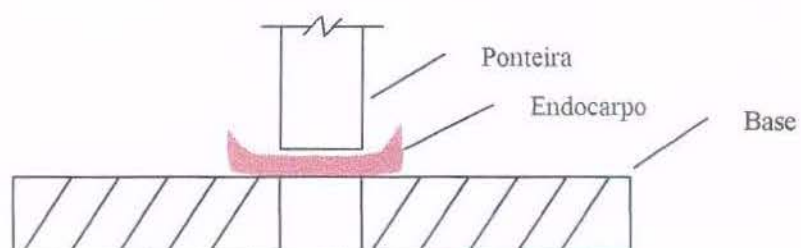


Figura 3.6. Representação esquemática do dispositivo utilizado para o ensaio de cisalhamento de uma parcela do endocarpo de castanhas tratadas termicamente.

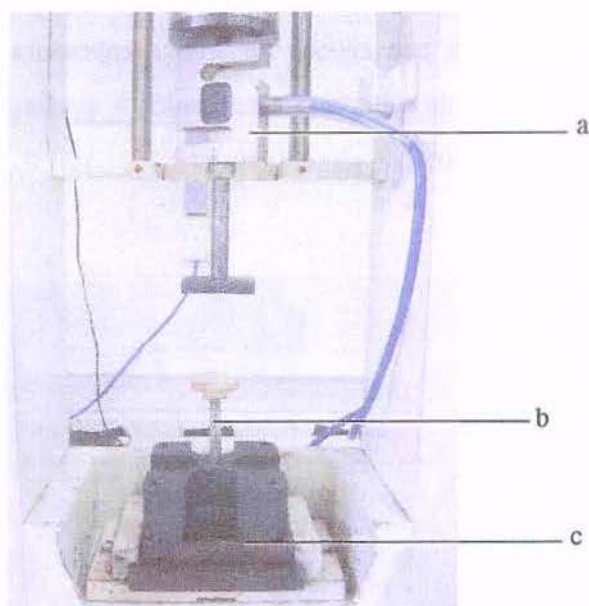


Figura 3.7. Vista do dispositivo de cisalhamento acoplado a máquina universal de ensaios mostrando a célula de carga (a), a ponteira (b) e a base plana (c).

Avaliação do efeito combinado de umidificação e tratamento térmico nas propriedades da amêndoa

Penetração da amêndoa

O ensaio de penetração foi realizado com as amêndoas obtidas através de decorticação manual, utilizando-se uma ponteira cilíndrica de 2mm de diâmetro (Figura 3.8) acoplada a uma máquina universal de ensaios (TEXTURE ANALYSE), Modelo TA 500, com célula de carga de 50N, para realizar penetração à taxa de deformação constante de 0,6 mm/s e profundidade máxima de 30% da espessura da amêndoa. Cada espécime foi disposta sobre prato plano e horizontal, perpendicularmente à direção da ponteira e, em seguida, posicionada até o contato com a amêndoa na sua região de maior espessura, iniciando-se o ensaio. Utilizaram-se 25 amêndoas para cada tratamento realizado. A avaliação foi feita pelo valor da força e energia de deformação até 30% de penetração.

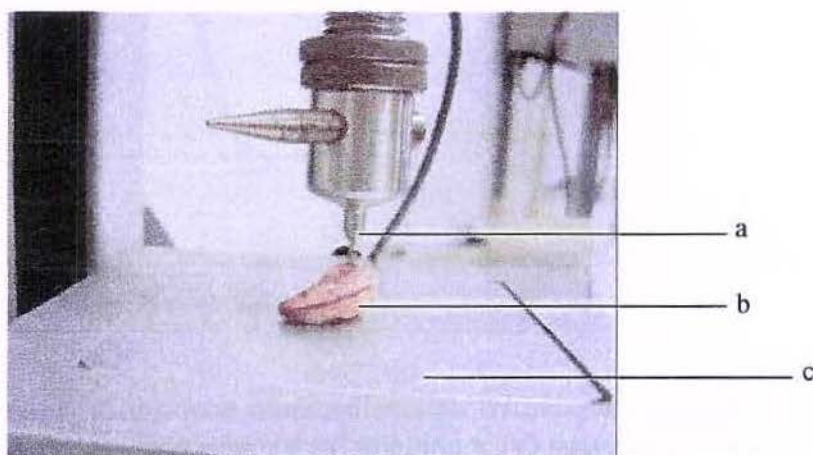


Figura 3.8. Vista da ponteira utilizada no ensaio de penetração da amêndoa, mostrando a ponteira (a), a amêndoa (b) e a base plana (c).

Microscopia eletrônica de varredura

Para observar possíveis alterações na estrutura do endocarpo utilizaram-se imagens de microscopia em “discos” de endocarpo *in natura* e submetido a umidificação por 86 horas e

150s de residência no LCC a 210°C, com diâmetro de 3,59mm, originadas no ensaio de cisalhamento.

As imagens foram geradas no microscópio eletrônico de varredura JSM 5900 LV do Laboratório Nacional de Luz Sincrotron, Campinas, SP, na tensão de 15kV, em diversas magnitudes e distâncias de trabalho, diâmetro do feixe de 25mm e detector de imagens elétrons secundários.

As amostras foram colocadas no porta-amostra, (STUBS) de forma a registrar imagem da face cisalhada do disco como mostra a representação esquemática na Figura 3.9.



Figura 3.9. Porta-amostra utilizado na microscopia mostrando o stub (a), disco de endocarpo (b).

3.3. Resultados e discussão

Avaliação das dimensões, massa e volume antes e após o tratamento térmico

As dimensões médias das castanhas de caju antes e após o tratamento térmico (Tabela 3.2) apresentaram um acréscimo médio de 6,78% para o comprimento, 5,72% para a largura, 5,49% para a espessura, 29,23% para o volume e uma redução na massa de 24,66%.

Tabela 3.2. Dimensões médias, massa e volume da castanha de caju antes e após o tratamento térmico com LCC.

	Unidade	Tratamento térmico		
		Antes	Após	Diferença (%)
Comprimento (10^{-3})	m	33,61 (1)*	35,89 (6)	+ 6,78
Largura (10^{-3})	m	27,39 (1)	28,96 (7)	+ 5,72
Espessura (10^{-3})	m	20,65 (1)	23,28 (8)	+ 5,49
Massa (10^{-3})	kg	9,10 (2)	6,86 (18)	- 24,66
Volume (10^{-6})	m ³	8,96 (9)	11,56 (8)	+ 29,23

*Coeficiente de variação entre parênteses (%).

Observa-se que após o tratamento térmico o coeficiente de variação das dimensões e massa é de 6 a 9 vezes maior quando comparadas com as castanhas *in natura*. Já para o volume constatou-se uma pequena redução no coeficiente de variação, de 9% antes do tratamento térmico para 8% após o tratamento térmico.

No geral, todas essas alterações observadas apontam para a necessidade de uma classificação após o tratamento térmico quando esta representar parâmetro importante no processo de decorticação da castanha.

Quando se aplica uma deformação limitada na castanha tendo com objetivo romper a casca e preservar a integridade da amêndoa, essas alterações nas dimensões, massa e volume devem ser levadas em consideração para uma boa eficiência no processo de beneficiamento.

Determinação do teor de água

A determinação de umidade da casca e da amêndoa a 65°C até peso constante em estufa de ar forçado, com material triturado, mostrou-se eficaz e adequada.

Observa-se na Tabela 3.3 os valores percentuais médios de umidade em base seca (b.s.) para a amêndoa e casca da castanha de caju nos dez tratamentos realizados. Nota-se que todos os ensaios com mesmo tempo de umidificação, a umidade aumenta com a redução do

tempo de residência no LCC. Para os ensaios com mesmo tempo de residência o aumento do tempo de umidificação não representa necessariamente um acréscimo na umidade. Logo, o fator que exerce o maior influência na umidade final é o tempo de residência no LCC a 210°C.

Tabela 3.3 Valores percentuais médios de umidade (b.s.) para a amêndoa e casca da castanha de caju ‘CCP 76’, submetidos a diversos tratamentos térmicos.

Ensaio	Tempo de umidificação (h)	Tempo de residência no LCC (s)	Umidade da Amêndoa (%)	Umidade da Casca (%)
1	79	135	5,93	4,03
2	93	135	5,81	4,60
3	79	165	5,75	3,35
4	93	165	5,42	2,49
5*	86	150	5,54	3,38
8	72	150	6,52	4,04
9	100	150	6,72	3,19
10	86	120	6,65	4,54
11	86	180	5,24	2,50
12**	0	0	5,84	7,12

* representa a média de três repetições do ponto central do planejamento experimental.

** representa a castanha *in natura*.

BORGES e PELEG (1997) afirmaram que a presença de óleo nas nozes parece ser a principal causa da ausência de fragilidade sendo o que limita a absorção ou dessorção de água, tornando-as mais ou menos rígidas.

Comparando-se as médias da umidade (Tukey, $p \leq 0,05$) foi observado que o material *in natura* (ensaio 12) diferiu estatisticamente de todos os outros tratamentos submetidos a castanha. Este resultado aponta para possíveis comportamentos diferenciados nas relações força-deformação para as combinações dos vários níveis de umidificação e tratamento térmico.

Efeito combinado de umidificação e tratamento térmico nas propriedades do endocarpo

A metodologia empregada para mensurar o efeito combinado da umidificação e do tratamento térmico do endocarpo não apresentou dificuldades de implementação mostrando-se eficaz na caracterização mecânica.

Na preparação de cada espécime, observou-se que o material é bastante frágil, requerendo uma boa habilidade no seu manuseio, como também, proteção nas mãos através de luvas de procedimentos para evitar o contato com o LCC.

Como exemplos característicos das relações de força-deformação característica, apresentam-se, na Figura 3.10, algumas curvas obtidas no ensaio de cisalhamento do endocarpo com tratamento térmico, ensaio 1, e sem tratamento térmico, ensaio 12. Estas indicam que, quanto mais frágil o material, menores os níveis de força de cisalhamento e de deformação específica correspondente. Para os demais tratamentos verificou-se comportamento semelhante.

As relações características de força-deformação, observadas nos ensaios realizados contribuíram para o entendimento do comportamento mecânico do endocarpo, indicando diferenças do material *in natura* quando comparado com o tratado termicamente.

Para a deformação específica (mm/mm), na força máxima, o ensaio 1, com tratamento térmico, e o ensaio 12, *in natura*, não apresentaram diferenças significativas (Tukey, $p \leq 0,05$).

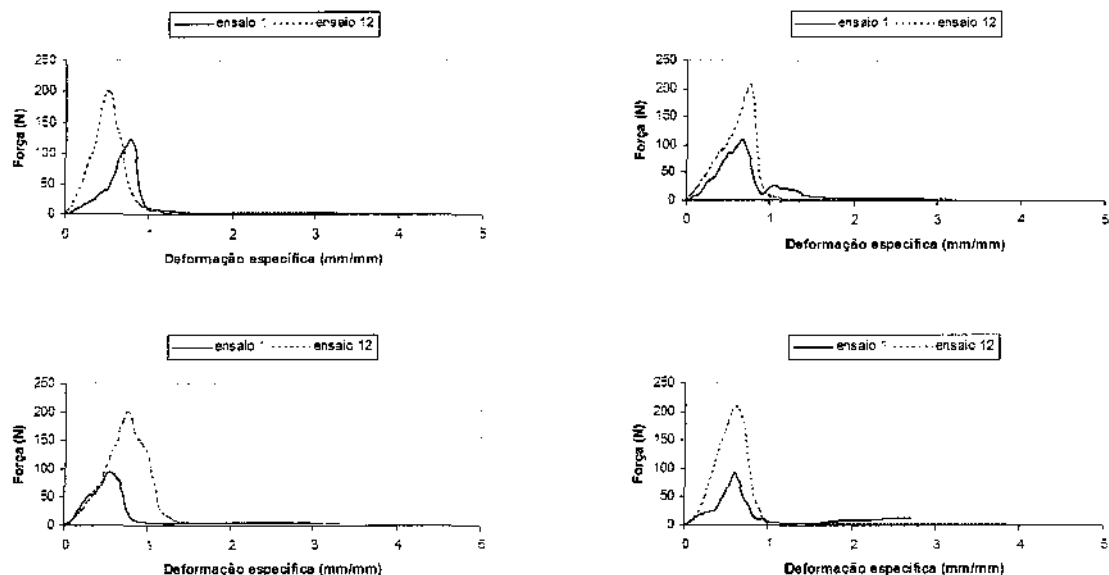


Figura 3.10. Relações força-deformação características, para o ensaio de cisalhamento do endocarpo com tratamento térmico, ensaio 1, e sem tratamento térmico, ensaio 12.

São apresentados na Tabela 3.4 os valores médios de força máxima, deformação específica e energia de deformação correspondentes, com seus respectivos coeficientes de variação para os ensaios realizados. A deformação específica apresentou menores coeficientes de variação indicando ser o melhor índice para a caracterização mecânica do endocarpo. O ensaio 1 foi o que apresentou menores níveis de força máxima e deformação específica correspondente, e o ensaio 12, *in natura*, os maiores níveis.

Tabela 3.4. Valores médios de força máxima (N), deformação específica correspondente (mm/mm) e energia de deformação (J) obtidos nos ensaios de cisalhamento do endocarpo em diversos tratamentos.

Ensaio	Força máxima (N)	Deformação específica (mm/mm)	Energia (J) $\times 10^{-2}$
1	118,91 (24)	0,71 (23)	2,73 (32)
2	121,75 (21)	0,77 (17)	3,22 (36)
3	132,87 (22)	0,76 (19)	4,16 (40)
4	121,78 (26)	0,78 (14)	2,73 (30)
5*	142,02 (2)	0,84 (8)	4,25 (5)
8	120,26 (26)	0,78 (9)	2,86 (34)
9	122,84 (28)	0,79 (15)	3,77 (44)
10	145,11 (24)	0,75 (23)	3,79 (30)
11	126,14 (22)	0,79 (16)	3,16 (33)
12**	197,45 (13)	0,75 (18)	5,24 (23)

coeficiente de variação entre parênteses (%).

* representa a média de três repetições do ponto central do planejamento experimental.

** representa a castanha *in natura*.

Observa-se na Tabela 3.5 os efeitos estimados, erro puro e grau de significância da deformação específica para o cisalhamento do endocarpo. Os efeitos estimados nos diferentes fatores estudados não apresentaram diferenças estatísticas ($p \leq 0,05$). Para o tempo de umidificação e o tempo de residência no modelo linear, o efeito teve sinal positivo, indicando que a resposta da deformação específica deve ser maior quando se aumenta o tempo de umidificação ou de residência no LCC. Para a interação, o efeito teve sinal negativo apontando para uma resposta menor da deformação específica quando se aumenta a interação dos dois fatores estudados. O tempo de umidificação no modelo quadrático foi o que apresentou maior valor de efeito na resposta da deformação específica. Quanto maior o tempo de umidificação menores as respostas de deformação específica.

Tabela 3.5. Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para a deformação específica no ensaio de cisalhamento do endocarpio.

Fonte de variação	Efeito	Erro puro	p
Média global	0,8174	0,0347	0,0018 *
Tempo de umidificação (L)	0,0180	0,0390	0,6893 ns
Tempo de umidificação (Q)	-0,0264	0,0308	0,4810 ns
Tempo de residência (L)	0,0257	0,0390	0,5782 ns
Tempo de residência (Q)	-0,0320	0,0308	0,4071 ns
Interação (L)	-0,0222	0,0676	0,7736 ns

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns – não significativo

L – modelo linear

Q – modelo quadrático

Uma vez que os fatores não foram significativos ($p \leq 0,05$) apresenta-se a tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a deformação específica no endocarpio em função do tempo de umidificação e tempo de residência no LCC a 210°C, na Figura 3.11. Verifica-se que a região de mínimo está abaixo da faixa estudada e que o ensaio 1, de menor deformação específica, é o que está mais próximo da região de desejada.

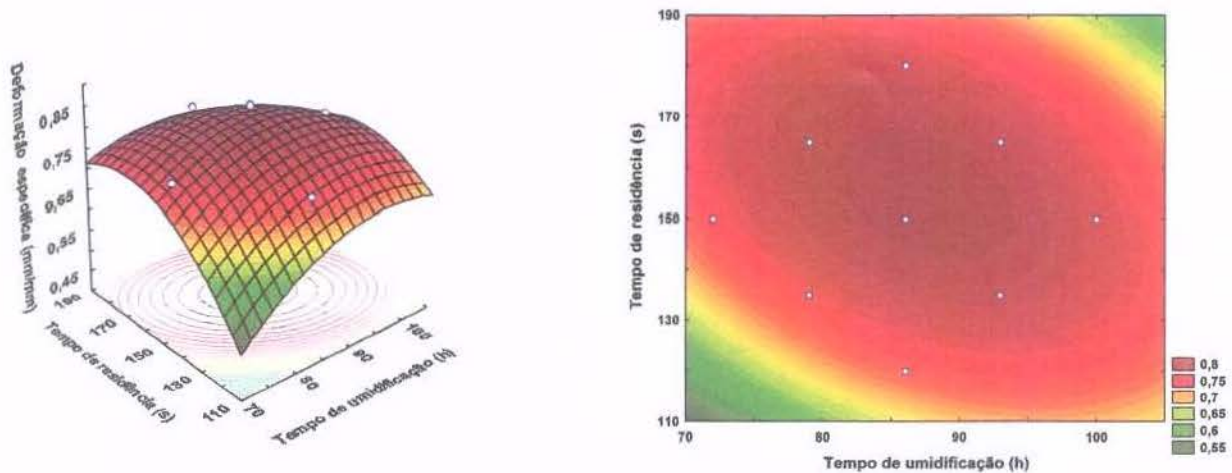


Figura 3.11. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a deformação específica no endocarpio em função do tempo de umidificação e tempo de residência.

A metodologia proposta para a caracterização mecânica da amêndoa da castanha de caju, através do ensaio de penetração com ponteira mostrou-se eficaz para discriminar os efeitos combinados de umidificação e tratamento térmico.

Na Figura 3.12 observam-se algumas das relações características de força-deformação obtidas no ensaio de penetração da amêndoa, com tratamento térmico, ensaio 1 e sem tratamento térmico, ensaio 12. No geral, as relações características dos outros tratamentos apresentaram comportamentos semelhantes, ou seja, o ensaio 12, amêndoa *in natura*, os níveis de força foram sempre menores comparados com a amêndoa após tratamento térmico.

Entende-se que a amêndoa mais úmida deve apresentar uma menor rigidez implicando em menores níveis de força. Essa alteração na amêndoa pode ser evidenciada com as curvas características.

Após comparação de médias (Tukey, $p \leq 0,05$), entre os dados da energia, do ensaio 1, com tratamento térmico, e ensaio 12, *in natura*, não foram evidenciados diferenças significativas.

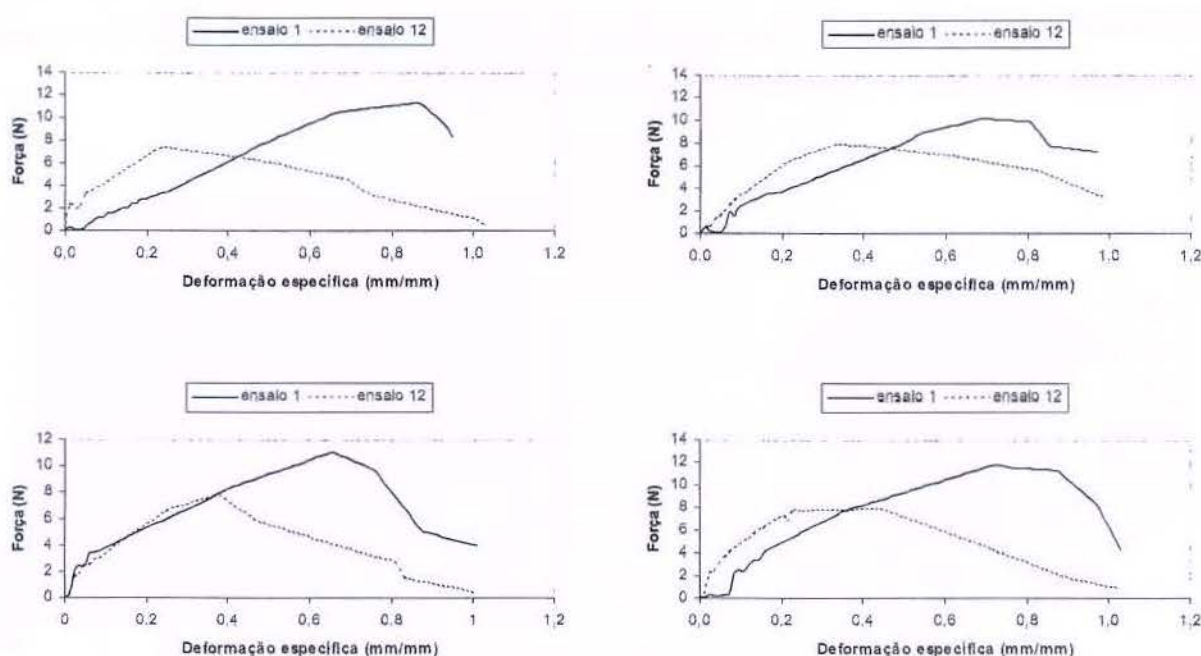


Figura 3.12. Relações força-deformação característica, para o ensaio de penetração da amêndoa com tratamento térmico, ensaio 1, e sem tratamento térmico, ensaio 12.

São apresentados na Tabela 3.6 os valores médios de força máxima e energia de deformação, com seus respectivos coeficientes de variação para os ensaios realizados. Os menores coeficientes de variação foram observados no parâmetro energia indicando ser o melhor, entre os índices considerados para a caracterização mecânica da amêndoa. O ensaio 1 foi o que apresentou menor índice de energia, por resultar numa amêndoa com uma menor rigidez. Vale ressaltar, que o ensaio 12 amêndoa *in natura*, apresentado na Tabela 3.6, foi utilizado somente para fins de comparação de médias pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$.

Tabela 3.6. Valores médios de força máxima (N) e energia de deformação (J) da amêndoa da castanha de caju submetido ao ensaio de penetração em diversos tratamentos.

Ensaio	Força máxima (N)	Energia (J) x 10 ⁻²
1	4,57 (48)	2,26 (23)
2	5,25 (28)	2,60 (15)
3	4,95 (50)	2,95 (21)
4	5,15 (35)	2,57 (14)
5*	4,04 (18)	2,66 (4)
8	4,16 (48)	3,13 (19)
9	5,48 (43)	2,45 (18)
10	4,61 (55)	2,51 (14)
11	6,65 (34)	2,65 (24)
12*	2,44 (47)	2,27 (22)

coeficiente de variação entre parênteses (%).

* representa a média de três repetições do ponto central do planejamento experimental.

** representa a castanha *in natura*.

Observa-se, na Tabela 3.7 o efeito estimado, erro puro e grau de significância para a energia do ensaio de penetração da amêndoa da castanha de caju. O efeito estimado para todos os fatores estudados foram não significativos ao nível de 95% de confiança ($p \leq 0,05$).

O tempo de umidificação e a interação no modelo linear tiveram efeitos negativos, indicando que a energia deve ser menor quando se aumenta o tempo de umidificação ou a sua

interação. O tempo de residência no modelo linear teve efeito positivo, apontando para uma energia menor quando o tempo de residência no LCC é maior.

O maior tempo de fritura proporciona uma maior rigidez da amêndoa e conseqüentemente, maiores riscos de danos.

O maior efeito na resposta foi observado na interação do modelo linear do tempo de umidificação e tempo de residência no LCC.

Tabela 3.7. Efeitos estimados, erro puro e grau de significância estatística para a energia do ensaio de penetração da amêndoa.

Fonte de variação	Efeito	Erro padrão	p
Média global	0,0262	0,0006	0,0005*
Tempo de umidificação (L)	-0,0023	0,0007	0,0723 ns
Tempo de umidificação (Q)	0,0007	0,0005	0,3097 ns
Tempo de residência (L)	0,0016	0,0007	0,1423 ns
Tempo de residência (Q)	-0,0003	0,0005	0,5793 ns
Interação (L)	-0,0036	0,0011	0,0887 ns

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns – não significativo

L – modelo linear

Q – modelo quadrático

Como não se observou diferenças estatísticas a $p \leq 0,05$ nos fatores estudados (Tabela 3.7), apresenta-se na Figura 3.13 a tendência da superfície de resposta e a curva de contorno para a energia na amêndoa em função do tempo de umidificação e tempo de residência no LCC a 210°C, sugerindo que a menor energia encontra-se na região verde, com maior ou menor tempo de umidificação e de residência no LCC. O ponto experimental mais próximo do ótimo é o do ensaio 1, confirmando o que os dados apontaram na Tabela 3.7. No entanto, para futuros trabalhos deve-se utilizar uma faixa de investigação mais ampla na região indicada pela curva.

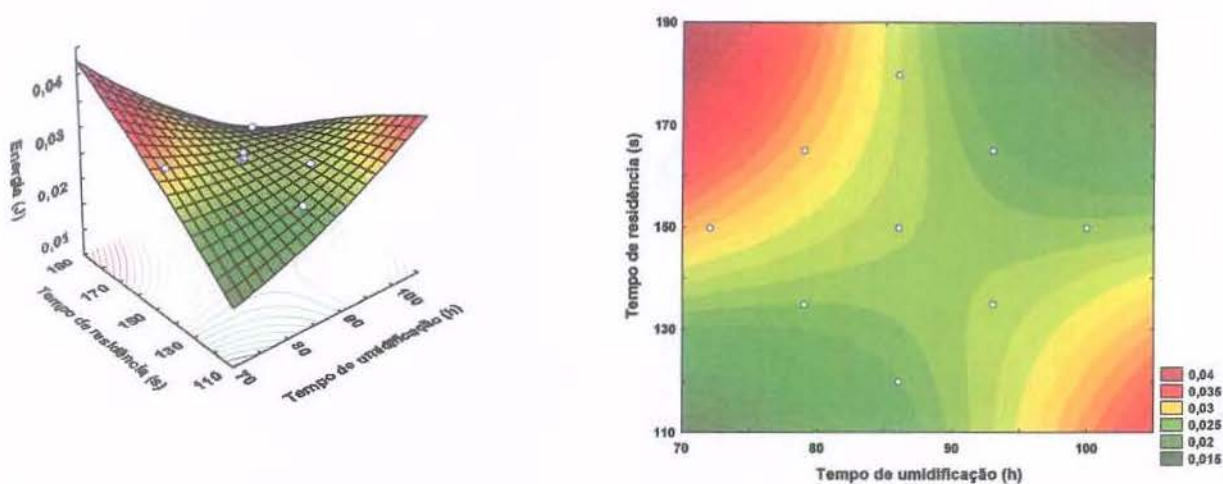


Figura 3.13. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a energia na amêndoa em função do tempo de umidificação e tempo de residência.

Resultados da microscopia eletrônica de varredura

São mostradas nas Figuras 3.14 e 3.15 as microfotografias do endocarpo *in natura* e o tratado termicamente. As imagens revelam que na área onde ocorre o cisalhamento, as fibras são rompidas provocando uma desorganização no seu arranjo natural. O efeito provocado pelo cisalhamento é maior no endocarpo *in natura*, pois o material oferece uma resistência maior ao cisalhamento.

Comparando-se as microfotografias, verifica-se que, no endocarpo *in natura*, existe um espaço entre as fibras não observado se observa no endocarpo tratado termicamente. A não existência do espaço entre as fibras confere ao material um grau maior de fragilidade.

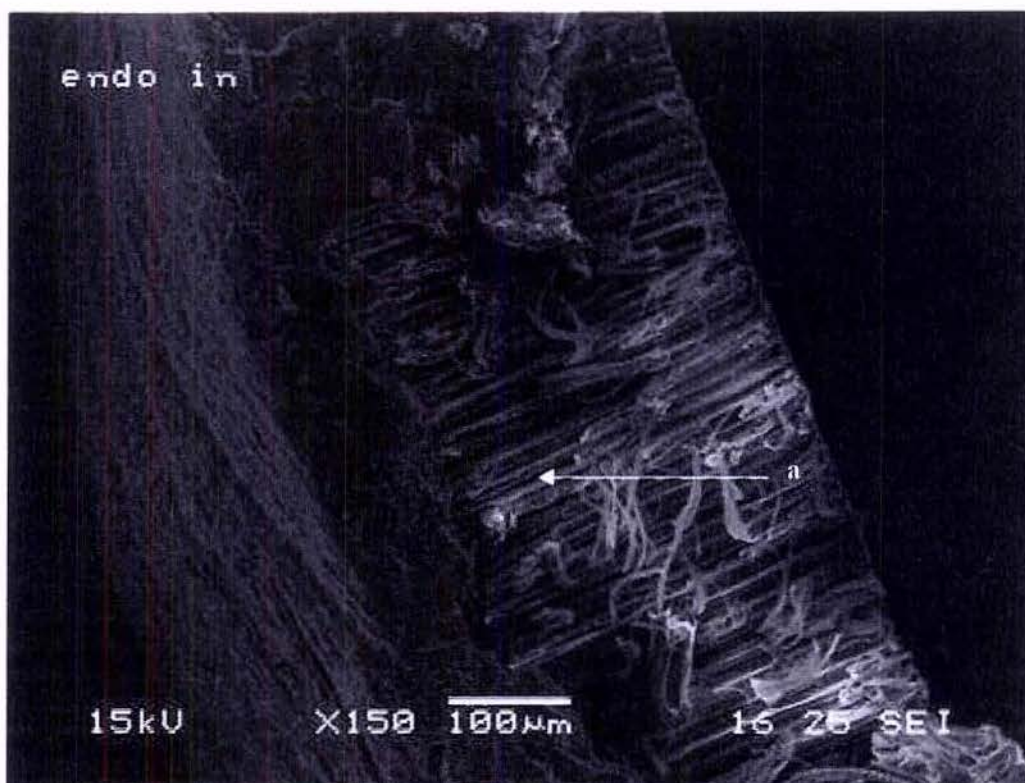


Figura 3.14. Microfotografia do endocarpo da castanha *in natura*, evidenciando a disposição das fibras (a).

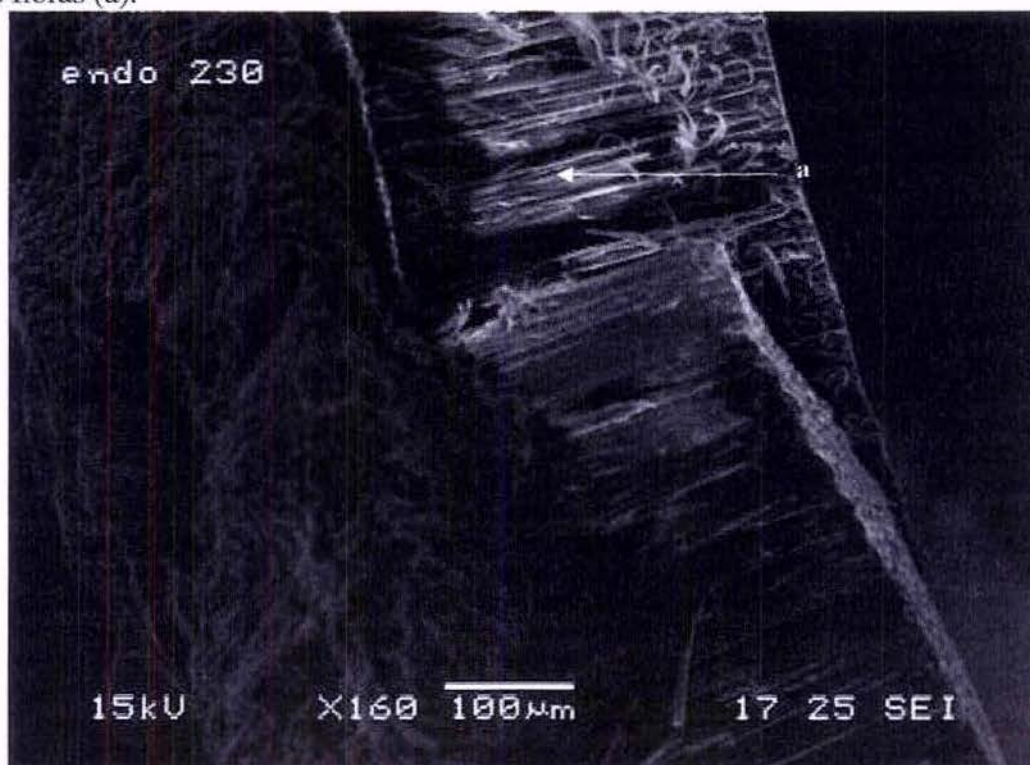


Figura 3.15. Microfotografia do endocarpo da castanha após 86 horas de umidificação e 150s de residência no LCC a 210°C, evidenciando a disposição das fibras (a).

Discussões finais

Em avaliação geral, procurou-se identificar dentro da faixa estudada, um endocarpo mais frágil e uma amêndoa menos rígida com o objetivo de indicar uma combinação de umidificação e tempo de residência mais adequada, apontando para melhores resultados de ruptura da casca e liberação da amêndoa íntegra. No entanto, não ocorreram diferenças estatísticas ao nível de 95% de confiança. Sendo somente possível observar as tendências que poderão balizar futuras investigações.

3.4. Conclusões

As diferenças dimensionais encontradas após a preparação das castanhas de caju ‘CCP 76’ indicam a necessidade de classificação após o tratamento térmico.

O tempo de 79 horas de umidificação combinado com 135s de residência no LCC a 210°C para a castanha de caju ‘CCP 76’, pela tendência da superfície de resposta, apontou ser o tratamento mais próximo da região desejada. No entanto, recomenda-se estudar uma faixa mais ampla de umidificação e de residência no LCC.

Identificaram-se alterações na estrutura do endocarpo após tratamento térmico, indicando que suas propriedades mecânicas são modificadas, implicando em níveis de força e deformação diferenciados.

3.5. Referências Bibliográficas

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos – pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da Unicamp, 2002.

BORGES, A. e PELEG M. Effect of water activity on the mechanical properties of selected legumes and nuts. **Journal Science Food Agricultural**. n.75, p. 463-471, 1997.

MELO, M.L.P.; MAIA, G.A.; SILVA, A.P.V.; OLIVEIRA, G.S.F.; FIGUEIREDO, R.W. Caracterização físico-química da amêndoa da castanha de caju (*Anacardium occidentale* L.) crua e tostada. **Ciência e tecnologia de alimentos**, Campinas, v.18, n.2, p. 184-187, mai./jul., 1998.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**: structure, physycal characteristics and mechanical properties. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1970.

OLOSO, A.O.; CLARKE, B. Some aspects of strength properties of Cashew nuts. **Journal of Agricultural Engineering Research**. n.55, p.27-43, 1993.

PERSSON, S. **Mechanics of cutting plant material**. St. Joseph: ASAE Technical Editor, 1987.

4. ARTIGO 2: DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA LIMITE E EFEITO DA UMIDIFICAÇÃO E TRATAMENTO TÉRMICO NA DECORTICAÇÃO DA CASTANHA DE CAJU ‘CCP 76’ ATRAVÉS DE IMPACTO ÚNICO E DIRECIONADO.

4.1. Introdução

A castanha de caju é o verdadeiro fruto do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.), sendo este explorado comercialmente nos continentes Asiático, Africano e Sul-Americano. Destacam-se, como principais exportadores da Amêndoa de Castanha de Caju (ACC), a Índia, Vietnã e o Brasil. A castanha tem comprimento e largura variáveis; apresenta cor cinza amarronzada, casca lisa, mesocarpo alveolado contendo um líquido escuro, cáustico e inflamável, denominado Líquido da Casca da Castanha (LCC) que representa 22% do peso da castanha. A amêndoa representa 28,30% do peso total do fruto.

De acordo com Ohler (citado por OLOSO e CLARKE, 1993) a liberação da amêndoa apresenta grande problema no beneficiamento, devido à forma irregular da castanha, à fragilidade da amêndoa e a sua facilidade de contaminação pelo LCC. Além destes fatores, a variabilidade nas dimensões da castanha, a pouca folga entre a amêndoa e o endocarpo dificultam ainda mais a ruptura da casca sem comprometimento da integridade da amêndoa. O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais biológicos contribui com parâmetros para projetar equipamentos e propor ações mais adequadas para melhorar a qualidade do beneficiamento de produtos agrícolas (ARAÚJO, 1999; LEITÃO, 1983).

Uma forma de diminuir o número de danos as amêndoas na decorticação da castanha de caju é a aplicação de uma carga em um curto espaço de tempo, provocando uma deformação, aumento de tensão e, conseqüentemente, a sua ruptura. Quanto maior a deformação imposta maiores são os riscos de danos à amêndoa. A componente viscosa, pela sua dependência temporal assume papel importante na redução da deformação necessária à ruptura uma vez que o crescimento das tensões internas está associado à taxa de deformação. Limitar a deformação para o rompimento da casca proporcionará menores danos à amêndoa.

Esse valor de deformação limitada associado à dimensão original pertinente foi denominado de *deformação específica limite*.

Esse trabalho teve por objetivo determinar a deformação específica limite da castanha de caju, na direção de sua largura, para um impacto direcionado e encontrar a melhor combinação de umidificação e residência no LCC a 210°C para a abertura das castanhas.

4.2. Metodologia

4.2.1. Ensaio de impacto para a determinação da deformação específica limite

Castanhas de caju

Utilizaram-se castanhas de caju fornecidas pela Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa da Agroindústria Tropical, Fortaleza - CE. As castanhas *in natura* foram separadas em quatro lotes com vinte e cinco unidades e pesadas individualmente em balança com 0,1g de precisão. Para a caracterização de suas principais dimensões (Figura 3.2, capítulo 3) utilizou-se paquímetro digital (DIGIMESS) com resolução centesimal de milímetro. Para a umidificação, as castanhas foram imersas em água por um período de 2 horas e, drenada a água, submetidas a período de repouso de 86 horas em recipiente fechado. As castanhas foram submetidas a “banho” do Líquido da Casca da Castanha (LCC) com temperatura de 210°C por 150s, seguido de período de repouso por 2 horas para resfriamento. Em seguida, porém antes dos ensaios de impacto, foi retirado o excesso de LCC superficial com papel toalha e realizadas as medidas das principais dimensões e pesagem.

Determinação de Umidade

Determinou-se a umidade para a castanha de caju após o tratamento térmico utilizando-se a metodologia proposta pela ASAE S410.1 (1992), porém com temperatura da estufa de ar forçado a $65^{\circ}\text{C} \pm 3$, até atingir peso constante.

Como a metodologia requer os percentuais de casca e amêndoas em relação à massa total da castanha de caju 'CCP 76', considerou-se para a casca o valor de 71,23% e para a amêndoa 28,77%, segundo a determinação realizada por ARAÚJO *et al.* (2003).

Dispositivo de impacto

O dispositivo de impacto (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3), projetado e construído para imprimir golpe com deformação limitada, é composto por conduto vertical que permite deslizamento de martelo plano de aço 1020. O martelo (722,5g) pode ser elevado, manualmente, por um sistema de cabo e polias, sendo liberado para movimento em queda livre atingindo a base a uma velocidade de 4,18 m/s. O conduto vertical está fixo na estrutura do dispositivo de forma a não permitir movimento. O conjunto é rígido e as deformações no momento do impacto são relativamente pequenas se comparadas, às da castanha. Na extremidade inferior do conduto vertical localiza-se uma base plana com orifício central onde está inserida uma plataforma de altura regulável. Cada castanha é posicionada sobre a plataforma, na direção da largura com dorso voltado para cima, regulando-se a altura da plataforma de modo a permitir que somente parcela da largura ultrapasse o nível da superfície superior da base. A superfície da plataforma regulável foi revestida por lixa nº 240 para aumentar o atrito e assim evitar o deslizamento da castanha. Essa parcela exposta representa a deformação máxima permitida no impacto com o martelo plano. É denominado também de deformação específica limite, quando expressa em porcentagem da largura.

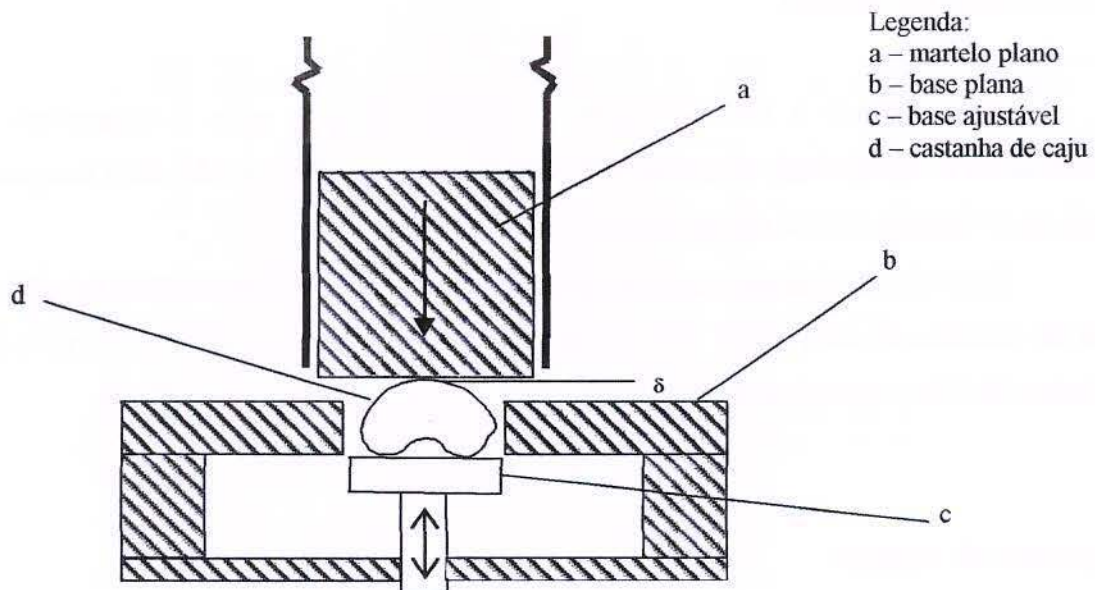


Figura 4.1. Representação esquemática do dispositivo de impacto mostrando a aplicação direcionada da força e deformação limitada (δ).

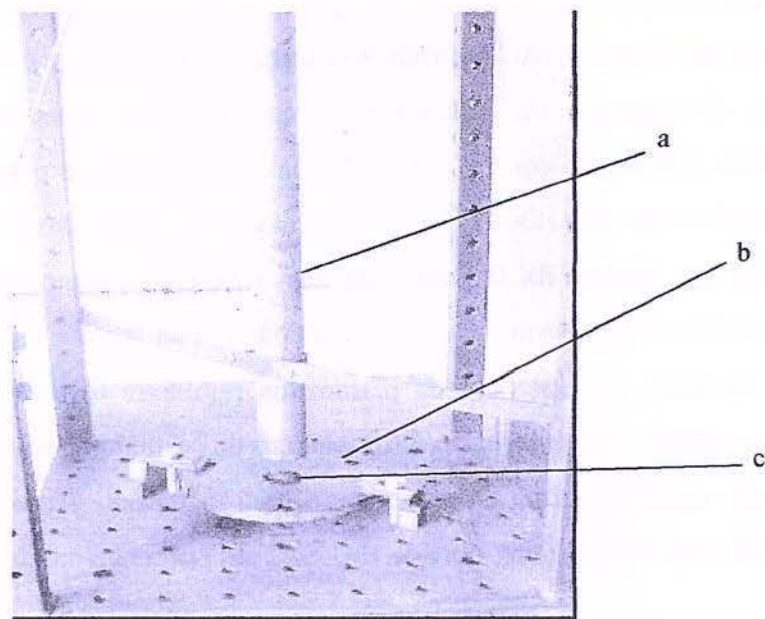


Figura 4.2. Configuração construtiva do dispositivo de impacto utilizado no ensaio de deformação específica limite mostrando o conduto vertical (a), base plana (b) e a castanha de caju (c).

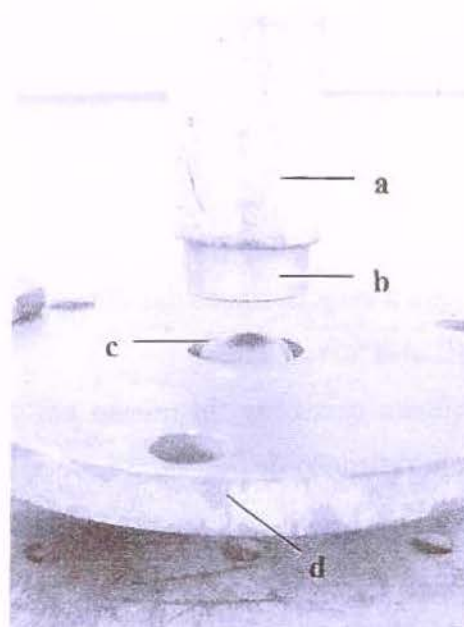


Figura 4.3. Detalhe do dispositivo de impacto. Duto vertical (a), martelo plano (b), castanha (c), base plana horizontal (d).

Critério de avaliação da qualidade da ruptura da castanha e condição da amêndoa

Após o golpe, o martelo plano foi levantado e a castanha retirada do dispositivo para avaliação do efeito do impacto. Os efeitos do impacto foram avaliados segundo o seguinte critério: castanhas com *ruptura total da casca e amêndoa inteira liberada* (RtAi); castanhas com *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida* (RpAp), tendo potencial de completar a ruptura através de solicitação mecânica adicional; castanha com *ruptura parcial da casca e amêndoa exposta* (RpAe), mas sem potencial de completar a ruptura através de um impacto na mesma direção e *castanha com ruptura total da casca e amêndoa danificada* (RtAd).

4.2.2. Ensaio de impacto para castanhas submetidas a diversos tratamentos

Castanhas de caju

Utilizaram-se castanhas da mesma procedência. O procedimento já descrito anteriormente foi adotado para a caracterização das dimensões e peso das castanhas utilizadas. Para cada ensaio foram utilizadas 50 castanhas.

Cada lote de cinquenta castanhas foi imerso em água por um período de 2 horas seguidos por períodos de umidificação de 72, 79, 86, 93 e 100 horas em recipiente fechado. Em seguida, foram submetidas a banho do Líquido da Casca da Castanha a 210°C por 120, 135, 150, 165 e 180s, seguido pela retirada do excesso de LCC superficial e repouso por 2 horas. Medidas das principais dimensões e peso foram feitas após o banho para identificar as variações. Para a determinação de umidade utilizou-se a mesma metodologia descrita na fase preliminar da pesquisa para a determinação de umidade dos lotes.

Ensaio de impacto

Realizaram-se os ensaios de impacto aplicando a deformação específica que apresentou o melhor resultado de *abertura total da casca e amêndoa inteira liberada* (RtAi), identificado no ensaio anterior. Para cada ensaio foram utilizadas 50 castanhas e para cada castanha a base móvel foi ajustada à deformação específica estabelecida.

Planejamento estatístico

Empregou-se a metodologia de superfície de resposta descrita detalhadamente no capítulo 3 página 24.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Resultados do ensaio de impacto para determinação da deformação específica limite

Dimensões médias e massa das castanhas ensaiadas

As castanhas apresentaram dimensões médias, antes do tratamento térmico de 32,93mm, com coeficiente de variação (CV) de 3% para o comprimento, 26,80mm (CV= 3%) para a largura e 20,05mm para a espessura (CV= 4%). O peso apresentou valor médio de 8,44g (CV= 9%). Após o tratamento térmico apresentaram dimensões médias de 35,56mm (CV= 3%) para o comprimento, 28,98mm (CV= 3%) para a largura, e 21,71mm para a espessura (CV= 4%). O peso apresentou valor médio de 6,60g (CV= 8%). Observou-se em média um aumento de 7,98% para o comprimento, 8,13% para a largura e 8,28% para a espessura. Verificou-se, uma redução média na massa de 21,8%.

Resultados semelhantes das variações nas dimensões das castanhas foram observados em experimento anterior (capítulo 3, página 34).

O teor de água médio encontrado para a castanha foi de 5,83% b.s. (CV= 19%).

Ensaio para determinação da deformação específica limite

O dispositivo construído para determinar a deformação específica limite mostrou-se eficiente na condução do ensaio, pois não apresentou dificuldades operacionais. No entanto, recomendam-se alguns cuidados, tais como: no ajuste de altura da base móvel para aplicação da deformação específica, retirada e limpeza periódica da base móvel, lançamento do martelo plano a uma mesma altura e levantamento do martelo logo após o impacto.

Nas fotos (Figura 4.4) obtidas após o impacto direcionado ilustra-se cada classe estabelecida pelo critério de avaliação.

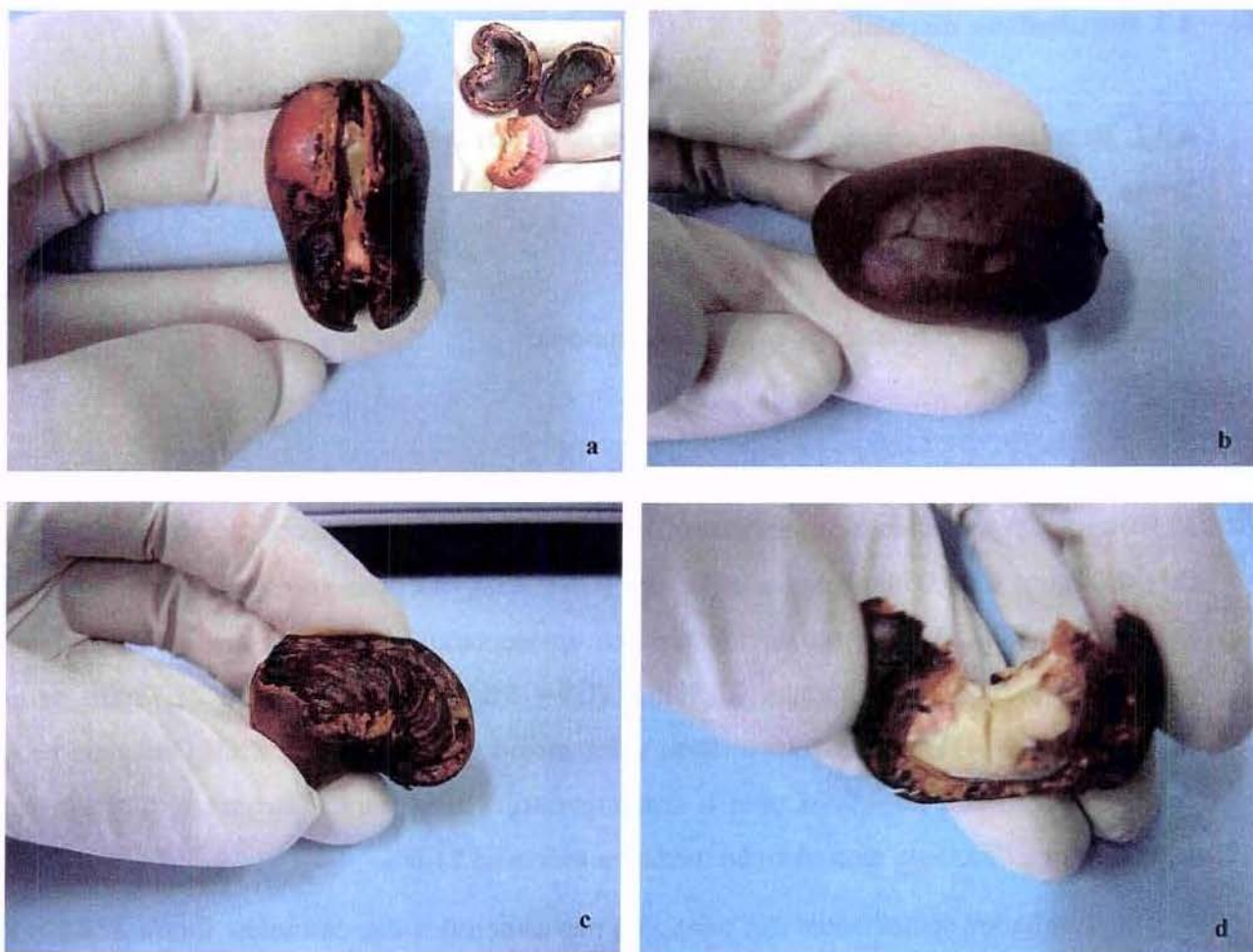


Figura 4.4. Castanhas submetidas ao ensaio de impacto, mostrando cada classe estabelecida. a - *ruptura total e amêndoa inteira*, b - *ruptura parcial e amêndoa protegida*, c- *ruptura parcial e amêndoa exposta*, d - *ruptura total e amêndoa danificada*.

Avaliando-se os resultados dos ensaios (Tabela 4.1) observa-se, que a 19% de deformação obteve-se maior número de castanhas com ruptura total da casca e liberação de amêndoa inteira e o mínimo para a *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida*, *ruptura parcial da casca e amêndoa exposta*, como também para a *ruptura total da casca e amêndoa danificada*. Para 21% de deformação, verifica-se um percentual de 40,9% de *ruptura total da casca com amêndoa danificada*, uma condição indesejável, evidenciando o valor excessivo da deformação aplicada. O maior percentual de *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida* foi observado na deformação específica de 15%, indicando um valor insuficiente de deformação.

Tabela 4.1. Desempenho do impacto único e direcionado, em castanhas de caju, em porcentagem de castanhas ensaiadas a várias deformações específicas.

Classes	Deformações específicas			
	15%	17%	19%	21%
Ruptura total e amêndoa inteira (%) ¹	36,00	60,87	75,00	50,00
Ruptura parcial e amêndoa protegida (%) ²	40,00	30,43	20,83	9,10
Ruptura parcial e amêndoa exposta (%) ³	16,00	4,35	0,00	0,00
Ruptura total e amêndoa danificada (%) ⁴	8,00	4,35	4,17	40,9

¹ Castanha com *ruptura total da casca e amêndoa inteira*; ² Castanha com *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida* (tendo potencial de abertura total através de solicitação mecânica adicional); ³ Castanha com *ruptura parcial da casca e amêndoa exposta* (sem possibilidade de novo impacto na mesma direção); ⁴ Castanha com *ruptura total da casca e da amêndoa danificada*.

Para a confirmação deste resultado, repetiu-se o experimento utilizando um lote de 50 castanhas com mesma faixa de tamanho e procedimentos de umidificação e tratamento térmico, porém para a deformação específica de 19%.

Os resultados obtidos (Tabela 4.2) com 77,55% de *ruptura total da casca com amêndoa inteira* confirmaram os anteriores e apontam para o potencial de obtenção de grande número de amêndoas inteiras ao se aplicar um único impacto, com deformação limitada, ao longo da largura da castanha.

Observa-se que o percentual de castanhas com *ruptura total da casca e amêndoa danificada* foi de 18,37%, sendo 14,20% maior que o resultado correspondente anterior, devido à variabilidade do material biológico. No caso de castanhas com *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida* obteve-se uma redução de 16,75%.

Tabela 4.2. Desempenho do impacto único e direcionado na abertura de castanhas de caju, expresso em porcentagem, com deformação específicas de 19%, para 50 castanhas.

Classes	Deformação específica de 19%
Ruptura total e amêndoa inteira (%) ¹	77,55
Ruptura parcial e amêndoa protegida (%) ²	4,08
Ruptura parcial e amêndoa exposta (%) ³	0,00
Ruptura total e amêndoa danificada (%) ⁴	18,37

¹ Castanha com ruptura total da casca e amêndoa inteira; ² Castanha com ruptura parcial da casca e amêndoa protegida (tendo potencial de abertura total através de solicitação mecânica adicional); ³ Castanha com ruptura parcial da casca e amêndoa exposta (sem possibilidade de novo impacto na mesma direção); ⁴ Castanha com ruptura total da casca e da amêndoa danificada.

4.3.2. Resultados do ensaio de impacto para as castanhas submetidas a diferentes tratamentos

Dimensões médias e massa das castanhas de caju

As castanhas dos onze tratamentos investigados apresentaram dimensões médias, antes do tratamento térmico, de 32,43mm, com coeficiente de variação (CV= 1%) para o comprimento, de 26,49mm (CV= 1%) para a largura, de 20,26mm para a espessura (CV = 1%) e 8,56g (CV= 4%) para o peso. Após o tratamento térmico, as castanhas apresentaram dimensões médias de 34,71mm (CV= 7%) para o comprimento, de 28,02mm (CV= 7%) para a largura, de 21,75mm para a espessura (CV= 11%) e 6,36g (CV= 19%) para o peso. Observou-se em média um acréscimo de 7,03% para o comprimento, 5,77% para a largura e 7,35% para a espessura. Verificou-se uma redução média na massa de 25,7%.

Umidade

Observa-se na Tabela 4.4 os valores médios de umidade das castanhas e constata-se que a maior umidade foi para o ensaio que utilizou 86 horas de umidificação e 120s de tempo de residência no LCC a 210°C. A menor umidade foi verificada a 86 horas de umidificação e 180s de tempo de residência no LCC.

Comparando-se ensaios de mesmo tempo de umidificação verifica-se um aumento do teor de água com a redução do tempo de residência. No entanto, quando se tem ensaios com mesmo tempo de residência, não se observa acréscimo da umidade com um maior tempo de umidificação.

Tabela 4.3. Valores percentuais médios de umidade em base seca (b.s.) para a castanha de caju, submetidos a diversos tratamentos térmicos.

Ensaio	Decodificado		Umidade da castanha (%)
	Tu (h)	Tr (s)	
1	79	135	4,58
2	93	135	4,95
3	79	165	4,04
4	93	165	3,33
5*	86	150	4,00
8	72	150	4,75
9	100	150	4,21
10	86	120	5,15
11	86	180	3,29

Tu – Tempo de umidificação e Tr – Tempo de residência no LCC

* o ensaio 5 representa o ponto central.

As diferenças nos valores médios da umidade resultante dos vários tratamentos sugerem possíveis desempenhos diferenciados quando se utiliza o impacto direcionado.

As diferenças nos valores médios da umidade resultante dos vários tratamentos sugerem possíveis desempenhos diferenciados quando se utiliza o impacto direcionado.

Ensaio de impacto com aplicação da deformação específica limite de 19%

Mostra-se na Figura 4.6 o resultado da avaliação de desempenho na ruptura das castanhas através do ensaio de impacto direcionado para os diversos tratamentos realizados. O melhor desempenho de *ruptura total da casca com amêndoa inteira* foi do ensaio 1, com 87,5%, correspondendo ao menor valor de *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida*, com 2,08% e de *ruptura total da casca e amêndoa danificada* 4,17%. O ensaio 3 apresentou o pior resultado de *ruptura total da casca com amêndoa inteira* 72,34%. O maior índice de amêndoas danificadas, 20% foi observado no ensaio 11.

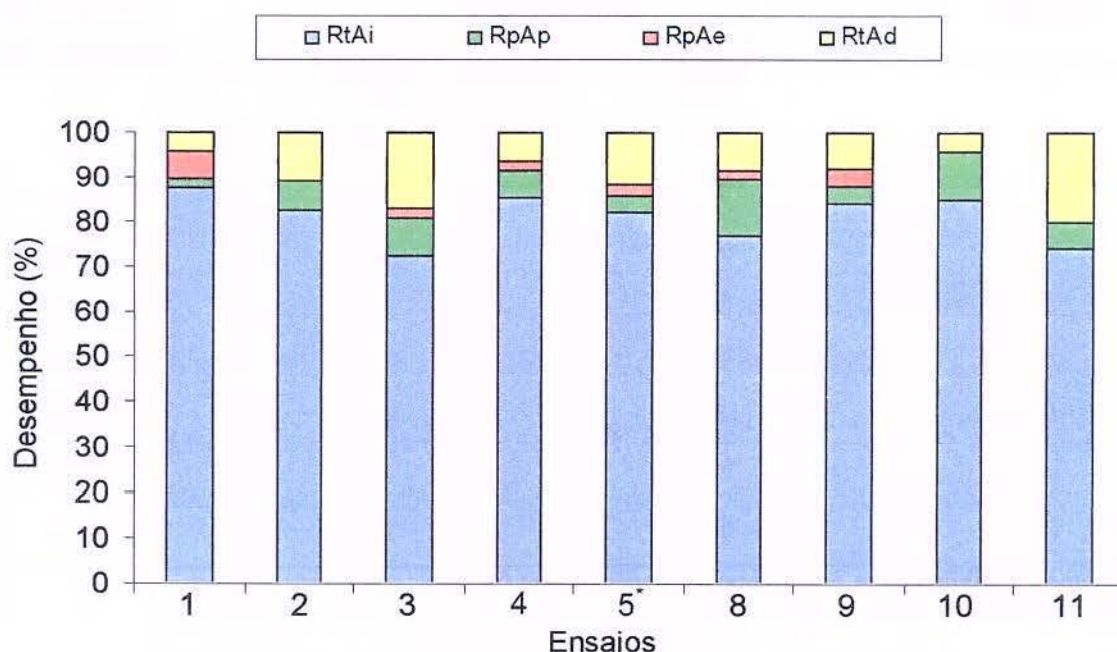


Figura 4.5. Desempenho da ruptura das castanhas através do impacto único e direcionado na *ruptura total da casca com amêndoa inteira* (RtAi), *ruptura parcial da casca com amêndoa protegida* (RpAp), *ruptura parcial da casca com amêndoa exposta* (RpAe) e *ruptura total da casca com amêndoa danificada* (RtAd), expresso em porcentagem, para a deformação específica de 19%.

* o ensaio 5 representa o ponto central com três repetições

O efeito combinado do tempo de umidificação e de residência no LCC altera as características da castanha apontando para diferenças de desempenho nos diversos tratamentos estudados.

Resultado da análise estatística

Ruptura total da casca com amêndoa inteira

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais de *ruptura total da casca e amêndoa inteira* no ensaio de impacto da castanha de caju são apresentados na Tabela 4.4. Observa-se que os efeitos estimados foram não significativos ($p \leq 0,05$).

Tabela 4.4. Efeito estimado, erro puro e grau de significância para ruptura total da casca e amêndoa inteira no ensaio de impacto da castanha de caju.

Fonte de variação	Efeito	Erro puro	p
Média global	82,8558	3,3026	0,0016*
Tempo de umidificação (L)	3,6717	3,7169	0,4274 ns
Tempo de umidificação (Q)	-0,9270	2,9308	0,7817 ns
Tempo de residência (L)	-4,0583	3,7169	0,3889 ns
Tempo de residência (Q)	-2,6970	2,9308	0,4546 ns
Interação (L)	8,9850	6,4379	0,2976 ns

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns – não significativo

O tempo de umidificação e a interação linear tiveram efeitos positivos, indicando que a resposta ruptura total da casca com amêndoa inteira deve ser maior quando se aumenta o tempo de umidificação ou a interação dos dois fatores estudados. O tempo de residência linear tem efeito negativo, sugerindo que a resposta diminui quando a castanha passa mais tempo no LCC a 210°C.

Quando se compara o tempo de umidificação e a interação linear observa-se que o maior efeito é para a interação, pois é o que tem maior valor.

Como não se observou diferenças estatísticas ao nível de 95% de confiança (Tabela 4.4), para os fatores estudados, apresenta-se na Figura 4.6 a tendência da superfície de resposta e curva de contorno para *ruptura total da casca e amêndoa inteira* em função do tempo de umidificação e tempo de residência no LCC a 210°C. Verifica-se que a região de máximo está fora da faixa estudada, sendo que o ensaio 1 é que mais se aproxima desta região.

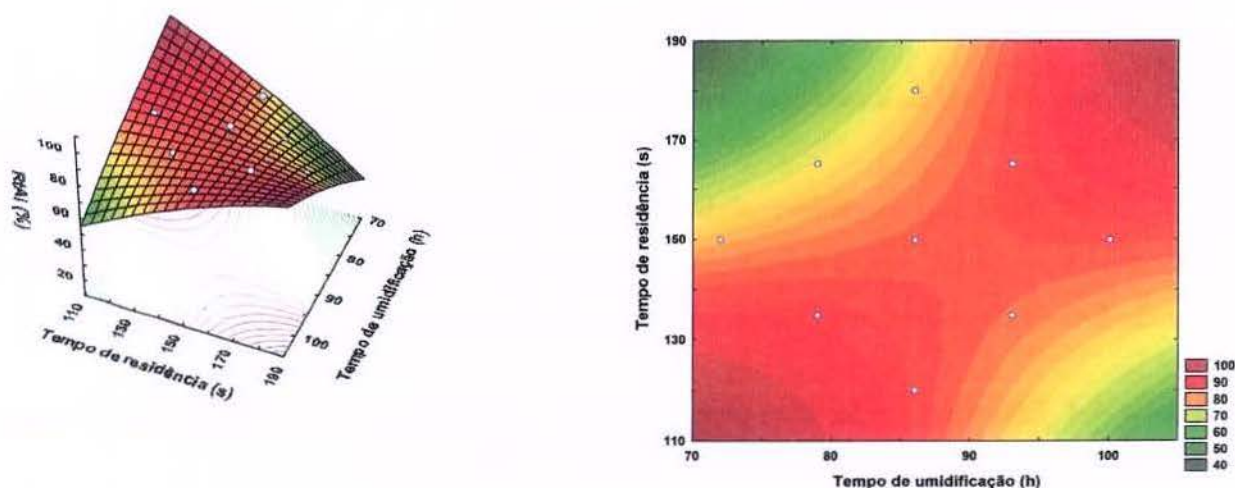


Figura 4.6. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura total da casca e amêndoa inteira em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio de impacto.

Ruptura parcial da casca com amêndoa protegida

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais de *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida* no ensaio de impacto da castanha de caju são apresentados na Tabela 4.5. Observa-se que os efeitos estimados foram não significativos ($p \leq 0,05$).

O tempo de umidificação, tempo de residência e a interação linear tiveram efeitos negativos, indicando que a resposta ruptura parcial da casca com amêndoa protegida deve ser menor quando se aumenta o tempo de umidificação, o tempo de fritura e a sua interação.

O fator com maior efeito na resposta é a interação tempo de umidificação e tempo de residência.

Tabela 4.5. Efeito estimado, erro puro e grau de significância para ruptura parcial da casca e amêndoa protegida no ensaio de impacto da castanha de caju.

Fonte de variação	Efeito	Erro puro	p
Média global	3,4563	1,6038	0,1639 ns
Tempo de umidificação (L)	-2,4700	1,8050	0,3046 ns
Tempo de umidificação (Q)	2,4067	1,4232	0,2329 ns
Tempo de residência (L)	-0,3067	1,8050	0,8807 ns
Tempo de residência (Q)	2,2817	1,4232	0,2501 ns
Interação (L)	-3,3500	3,1264	0,3961 ns

ns – não significativo

Observa-se na Figura 4.7 a tendência da superfície de resposta para *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida* e verifica-se que a região procurada, de mínimo, encontra-se no limite máximo da faixa estudada.

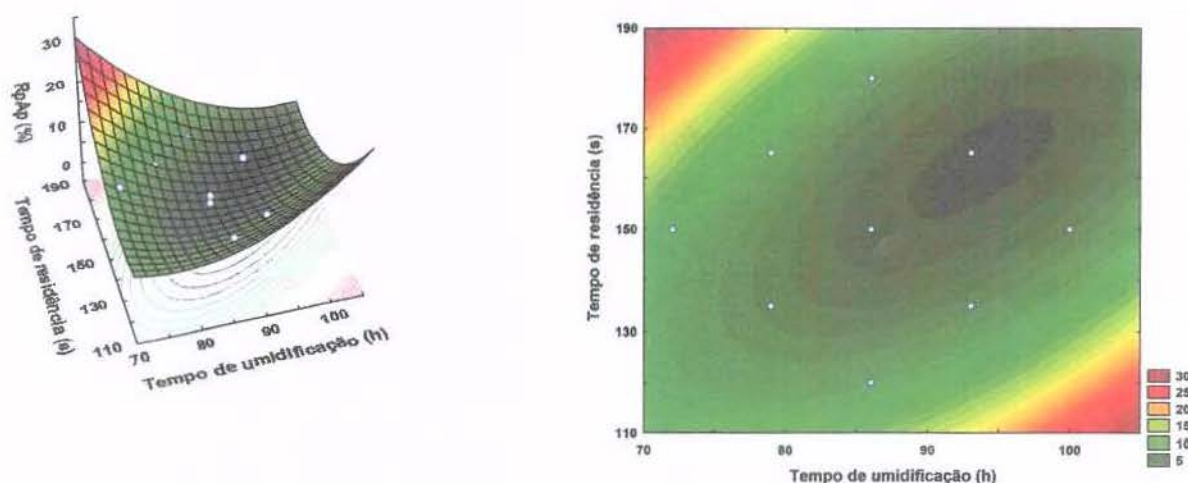


Figura 4.7. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura parcial da casca e amêndoa protegida em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio de impacto.

Ruptura parcial da casca com a amêndoa exposta

Os resultados da análise estatística realizada nos dados experimentais para a *ruptura parcial da casca e amêndoa exposta* no ensaio de impacto da castanha de caju são

apresentados na Tabela 4.8. Verifica-se que os efeitos estimados foram não significativos ($p \leq 0,05$).

O tempo de umidificação e o tempo de residência linear tiveram efeitos negativos, indicando que a resposta ruptura parcial da casca com amêndoa exposta deve ser menor quando se aumenta o tempo de umidificação e o tempo de residência.

Para a interação linear observa-se um efeito positivo sugerindo uma resposta maior para uma combinação de maior tempo de umidificação e tempo de residência.

O fator com maior efeito na resposta é a interação tempo de umidificação e tempo de residência no LCC a 210°C.

Tabela 4.6. Efeito estimado, erro puro e grau de significância para as castanhas com ruptura parcial da casca e amêndoa exposta no ensaio de impacto da castanha de caju.

Fonte de variação	Efeito	Erro puro	p
Média global	2,9389	1,5963	0,2070 ns
Tempo de umidificação (L)	-0,4100	1,7966	0,8407 ns
Tempo de umidificação (Q)	0,1276	1,4166	0,9364 ns
Tempo de residência (L)	-0,3400	1,7966	0,8674 ns
Tempo de residência (Q)	-1,3924	1,4166	0,4293 ns
Interação (L)	3,1000	3,1119	0,4241 ns

ns – não significativo

Verifica-se na Figura 4.8 a tendência da superfície de resposta para ruptura parcial da casca e amêndoa protegida e observa-se que as regiões desejadas encontram-se fora da faixa estudada.

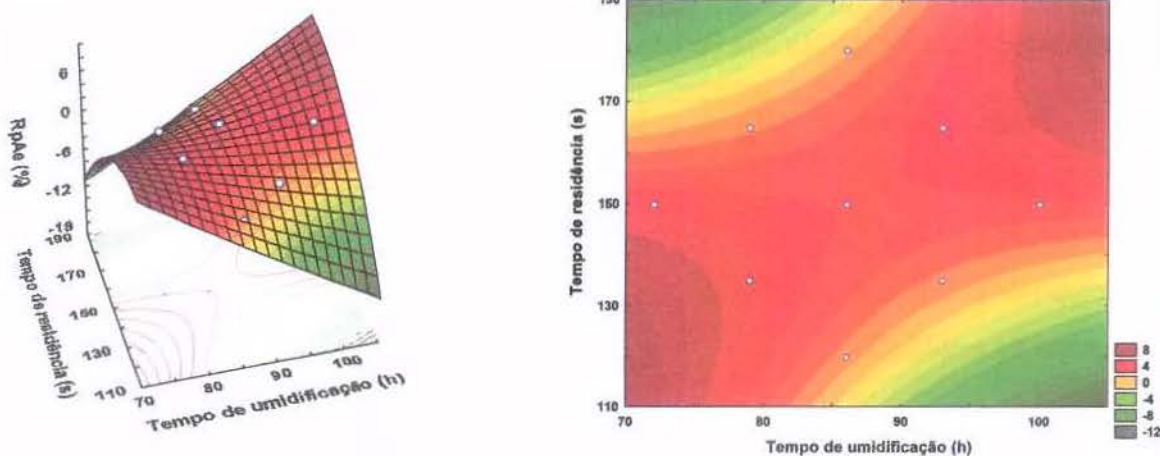


Figura 4.8. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura parcial da casca e amêndoa exposta em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio de impacto.

Ruptura total da casca e amêndoa danificada

Os resultados da análise estatística realizada nos dados experimentais para a ruptura total da casca e amêndoa danificada no ensaio de impacto da castanha de caju são apresentados na Tabela 4.7. Observa-se, que os efeitos estimados foram não significativos ($p \leq 0,05$).

O tempo de umidificação e a interação linear tiveram efeitos negativos, indicando que a resposta ruptura total da casca e amêndoa danificada deve ser menor quando se aumenta o tempo de umidificação e a sua interação.

Para o tempo de residência linear observa-se um efeito positivo sugerindo uma ruptura da casca e amêndoa danificada maior para um tempo de residência maior.

O fator com maior efeito na resposta é a interação linear tempo de umidificação e tempo de residência no LCC a 210°C.

Tabela 4.7. Efeito estimado, erro puro e grau de significância para a castanha com ruptura total da casca e amêndoa danificada no ensaio de impacto da castanha de caju.

Fonte de variação	Efeito	Erro puro	p
Média global	11,0647	3,3406	0,0803 ns
Tempo de umidificação (L)	-0,7917	3,7597	0,8527 ns
Tempo de umidificação (Q)	-1,6468	2,9645	0,6344 ns
Tempo de residência (L)	6,7050	3,7597	0,2165 ns
Tempo de residência (Q)	0,2682	2,9645	0,9362 ns
Interação (L)	-8,7350	6,5121	0,3118 ns

ns – não significativo

A tendência da superfície de resposta para ruptura total da casca e amêndoa danificada pode ser visualizada na Figura 4.9. Observa-se que a região desejada encontra-se fora da faixa estudada e que o ensaio 1 está mais próximo desta região.

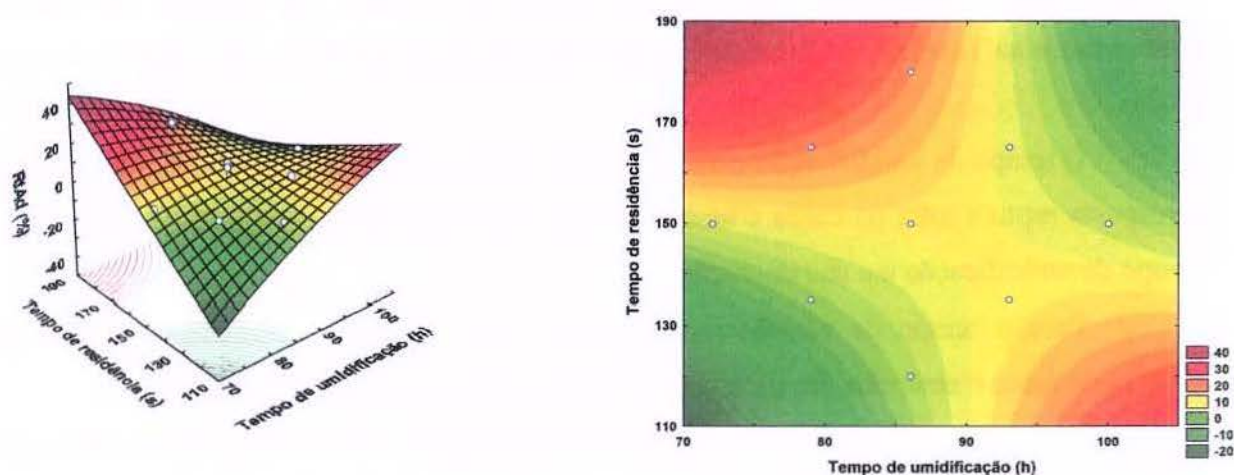


Figura 4.9. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura total da casca e amêndoa danificada em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio de impacto.

Discussões finais

Observa-se que o efeito combinado do tempo de umidificação e de residência no LCC a 210°C, é que oferece maior influência nas respostas estudadas, no entanto, a faixa de variação dos fatores escolhida, com base nos dados da indústria de beneficiamento, não apresentou diferenças estatisticamente significativas, apontando para a necessidade de uma ampliação da faixa de estudo.

4.4. Conclusões

O dispositivo proposto para determinação da deformação específica limite é inovador e mostrou-se eficaz. É importante como referência nas comparações de desempenho de mecanismos de decorticação baseados em compressão com deformação limitada.

Os resultados obtidos com os diversos lotes de castanhas ensaiadas evidenciam um potencial de obtenção de grande número de amêndoas inteiras com a aplicação de um único impacto, com deformação limitada, ao longo da largura da castanha.

A análise estatística aplicada aos dados experimentais revelou que as respostas foram não significativas na faixa estudada. O ensaio 1, com tempo de 79 horas de umidificação combinado com 135s de residência no LCC a 210°, revelou-se mais próxima da região procurada, com o máximo de *ruptura total da casca e amêndoa inteira* e o mínimo de *ruptura total da casca e amêndoas danificadas*.

4.5. Referências Bibliográficas

ARAUJO, F. V. M.; FERRAZ, A.C.O.; ARAÚJO, M.C., AUGUSTO, P.E.D. Comparação entre dois métodos de determinação de umidade de castanha de caju. **Simpósio Latino-Americano de Ciência de Alimentos**, 05, Campinas: Unicamp, nov. 2003, CD-Rom.

ARAÚJO, M. C. **Desenvolvimento e avaliação de uma máquina descascadora de amendoim.** 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba. 1999.

ASAE S410.1 – Dec1992. Moisture Measurement – Peanut: In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. *ASAE Standards 1994*. 41st. ed. St. Joseph; 1994. p. 477 – 478.

LEITÃO, A. M. **Algumas propriedades físicas e mecânicas da pimenta-do-reino preta, variedade kaluvally.** 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimento e Agrícola) - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo. 1983.

OLOSO, A.O.; CLARKE, B. Some aspects of strength properties of Cashew nuts. *Journal of Agricultural Engineering Research*. n.55, p.27-43, 1993.

5. ARTIGO 3: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPO PARA DECORTICAÇÃO DA CASTANHA DE CAJU POR MECANISMO DE CILINDROS ROTATIVOS

5.1. Introdução

Atualmente existem diversos sistemas semimecanizados e mecanizados de beneficiamento da castanha de caju, entretanto, o nível tecnológico desses equipamentos tem provocado perdas elevadas, apresentando amêndoas danificadas entre 40 e 50%. O baixo índice de amêndoas inteiras reduz o valor comercial do produto brasileiro no mercado internacional. O beneficiamento industrial da castanha, que corresponde a 96% da nossa produção, apresenta rendimento de amêndoas inteiras entre 50 a 60% e utiliza o impacto aleatório para ruptura da casca e liberação da amêndoa. Já o sistema semimecanizado, é utilizado por pequenos agricultores e cooperativas, responde ao restante da produção nacional, apresentando um rendimento de amêndoas inteiras de 90 a 95%. Este sistema utiliza lâminas para romper a casca da castanha de caju.

Por um lado tem-se um sistema de alta capacidade operacional, mas com elevadas perdas, por outro, um sistema com um bom rendimento de amêndoas inteiras, mas com uma baixa capacidade operacional. O maior desafio, portanto, é desenvolver um sistema de altos rendimentos operacionais e com baixos índices de danos as amêndoas.

Embora existam diversas concepções de dispositivos decortecedores, muitos com bons rendimentos em amêndoas inteiras, estes não conseguem competir no mercado devido ao alto custo de aquisição ou pelas dificuldades de operação e manutenção. Os rendimentos de amêndoas inteiras variam entre 50% a 97% (COSTA, 2001; JAIN e KUMAR, 1997; MONTEIRO, 1984; SOARES, 1986).

Os mecanismos compostos por cilindros rotativos desenvolvidos por TANG *et al.* (1982), para romper a casca da noz macadâmia através da deformação específica fornece indicativos para uma pesquisa da viabilidade no caso da castanha de caju.

Com isso, propôs-se através desse trabalho, desenvolver, construir e avaliar o desempenho de um decortecedor por cilindros rotativos capaz de romper a casca por

compressão, com deformação limitada, explorando as propriedades viscoelásticas do material como objetivo de liberação de amêndoas inteiras.

5.2. Metodologia

Considerações preliminares e princípios básicos

A concepção do protótipo para decorticação da castanha de caju foi baseada no princípio da aplicação de *deformação específica limitada* através de compressão, para romper a casca e liberar a amêndoa inteira. O mecanismo consiste de dois cilindros rotativos, dispostos paralelamente e montados de forma a receber a castanha e aplicar uma deformação na direção da sua largura quando da passagem entre eles. A distância entre as superfícies dos cilindros, móvel e fixo, estabelece a deformação máxima permitida designada de *deformação específica limite*. Os sentidos da rotação dos cilindros são opostas de forma a comprimir a castanha na sua passagem entre eles. A alimentação das castanhas no protótipo é individual, através de um conduto alimentador vertical, de seção trapezoidal, para manter a orientação da castanha durante a queda-livre até o contato com os cilindros rotativos.

Utilizam-se os cilindros rotativos para que a aplicação da deformação específica num curto espaço de tempo atenda as características viscoelásticas do material. Aplicação de uma pequena deformação em um curto espaço de tempo aumenta a tensão e provoca a ruptura da casca.

Mostra-se na Figura 5.1, a vista geral (A), a interação castanha-cilindro (B) e o conduto alimentador trapezoidal (C), do decortificador proposto. Dois cilindros de diâmetro ϕ giram em sentidos opostos com velocidades angulares W_1 e W_2 e encontram-se afastados a uma distância “e” na linha de maior proximidade.

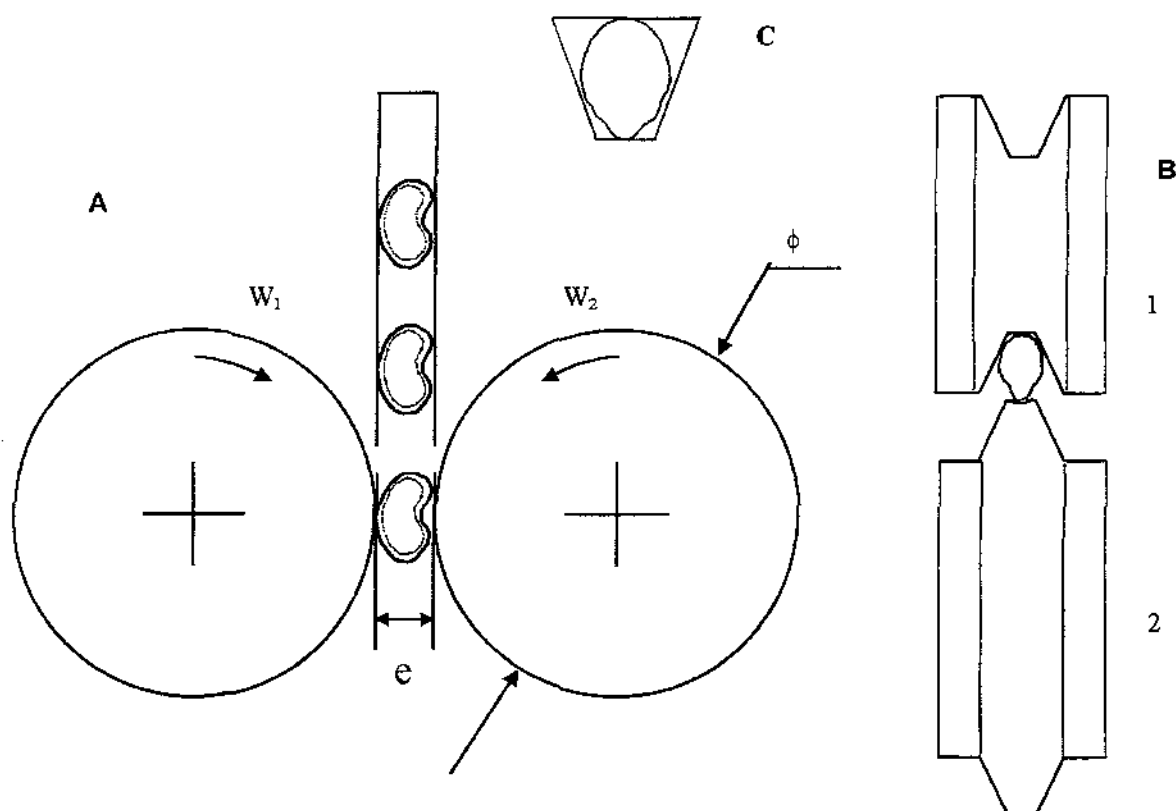


Figura 5.1. Representação esquemática da concepção inicial do decorticator proposto mostrando a vista lateral (A), a interação castanha cilindro (B) e o alimentador trapezoidal (C).

Dimensionamento dos diâmetros dos cilindros

Equações de equilíbrio estático

O diâmetro dos cilindros foi dimensionado para permitir que a castanha seja comprimida entre os cilindros, sem rejeição ou deslizamento.

Utilizaram-se condições de equilíbrio estático, sendo consideradas a força gravitacional atuante na castanha e o atrito superficial de forma que a soma do peso do fruto mais as componentes normais das forças de atrito, fossem superiores às componentes verticais das reações normais. Esta condição se assemelha ao equilíbrio estático de um corpo apoiado sobre dois cilindros justapostos e garantem que a castanha vai passar pelos cilindros.

Para gerar e resolver o sistema de equações vetoriais, através das condições de equilíbrio estático utilizou-se o software **Matlab 6.5**. As rotinas utilizadas são apresentadas no apêndice 1 e 2

Construção e avaliação de desempenho do protótipo

Confecção do protótipo

De acordo com as dimensões e desenhos técnicos fornecidos construiu-se o protótipo na oficina mecânica da Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, SP.

Procedimentos de preparação dos lotes de castanhas de caju

Para avaliar o desempenho do protótipo utilizaram-se castanhas de caju ‘CCP 76’ fornecidas pela Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa da Agroindústria Tropical, Fortaleza - CE. Lotes de cinquenta castanhas *in natura* sofreram umidificação, consistindo em submersão em água por 2 horas, seguido da drenagem e período de repouso de 86 horas no mesmo recipiente. As castanhas foram, então, submetidas a banho do LCC a 210°C por 150s, seguido de repouso por 2 horas. Após o repouso, retirou-se o excesso superficial de LCC com papel toalha e foram realizadas medidas da largura (Figura 5.2) de cada castanha.

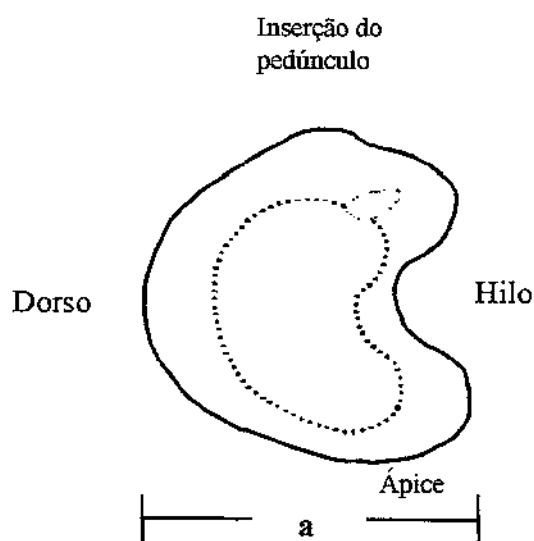


Figura 5.2. Dimensão característica da largura (a) da castanha de caju.

Deformação específica limite para os ensaios de desempenho

Com as medidas das larguras das castanhas calculou-se a média e utilizou 19% deste valor para ajustar a distância entre os cilindros rotativos do protótipo decortificador, de acordo com os resultados do capítulo 2.

Ensaio de desempenho do protótipo

Os ensaios de desempenho foram realizados com alimentação manual e coleta individual das castanhas após a passagem pelos cilindros, com as rotações de 270, 360, 435, 520rpm. Foram ensaiadas 50 castanhas para cada rotação.

Após passar pelos cilindros decortificadores, cada castanha foi avaliada segundo o efeito da compressão, e classificada seguindo os mesmos critérios adotados no capítulo 4 (página 51).

Procedimentos de preparação dos lotes de castanhas de caju

Foram utilizadas castanhas da mesma procedência. Lotes de cinquenta castanhas *in natura* passaram pelo mesmo procedimento com diferentes tempos de umidificação e tempo de residência no LCC, totalizando onze ensaios, de acordo com o planejamento experimental utilizado no capítulo 3, página 24, (BARROS NETO *et al.*, 2002).

Determinação da rotação de trabalho dos cilindros

O protótipo foi ensaiado com rotações iguais nos cilindros de 1300, 1400, 1500, 1600 e 1700rpm e rotações relativas para o cilindro fixo e cilindro móvel de 1050 – 1650; 1150 – 1450; 1200 – 1600 rpm respectivamente.

Para a rotação combinada de melhor desempenho na decorticação da castanha utilizaram-se outros dois níveis acima e abaixo, para a identificação da melhor combinação de rotação de trabalho.

Estimativa da velocidade da castanha no instante do impacto

Para se estimar a velocidade da castanha no instante do impacto sobre a placa rígida, utilizou-se a equação $V_t = w \cdot r$, onde V_t representa a velocidade tangencial do cilindro (m/s), w a velocidade angular do cilindro (rad/s) e r o raio do cilindro (m). A média das velocidades tangenciais dos cilindros foi considerada como uma estimativa da velocidade da castanha ao atingir a placa de impacto, desconsiderando a resistência do ar e desvios de trajetória.

Ensaio de desempenho do protótipo modificado

Logo após a preparação das castanhas realizou-se, os onze ensaios de acordo com o planejamento experimental, para a determinação do desempenho do protótipo modificado, em cada tratamento estabelecido com a limitação dos cilindros rotativos ao nível de 19% de deformação relativa à largura da castanha e com a rotação de trabalho pré-estabelecida. Para cada ensaio foram utilizadas 50 castanhas. Cada castanha foi alimentada manualmente no decortificador de forma que a inserção do pedúnculo ficasse voltado para baixo e o impacto adicional ocorresse na área de maior massa da castanha.

Foi utilizado o mesmo critério para a avaliação dos lotes de castanhas, descrito no capítulo 4 (página 51).

Determinação de umidade

Utilizou-se a metodologia da ASAE S410.1, 1992 com algumas alterações e de acordo com os percentuais de casca e amêndoa da castanha ‘CCP-76’ segundo (ARAÚJO *et al.*, 2003) como descrito no capítulo 4.

5.3. Resultados e Discussão

Protótipo decortificador

Dimensionamento dos cilindros

Apresenta-se na Figura 5.3 uma representação esquemática das forças atuantes no sistema. O eixo X-Y é a base inercial do sistema e os eixos $X_1 - Y_1$, $X_2 - Y_2$ representam as bases locais. Θ_1 posiciona angularmente a base 1 com relação a base inercial, e o Θ_2 posiciona a base 2. As reações normais, N_1 e N_2 , as forças resultantes, R_1 e R_2 e as velocidades angulares W_1 e W_2 .

O equilíbrio na direção vertical determina a magnitude das forças envolvidas, cujos valores determinam o modo de operação, de alimentação ou rejeição. A castanha foi considerada esférica para simplificar o equacionamento. O diâmetro dos cilindros é função do coeficiente de atrito entre as superfícies do cilindro e castanha, da distância entre os cilindros, que depende das larguras médias das castanhas e da deformação específica limite estabelecida.

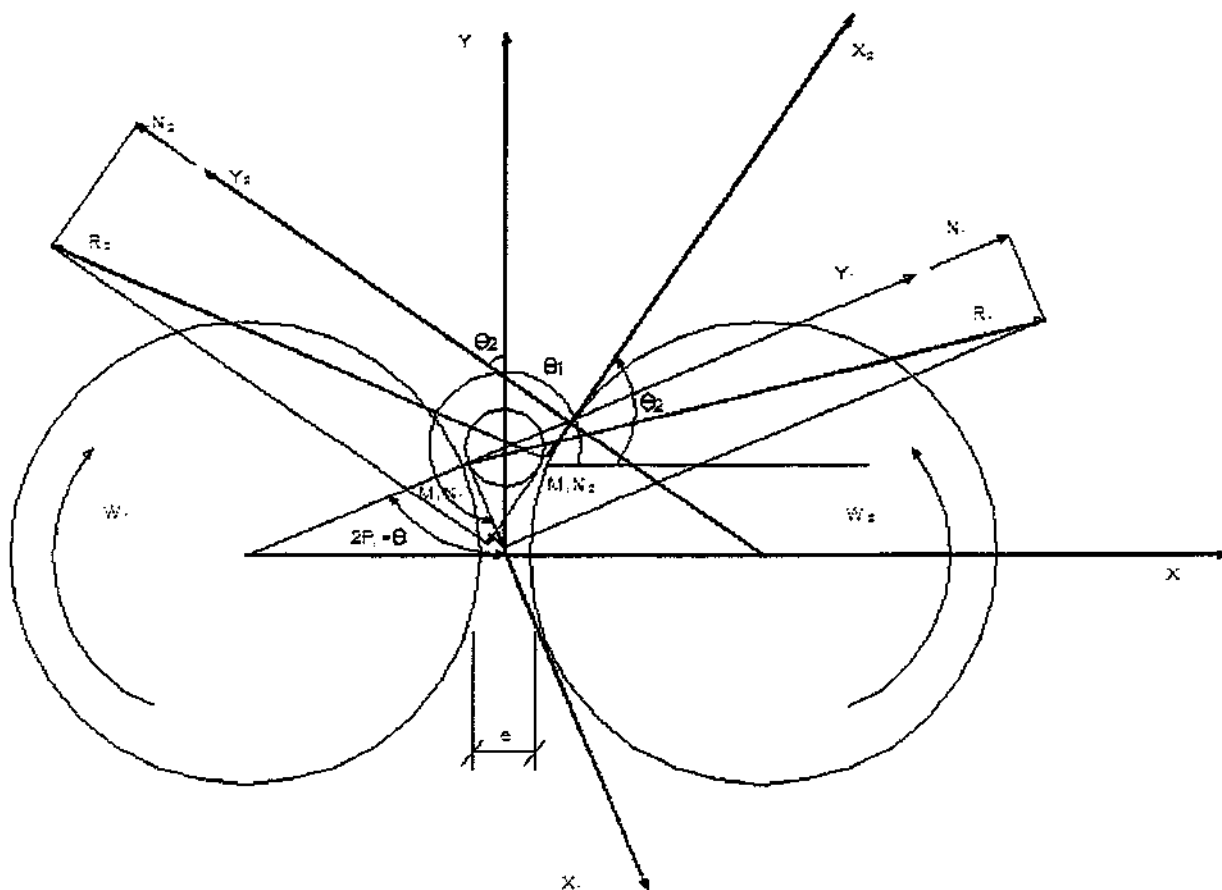


Figura 5.3. Representação esquemática do equacionamento estático do mecanismo proposto.

Considerando o coeficiente de atrito de 0,3 determinado em laboratório; o diâmetro da castanha de 38mm; o espaçamento entre os cilindros de 26,29mm e o peso médio de 7g encontrou-se em simulação feita no **Matlab 6.5**, mostrado na Figura 5.4, o resultado da reação horizontal (N) versus diâmetro do cilindro (mm). A força horizontal é a reação que determina o diâmetro dos cilindros e quando se observa uma elevação dos níveis de força com queda abrupta o valor encontrado no eixo x será a dimensão mínima do cilindro. Para esta simulação, observa-se que valores de diâmetro acima de 240mm atendem o modo de alimentação.

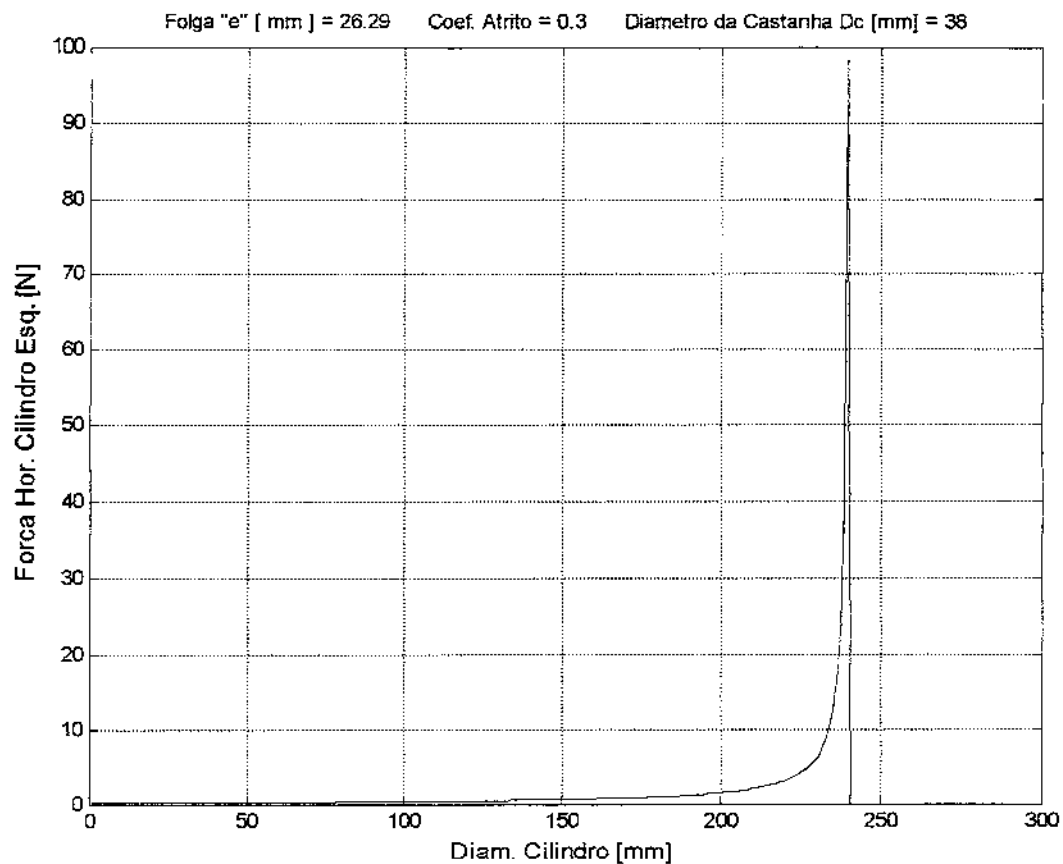


Figura 5.4. Relação da força horizontal versus diâmetro dos cilindros para o seu dimensionamento.

Partes constituintes do protótipo

Apresenta-se na Figura 5.5 uma vista em perspectiva do protótipo decortificador de castanha indicando as suas principais partes constituintes.

Salienta-se que cada cilindro do mecanismo de decorticação é montado num eixo possibilitando que o sistema receba outros cilindros, para aumentar a sua capacidade operacional.

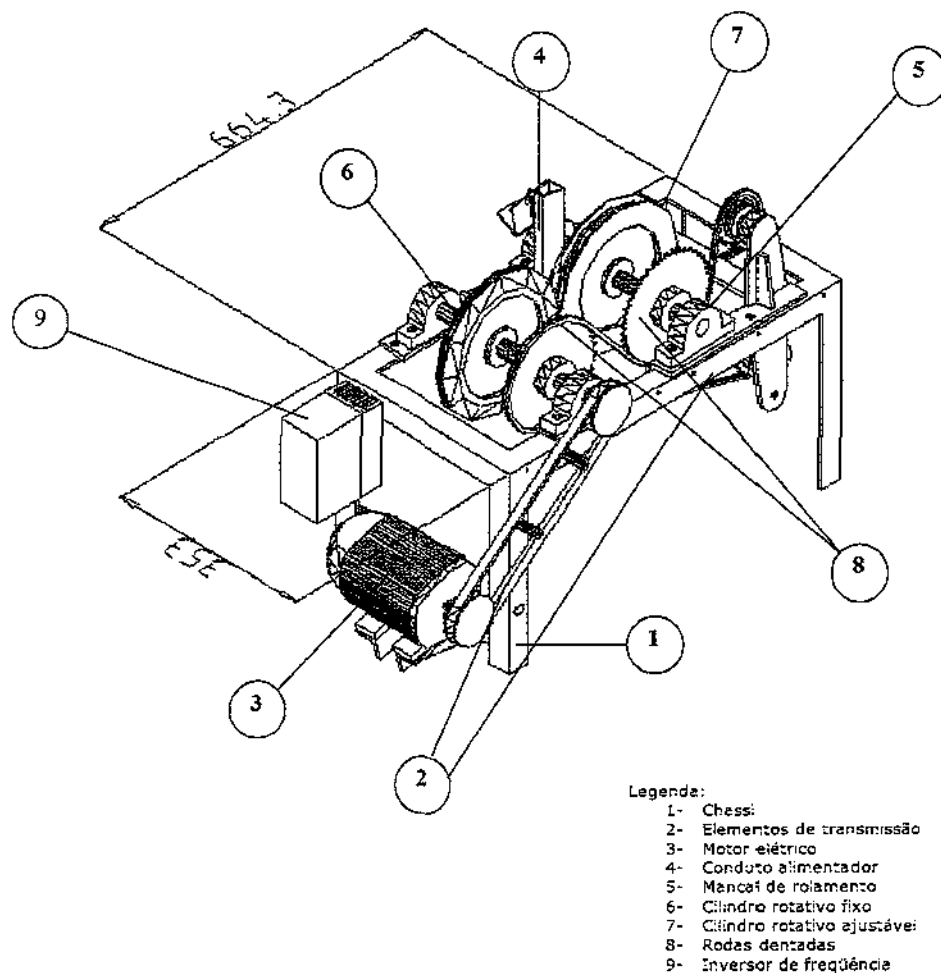


Figura 5.5. Vista do protótipo decortificador de castanha de caju com mecanismo cilíndrico rotativo mostrando seus principais componentes.

Ensaio de desempenho do protótipo

Inicialmente se trabalhou com castanhas *in natura* de tamanho médio de 27,39mm da largura, não obtendo sucesso devido às alterações nas dimensões da castanha após o tratamento térmico. O ensaio de desempenho do protótipo foi realizado utilizando-se castanhas de largura média entre 26 a 31mm, medidas após tratamento térmico.

Não houve problemas na alimentação, pois as castanhas deslizaram suavemente pelo conduto e se encaixaram bem no perfil dos cilindros. Não foi observado desvio de posição da

castanha durante a compressão, sendo a deformação aplicada ao longo da largura da castanha, como desejado.

As castanhas que se abriram totalmente apresentaram *ruptura total da casca* ao longo da união dos cotilédones, liberando a *amêndoa inteira* sem nenhum dano (RtAi). As castanhas com *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida*, apresentaram condições de reprocessamento (RpAp) para completar a ruptura da casca e liberar a amêndoa. As castanhas com *ruptura parcial da casca e amêndoa exposta* (RpAe), não apresentaram condições de reprocessamento. As amêndoas danificadas foram as castanhas com *ruptura total da casca e da amêndoa* (RtAd).

Algumas castanhas apresentaram rachaduras da casca e da amêndoa, na direção hilo-dorso, indicando a necessidade de um maior atrito na superfície de contato com os cilindros para evitar o dano as amêndoas.

Na Tabela 5.1, observam-se os resultados da avaliação do protótipo a várias rotações de trabalho. Operando-se na rotação de 435rpm o protótipo apresentou o melhor desempenho com nível de 36,74% de castanhas com ruptura total da casca e amêndoa inteira liberada e 34,69% de castanhas com ruptura parcial da casca e amêndoa protegida, ou seja, com potencial de abertura se submetidas a uma leve solicitação mecânica.

Comparando o ensaio de desempenho do protótipo (Tabela 5.1) com o ensaio de impacto para a determinação da deformação específica limite, apresentando 77,55 % de *ruptura total da casca com amêndoa inteira* (Tabela 4.2), do capítulo 4, (página 56) os resultados foram aquém do esperado.

Observam-se também valores crescentes de castanhas abertas à medida que a rotação aumenta. Às rotações de 435 e 520rpm, apesar de não apresentarem variações substanciais no número de castanhas abertas, não descartam a possibilidade de que esse número pode crescer com o aumento da rotação de trabalho.

Tabela 5.1. Resultados da avaliação de desempenho do protótipo a várias rotações de trabalho com castanhas de tamanho médio entre 26 e 31mm com 50 castanhas.

Classes	Rotação (rpm)			
	270	360	435	520
Ruptura total amêndoa inteira (%) ¹	14,59	24,49	36,74	34
Ruptura parcial amêndoa protegida (%) ²	45,83	53,06	34,69	38
Ruptura parcial amêndoa exposta (%) ³	8,33	0	0	0
Ruptura total amêndoa danificada (%) ⁴	31,25	22,45	28,57	28

¹ Castanha com ruptura total da casca e amêndoa íntegra liberada; ² Castanha com ruptura parcial da casca, com potencial de abertura total através de solicitação mecânica adicional; ³ Castanha com rompimento parcial impossibilitando novo impacto na mesma direção; ⁴ Castanha com ruptura da casca e da amêndoa.

Após calcular e comparar os tempos de contato da castanha com mecanismo de impacto através do martelo e o de cilindros, verificou-se que a rotação dos cilindros estava muito baixa, sugerindo um aumento da rotação para que houvesse mais semelhança entre os procedimentos e desempenho.

Houve tentativas de se aumentar a rotação dos cilindros para 1700rpm, o que iria aproximar os sistemas, mas verificou-se altos níveis de vibração e riscos na operação devido a instabilidades da transmissão de correntes de roletes.

O grande número obtido de *castanhas com ruptura parcial da casca e amêndoa protegida* (Tabela 5.1) mostra trabalho incompleto do mecanismo proposto.

Após a análise dos resultados de desempenho do primeiro protótipo indicaram-se as alterações necessárias com o objetivo de melhorar o seu desempenho.

A alta velocidade com que a castanha deixa os cilindros sugere que essa energia poderia ser aproveitada para completar o rompimento da casca e liberar a amêndoa. Muito embora isso se distancia um pouco da idéia original, de uma única compressão em direção definida, parece que um impacto adicional, contra placa rígida, de forma direcionada, poderia completar a ruptura da casca liberando a amêndoa.

Modificações no protótipo

Pelas dificuldades encontradas para acomodar castanhas tamanho médio e manter rotações mais elevadas, foram feitas modificações no protótipo com novo dimensionamento para os cilindros, ranhuras na superfície de contato e modificação na transmissão, para permitir rotações maiores, e segurança no seu manuseio e a inclusão de uma placa de impacto para complementar a ruptura. Esta placa deverá ser posicionada na parte inferior do chassi, a 800mm de distância dos cilindros, com um ângulo de 11° em relação a horizontal.

As sugestões de alterações foram realizadas, na oficina mecânica da Embrapa Instrumentação Agropecuária em São Carlos, SP.

Em nova simulação feita no **Matlab 6.5**, com um maior coeficiente de atrito, determinado em laboratório entre cilindro e castanha, observa-se que valores de diâmetro externo acima de 125mm atendem a situação de alimentação (Figura 5.6).

A elevação com queda abrupta nos níveis de força indicam a dimensão mínima que o cilindro deve ter para permitir que o modo seja de alimentação e observada no eixo X.

Como o diâmetro da primeira simulação foi maior que o da segunda manteve-se a dimensão, pois iria atender o modo de alimentação.

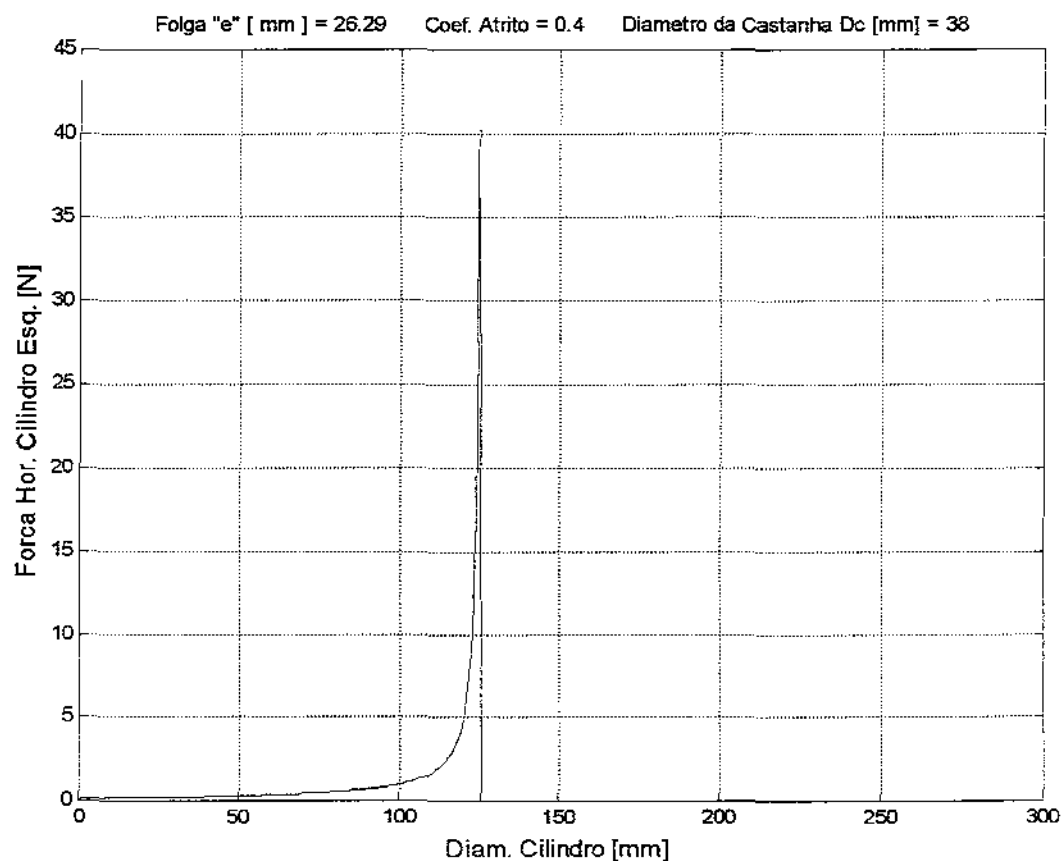


Figura 5.6. Relação da força horizontal versus diâmetro dos cilindros para protótipo modificado.

Protótipo decortificador modificado

Partes constituintes do protótipo

O material empregado para construção do protótipo encontra-se listado no apêndice 3.

Apresenta-se na Figura 5.7 uma vista do protótipo modificado de decorticação de castanha, indicando as suas principais partes constituintes.

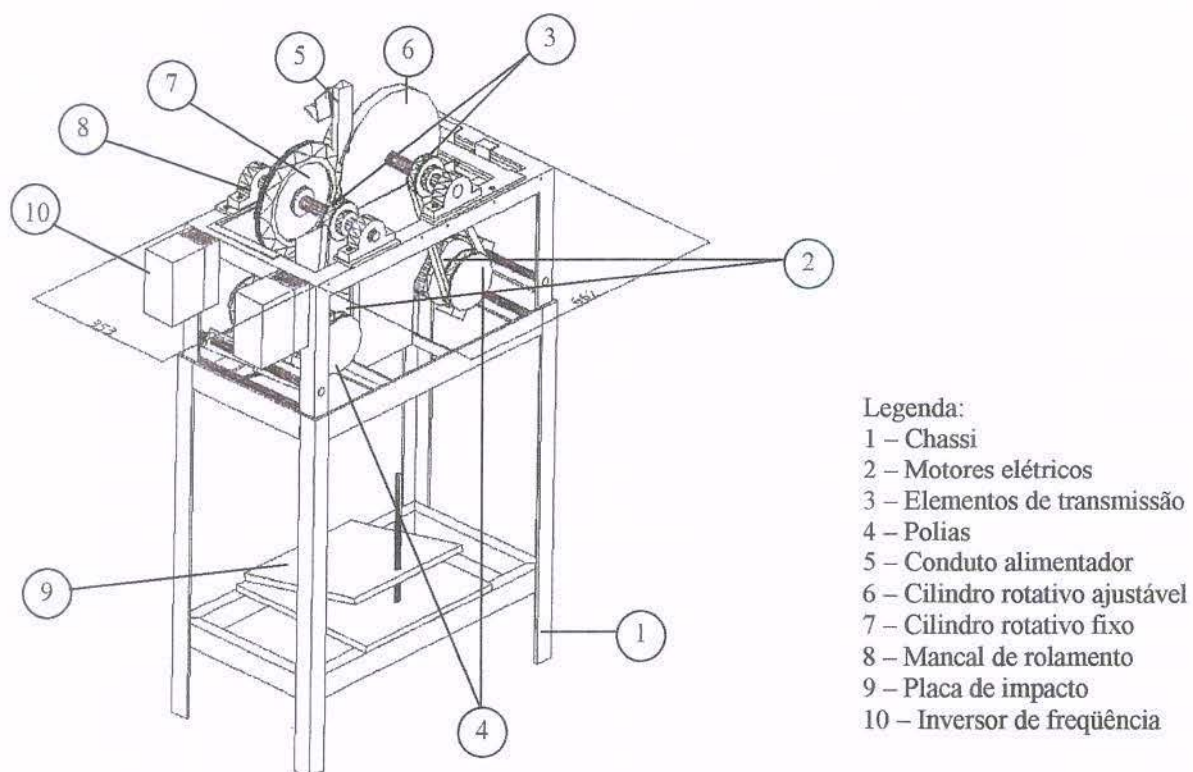


Figura 5.7. Vista do protótipo decortificador modificado de castanha de caju por mecanismo cilíndrico rotativo mostrando seus principais componentes.

Na Figura 5.8. observa-se a interação da castanha com cilindro decortificador (a) e placa de impacto (b).

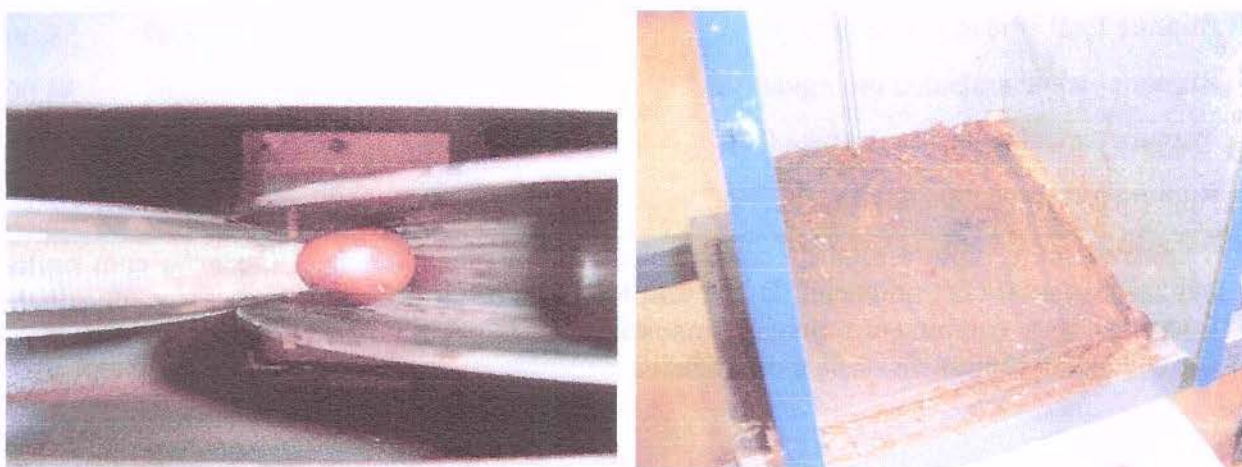


Figura 5.8. Vista da interação entre castanha e cilindro decortificador (a) e da placa de impacto (b)

Resultado de desempenho a diferentes rotações

Trabalhando-se com rotação iguais (1300, 1400, 1500, 1600 e 1700rpm) obteve-se entre 10 e 44% de *ruptura total e amêndoa inteira*. Com o aumento da rotação dos cilindros observou-se um decréscimo no percentual de amêndoas inteiras. No entanto, trabalhando-se com rotações diferenciadas (1050rpm – 1650rpm; 1150rpm – 1450rpm e 1200rpm – 1600rpm) identificou-se a melhor combinação em 1050rpm – 1650rpm em função do percentual de amêndoas inteiras. Vale ressaltar, que as rotações diferenciadas acabam provocando um cisalhamento nas castanhas no momento em que estas passam pelos cilindros, tendo como efeito um aumento na eficiência do sistema de decorticação.

Partindo-se da melhor combinação identificada anteriormente, investigaram-se dois níveis acima e abaixo deste (Tabela 5.2.) Os resultados apontam a rotação diferenciada 1150rpm – 1750rpm com a de melhor desempenho em ruptura total da casca e amêndoa inteira.

Tabela 5.2. Desempenho do protótipo modificado a várias rotações de trabalho com castanhas de tamanho médio entre 22,31 e 33,22mm.

Classes	Rotações (rpm)				
	950 – 1550	850 - 1450	1050 - 1650	1250 - 1850	1150 - 1750
Ruptura total amêndoa inteira (%) ¹	36,00	30,00	24,49	28,88	58,00
Ruptura parcial amêndoa protegida (%) ²	48,00	68,00	46,94	46,67	34,00
Ruptura parcial amêndoa exposta (%) ³	16,00	2,00	26,53	6,67	6,00
Ruptura total amêndoa danificada (%) ⁴	0,00	0,00	20,4	17,78	2,00

¹ Castanha com ruptura total da casca e amêndoa íntegra liberada; ² Castanha com ruptura parcial da casca, com potencial de abertura total através de solicitação mecânica adicional; ³ Castanha com rompimento parcial impossibilitando novo impacto na mesma direção; ⁴ Castanha com ruptura da casca e da amêndoa.

Resultado do cálculo estimado da velocidade da castanha

Encontrou-se uma velocidade média da castanha de 15,26 m/s no instante do impacto com a placa rígida.

Ensaios de desempenho do protótipo modificado

As castanhas dos onze ensaios realizados, de acordo com o planejamento experimental, após os respectivos tempos de residência no LCC, apresentaram largura média de 29,17mm e o ajuste dos cilindros proporcionou uma deformação de 5,54mm. Foi utilizada a rotação diferenciada 1150rpm - 1750rpm, de acordo com o resultado do ensaio anterior.

Apresenta-se na Figura 5.9 a avaliação de desempenho do protótipo para todos os ensaios realizados. Obteve-se um percentual de 70,41% de *ruptura total da casca e amêndoa inteira liberada* para o ensaio 11, entretanto obteve-se um percentual de 8,16% de amêndoas danificadas, devido este lote de castanhas ter o maior tempo de residência no LCC. O menor índice de castanhas com *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida*, 10,2%, foi para o ensaio 3. Para a resposta de castanha com *ruptura parcial da casca e amêndoa exposta* o menor índice, 4%, foi observado no ensaio 10. Verifica-se nos ensaios 1 e 9 a não ocorrência de amêndoas danificadas.

De modo geral, pode-se considerar o melhor experimento aquele que obteve o maior índice de amêndoas inteiras combinado com o menor percentual de danos as amêndoas, com isso, o ensaio 1 é o que apresenta o melhor resultado.

Valores médios de umidade (bu) de cada um dos ensaios nos diferentes tratamentos térmicos pode ser observada na Tabela 4.3 (capítulo 4, página 57).

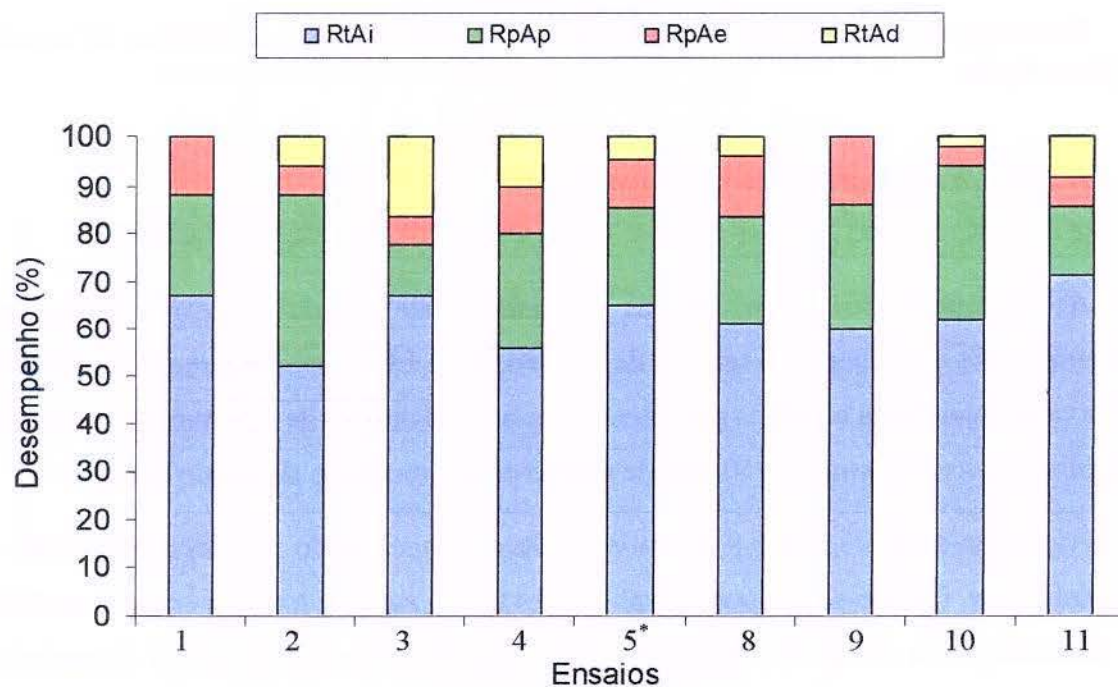


Figura 5.9. Desempenho do protótipo de decorticação na ruptura total da casca com amêndoa inteira (RtAi), ruptura parcial da casca com amêndoa protegida (RpAp), ruptura parcial da casca com amêndoa exposta (RpAe) e ruptura total da casca com amêndoa danificada (RtAd), expresso em porcentagem, numa deformação específica de 19% e rotação de 1150-1750rpm.

Ruptura total da casca e amêndoa inteira

Apresenta-se na Tabela 5.3 o resultado da análise estatística referente aos dados experimentais da *ruptura total da casca e amêndoa inteira* e verifica-se para as variáveis consideradas a não significância à $p \leq 0,05$.

Para o tempo de umidificação no modelo linear e quadrático obteve-se efeito de sinal negativo indicando que quanto maior essa variável menor a resposta. O tempo de residência e a interação no modelo linear apresentaram efeito de sinal positivo o que aponta para as melhores respostas quando se tem maiores tempos de umidificação e de residência no LCC. O efeito que apresentou maior influência na resposta foi o tempo de umidificação no modelo linear por apresentar o maior valor.

Tabela 5.3. Efeito estimado, erro puro e grau de significância para ruptura total da casca e amêndoa inteira no ensaio de desempenho do protótipo com castanhas de caju ‘CCP 76’.

Fonte de variação	Efeito	Erro puro	p
Média global	63,5600	2,1529	0,0011*
Tempo de umidificação (L)	-4,8600	2,4230	0,1827 ns
Tempo de umidificação (Q)	-2,0600	1,9105	0,3937 ns
Tempo de residência (L)	3,8100	2,4230	0,2565 ns
Tempo de residência (Q)	0,9900	1,9105	0,6559 ns
Interação (L)	2,0000	4,1968	0,6807 ns

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns – não significativo

Como não houve diferenças estatísticas à $p \leq 0,05$ (Tabela 5.3), para as variáveis consideradas, pode-se apresentar a tendência da superfície de resposta e curva de contorno para *ruptura total da casca e amêndoa inteira* em função do tempo de umidificação e tempo de residência no LCC (Figura 5.10). Quando se desloca da região verde para a vermelha aumenta a resposta. Verifica-se que a região procurada, neste caso a de máximo, encontram-se

na combinação do menor tempo de umidificação e de residência no LCC e no tempo médio de umidificação e máximo de residência. Este comportamento é encontrado próximo dos ensaios 1 e 11.

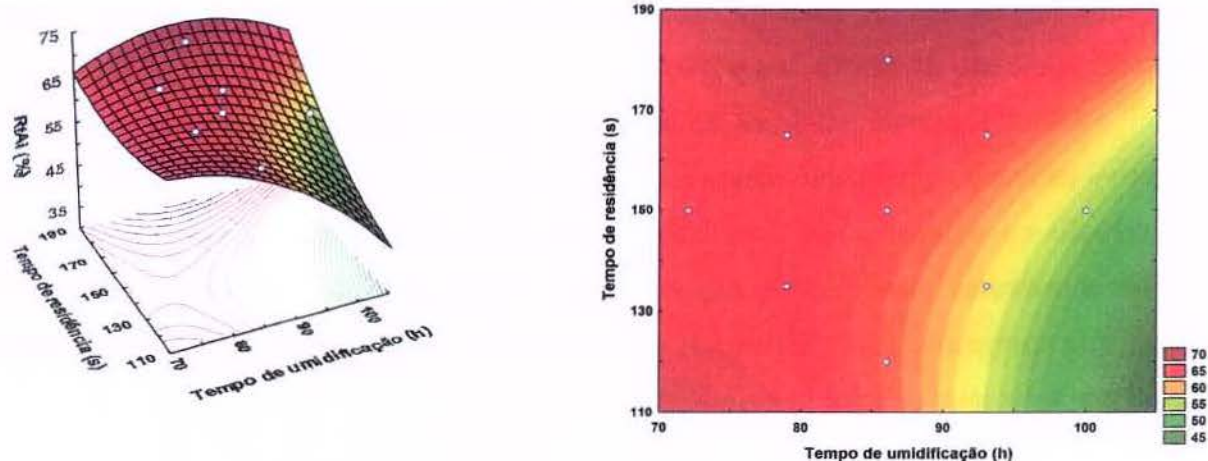


Figura 5.10. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura total da casca e amêndoa inteira em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio do protótipo.

Ruptura parcial da casca e amêndoa protegida

Verifica-se o efeito estimado referente à resposta *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida* na Tabela 5.4. O tempo de residência no modelo linear apresentou significância estatística à $p \leq 0,05$. Observa-se que o tempo de umidificação no modelo linear proporcionou um efeito de sinal positivo implicando numa resposta maior de ruptura parcial da casca e amêndoa protegida. O tempo de residência e a interação do modelo linear tem efeito de sinal negativo apontando para respostas menores quando os níveis da variável aumenta. A maior influência na resposta de *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida*, foi verificado no tempo de residência do modelo linear, isto é, quanto maior o tempo de residência no LCC a 210°C, mais frágil torna-se a castanha, e conseqüentemente, menores as quantidades de *castanha com ruptura parcial da casca e amêndoa protegida*.

Tabela 5.4. Efeito estimado, erro puro e grau de significância para ruptura parcial da casca e amêndoa protegida no ensaio de desempenho do protótipo com castanhas de caju ‘CCP 76’.

Fonte de variação	Efeito	Erro puro	p
Média global	20,5173	1,3255	0,0041*
Tempo de umidificação (L)	6,08167	1,4918	0,0552 ns
Tempo de umidificação (Q)	1,9641	1,1763	0,2369 ns
Tempo de residência (L)	-9,6050	1,4918	0,0233*
Tempo de residência (Q)	1,4241	1,1763	0,3497 ns
Interação (L)	-0,8950	2,5840	0,7621 ns

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns – não significativo

Após a retirada das variáveis não significativas, mostradas na tabela, apresenta-se na Tabela 5.5, a análise de variância (ANOVA) para a *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida*. Segundo a metodologia proposta por BARROS NETO *et al.* (2002); BOX e WETZ (1973), o modelo é considerado preditivo quando o $F_{\text{calculado}}$ para a regressão for no mínimo de quatro a cinco vezes o valor de F_{tabelado} . Como o $F_{\text{calculado}}$ referente à regressão foi apenas 1,86 vezes o F_{tabelado} o modelo não é preditivo. O percentual máximo de variação explicável, que representa os dados experimentais, é de 97%, comparado com o que o modelo pode explicar que é de 51%.

Tabela 5.5. Análise de variância para a ruptura parcial da casca e amêndoa protegida no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju ‘CCP 76’.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calculado}}$	F_{tabelado}
Regressão	276,7681	1	276,7681	9,51	5,12
Resíduo	262,0010	9	29,1112		
Falta de ajuste	248,6471	7	35,5210	5,32	19,35
Erro puro	13,3539	2	6,6769		
Total	538,7691	10	53,8769		

% de variação explicada: 51

% máximo de variação explicável: 97

SQ – Soma quadrática, GL – Graus de liberdade, MQ – Média quadrática.

Verifica-se na Figura 5.11 a tendência da superfície de resposta para *ruptura parcial da casca e amêndoa protegida* e observa-se que a região procurada, neste caso a de mínimo, encontra-se nos níveis máximo do tempo de residência combinado com o tempo médio de umidificação.

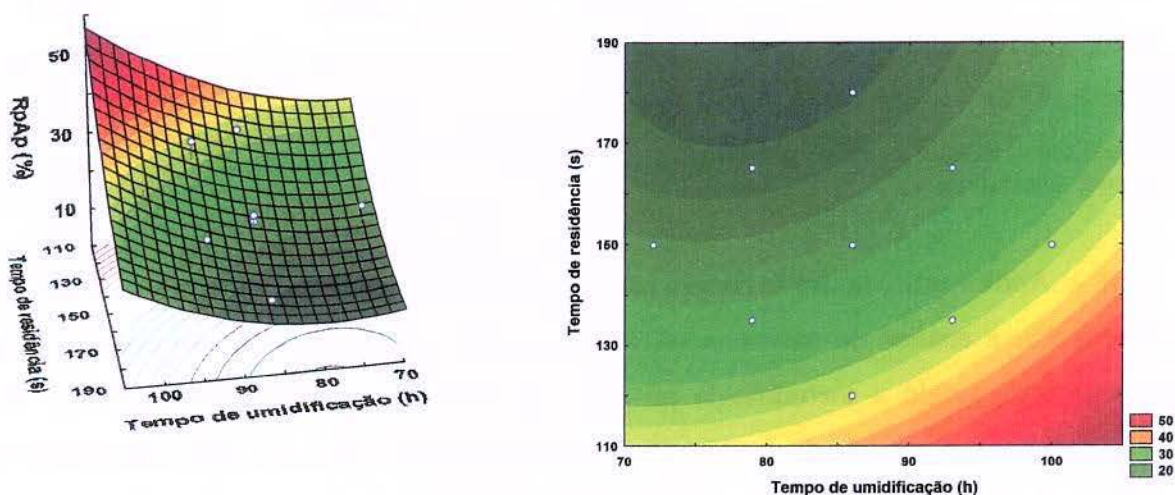


Figura 5.11. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura parcial da casca e amêndoa protegida em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio do protótipo.

Ruptura parcial da casca e amêndoa exposta

O efeito estimado para a resposta da *ruptura parcial da casca e amêndoa exposta* é verificado na Tabela 5.6. Observa-se que o tempo de residência no modelo quadrático e a interação no modelo linear foram significativos à $p \leq 0,05$. O tempo de umidificação, tempo de residência e sua interação teve efeito de sinal positivo implicando numa resposta maior quando se tem um máximo da variável. O efeito que teve maior influência na resposta foi à interação tempo de umidificação e tempo de residência no LCC a 210°C.

Tabela 5.6. Efeito estimado, erro puro e grau de significância para ruptura parcial da casca e amêndoa exposta no ensaio de desempenho do protótipo com castanhas de caju ‘CCP 76’.

Fonte de variação	Efeito	Erro puro	p
Média global	9,4163	0,4831	0,0026*
Tempo de umidificação (L)	0,1933	0,5437	0,7562 ns
Tempo de umidificação (Q)	1,7192	0,4287	0,0569 ns
Tempo de residência (L)	0,3533	0,5437	0,5825 ns
Tempo de residência (Q)	-2,3108	0,4287	0,0327*
Interação (L)	5,0600	0,9417	0,0329*

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns – não significativo

Apresenta-se na Tabela 5.7 a análise de variância para a *ruptura parcial da casca e amêndoa exposta* dos fatores significativos, onde se verifica que o $F_{\text{calculado}}$ referente à regressão foi apenas 2,86 vezes maior do que o F_{tabelado} , implicando num modelo não preditivo. O percentual máximo de variação explicável, que representa os dados experimentais, é de 98%, comparado com o que o modelo pode explicar que é de 76%.

Tabela 5.7. Análise de variância para a ruptura parcial da casca e amêndoa exposta no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju ‘CCP 76’.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calculado}}$	F_{tabelado}
Regressão	76,9093	2	38,4547	12,75	4,46
Resíduo	24,1307	8	3,0163		
Falta de ajuste	22,3569	6	3,7262	4,20	19,33
Erro puro	1,7738	2	0,8869		
Total	101,0401	10	10,1040		

% de variação explicada: 76

% máximo de variação explicável: 98

SQ – Soma quadrática, GL – Graus de liberdade, MQ – Média quadrática.

Apresenta-se na Figura 5.12 a tendência da superfície de resposta para *ruptura parcial da casca e amêndoa exposta* e observa-se que as regiões dejesadas, que para esta resposta é de mínimo, encontram-se no mínimo de umidificação e mínimo de residência no LCC como também, no mínimo de umidificação e máximo de residência no LCC.

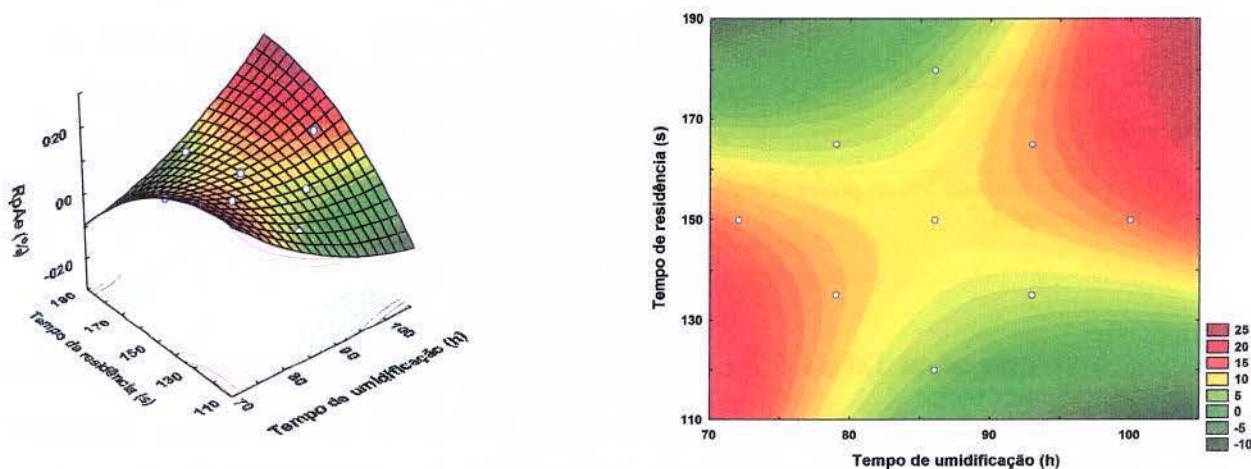


Figura 5.12. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura parcial da casca e amêndoa exposta em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio de protótipo.

Ruptura total da casca e amêndoa danificada

O efeito estimado para a *ruptura total da casca e amêndoa danificada* é observada na Tabela 5.8. O tempo de umidificação e a interação no modelo linear foram significativos à $p \leq 0,05$. O tempo de umidificação e a interação no modelo linear apresentaram efeito de sinal negativo, ou seja, ocorre a menor resposta com o máximo da variável. O tempo de residência no modelo linear teve efeito de sinal positivo implicando que quanto maior o tempo de residência maior a resposta de *ruptura total da casca e amêndoa danificada*.

Tabela 5.8. Efeito estimado, erro puro e grau de significância para ruptura total da casca e amêndoa danificada no ensaio de desempenho do protótipo com castanhas de caju 'CCP 76'.

Fonte de variação	Efeito	Erro puro	p
Média global	6,5063	0,5528	0,0071*
Tempo de umidificação (L)	-1,4150	0,6222	0,1508 ns
Tempo de umidificação (Q)	-1,6233	0,4906	0,0805 ns
Tempo de residência (L)	5,4417	0,6222	0,0128*
Tempo de residência (Q)	-0,1033	0,4906	0,8527 ns
Interação (L)	-6,1650	1,0776	0,0292 *

* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns – não significativo

Observa-se na Tabela 5.8 a análise de variância para a ruptura parcial da casca e amêndoa exposta dos fatores significativos, onde se verifica que o $F_{\text{calculado}}$ referente à regressão foi apenas 2,86 vezes maior do que o F_{tabelado} , implicando num modelo não preditivo. O percentual máximo de variação explicável, que representa os dados experimentais, é de 98%, comparado com o que o modelo pode explicar que é de 76%.

A análise de variância para ruptura total da casca e amêndoa danificada dos fatores significativos pode ser observado na Tabela 5.9. Verifica-se que o $F_{\text{calculado}}$ referente à regressão é apenas 1,18 vezes maior que F_{tabelado} implicando num modelo não preditivo. O percentual máximo de variação explicável, que representa os dados experimentais, é de 99%, comparado com o que o modelo pode explicar que é de 57%.

Tabela 5.9. Análise de variância para a ruptura total da casca e amêndoa danificada no ensaio de desempenho do protótipo com castanha de caju 'CCP 76'.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calculado}}$	F_{tabelado}
Regressão	126,8424	2	63,4212	5,27	4,46
Resíduo	96,2184	8	12,0273		
Falta de ajuste	93,8958	6	15,6493	13,48	19,33
Erro puro	2,3226	2	1,1613		
Total	223,0609	10	22,3061		

% de variação explicada: 57

% máximo de variação explicável: 99

SQ – Soma quadrática, GL – Graus de liberdade, MQ – Média quadrática.

Observa-se na Figura 5.13 a tendência da superfície de resposta para ruptura total da casca e amêndoa danificada e verifica-se que as regiões de ótimo encontram-se com o mínimo de umidificação e máximo de residência no LCC.

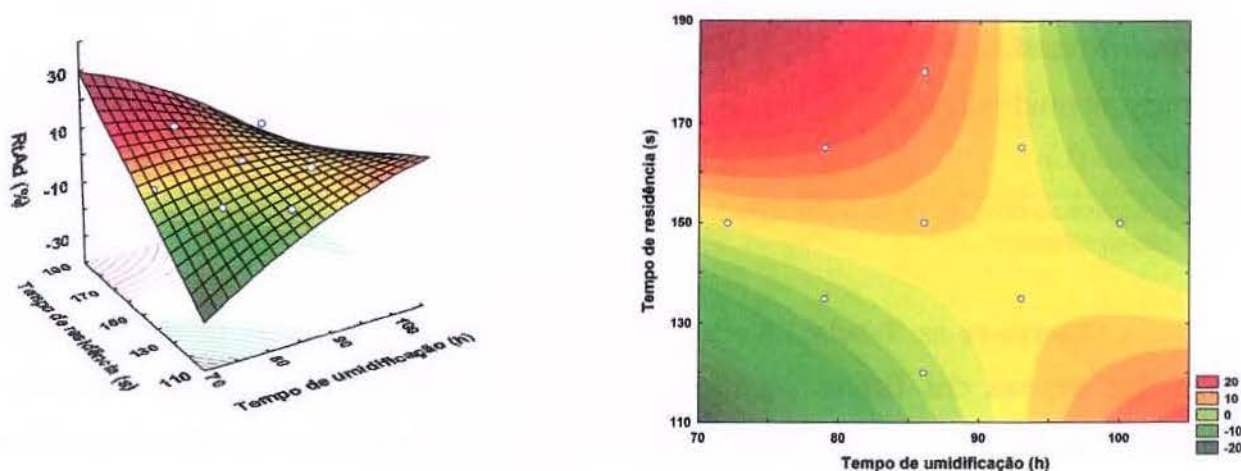


Figura 5.13. Tendência da superfície de resposta e curva de contorno para a ruptura total da casca e amêndoa danificada em função do tempo de umidificação e tempo de residência no ensaio do protótipo.

Discussões finais

As alterações nas dimensões da castanha após o tratamento térmico apontam para a necessidade de uma classificação por tamanho antes da decorticação. Estas novas dimensões irão determinar o sucesso no processo de decorticação.

Como o resultado da análise estatística não foi significativa ($p \leq 0,05$), para a combinação dos efeitos, tempo de umidificação e de residência no LCC, faz-se necessário uma ampliação da faixa para se chegar a um modelo que descreva o processo e que possa fornecer dados para indústria de beneficiamento minimizando custos e tempo de beneficiamento.

5.4. Conclusões

O mecanismo de cilindros rotativos proposto mostrou-se eficaz na ruptura da casca e liberação da amêndoa da castanha de caju em uma única passada.

A energia proveniente da velocidade da castanha na saída dos cilindros e aproveitada para proporcionar um impacto direcionado aumentou o desempenho do protótipo.

Considerando que a castanha passou pelo cilindro decortificador uma única vez o rendimento de amêndoas inteiras do protótipo apresentou resultados mais eficientes, quando comparados com os sistemas atuais, por apresentar menor número de impactos até a ruptura do casca.

5.5. Referências Bibliográficas

ARAUJO, F. V. M.; FERRAZ, A.C.O.; ARAÚJO, M.C., AUGUSTO, P.E.D. Comparação entre dois métodos de determinação de umidade de castanha de caju. **Simpósio Latino-Americano de Ciência de Alimentos**, 05, Campinas: Unicamp, nov. 2003, CD-Rom.

ASAE S410.1 – Dec1992. Moisture Measurement – Peanut: In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. *ASAE Standards 1994*. 41st. ed. St. Joseph; 1994. p. 477 – 478.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos – pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 3^a ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2002.

BOX, G.E.P.; WETZ, J. Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function. **University of Wisconsin Technical Report**, n. 9, 1973.

COSTA, Romeu Rony Cavalcante da. **Desenvolvimento de máquina semi-automática para descascamento de castanha de caju**. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2001.

JAIN,R.K.; KUMAR, S. Development of a cashew nut sheller. **Journal of Food Engineering**. n.32, p.339-345, 1997.

MONTEIRO, O. Máquina automática decorticadora de castanha de caju. In: ENCONTRO NACIONAL DA AGROINDUSTRIA DO CAJU,1. Fortaleza, nov. 1984 e SEMANA CEARENSE DO CAJU, . Fortaleza, nov. 1984. **Resumos...** Fortaleza, EMBRAPA/ EPACE, 1984, p.35.

SOARES, J. B. **O Caju: aspectos tecnológicos**. Fortaleza: Banco Nordeste Brasil, 1986. 256p. (Monografia, 24)

TANG, G. P.; LIANG,T.; MUNCHMEYER, F. A variable deformation macadamia nut cracker. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, n.6, p. 1506-1511, 1982.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Conclusões

1. As dimensões características, a massa e o volume da castanha de caju sofrem alterações após o tempo de umidificação e de residência no LCC e podem afetar a decorticação.
2. Os ensaios mecânicos no endocarpo e na amêndoa apontaram diferenças nos níveis de força máxima, deformação específica e energia de deformação entre os diversos tratamentos realizados, mostrando características peculiares de cada material que por fim irão influenciar nos resultados de desempenho da decorticação da castanha.
3. A aplicação adequada da deformação específica limite em mecanismos de decorticação resulta em elevado índice de ruptura da casca com liberação de amêndoas inteiras quando associado a impacto adicional direcionado.
4. O sistema de decorticação da castanha de caju proposto neste trabalho apresentou índices de desempenho operacional bastante promissores, quando comparados com os sistemas atuais, que aliado a sua simplicidade poderá ser atrativo para utilização na indústria de beneficiamento.
5. O rendimento de amêndoas inteiras no mecanismo proposto, atingiu até 70 vezes mais os índices da indústria de beneficiamento, considerando uma única passada pelos cilindros decortecedores.
6. O ensaio I, com tempo de umidificação de 79 horas e tempo de residência de 135 segundos, apontou pela tendência da superfície de resposta como a mais próxima da região desejada.

Recomendações para trabalhos futuros

1. Avaliar o desempenho do protótipo associado com outras inclinações da placa de impacto.
2. Projetar um sistema de alimentação automática que permita levar cada castanha na direção correta até ao duto de alimentação.
3. Conceber e testar mecanismo para promover limpeza periódica do cilindro ranhurado mantendo o coeficiente de atrito entre a castanha e o cilindro decortificador.
4. Sugere-se para uma melhor avaliação do processo de preparação das castanhas de caju inserir a variável temperatura do LCC no tratamento térmico e utilizar a umidade ao invés do tempo de umidificação no planeamento experimental.
5. Propõe-se expandir as faixas de variação dos fatores tomando como base a tendência de superfície de resposta.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

AGNOLONI, M.; GIULIANI, F. **Cashew cultivation**. Florence, Istituto Agronomico per l'Oltremare, 1977. 168p.

ARAÚJO, M. C. **Desenvolvimento e avaliação de uma máquina descascadora de amendoim**. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba. 1999.

BAILEY, L.H. **The standard cyclopedia of horticulture**. New York: Macmillan, 1942. 1200p.

BARROS, L. de M. **Biologia Floral, Colheita e Rendimento**. In: LIMA, V. P. M. S. **A cultura do cajueiro no Nordeste do Brasil**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil/ ETENE, 1988. p. 301-319.

BARROS, L. de M. **Caracterização morfológica e isoenzimática do cajueiro (Anacardium occidentale L.), tipos comum e anão-precoces, por meio de técnicas multivariadas**. 256p. Tese de Doutorado - ESALQ, Piracicaba. 1991.

BARROS, L. de M.; CRISÓSTOMO, J. R. **Melhoramento genético do cajueiro**. In: ARAÚJO, S. P. P. de; SILVA, V.V. da (orgs) **Cajucultura: modernas técnicas de produção**. Fortaleza: EMBRAPA-CNPAT, 1995. p.73-96.

BARROS, L.de M.; MELO, Q. M. S. **Alguns aspectos sobre a cultura do caju (Anacardium occidentale L.)**. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, v. 9, p. 29-38, 1987.

BARROS, L. de M.; PIMENTEL, C.R.M.; CORREA, M.P.F.; MESQUITA, A.L.M. **Recomendações técnicas para a cultura do cajueiro anão precoce**. Fortaleza: EMBRAPA-CNPAT, 1993. 65p.

BAUMEISTER, T.; AVALLONE, E.A.; BAUMEISTER III, T. **Standard handbook for mechanical engineers**. 8ed. New York: McGraw-hill, 1978.

CASSADIO, G.P. **Cashew nut growing, processing and marketing with particular reference to Brasil**. Report of INIDO ID/WG,. 88/4, 50p., Salvador, 1971.

CORREIA, A.R. **A industrialização da castanha de caju**. Edição da Direção dos Serviços de Economia e Estatística Geral da Província de Moçambique. 270p. 1963.

COSTA, R.R.C. da. **Desenvolvimento de máquina semi-automática para descascamento de castanha de caju**. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2001.

COWARD, L.D.G. **Experimental work and overseas trials of a cashew nut processing plant designed and built by the Tropical Products Institute**. Paper presented to UNIDO, 25-29. October, 1971.

DUVERNEVIL, G.; HAENDLER, L. Évolution des methodes de traitement des noix de cajou. **Fruits**. n.28, v.7, 561-581, 1973.

FIGUEIREDO, F.J.S.de **Análise e proposta de redesenho do posto de trabalho de corte da castanha de caju**. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 1998.

FRANÇA, M. **Caju na Guiné-Bissau: introdução e caracterização**. Guiné: TIPS, 1991.6p.

FROTA, P.C.E.; PARENTE, J.I.G. Clima e fenologia. In: ARAÚJO, J.P.P. e SILVA, V.V. **Cajucultura, Modernas Técnicas de Produção**. EMBRAPA/CNPAT, Fortaleza, 1995. p.43-54.

HEERTJE, I. Structure and function of food products: a review. **Food Structure**. v.12, p.343-364, 1993.

IBGE. Anuário estatístico do Brasil, 1996.

IBGE. Anuário estatístico do Brasil, 2003.

JAIN, R.K.; KUMAR, S. Development of a cashew nut sheller. **Journal of Food Engineering**. n.32, p.339-345, 1997.

JOHNSON, D.V. **O caju no nordeste do Brasil: um estudo geográfico**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 1974. 169p.

KALÁB, M.; ALLAN-WOJTAS, P.; MILLER, S.S. Microscopy and other imaging techniques in food structure analysis. **Trends in Food Science & Technology**. v.6, p.177-186, 1995.

LEITE, L.A. de S. **A agroindústria do caju no Brasil: Políticas públicas e transformações econômicas**. Fortaleza: EMBRAPA/CNPAT, 1994. 195p.

LIANG, T. A new processing system for maximizing macadamia nut kernel recovery. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 20, n.3, p. 438-443, 1977.

LIANG, T. Designing a constant deformation macadamia nut cracker. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 23, n.5, p. 1093-1096, 1980.

LIMA, V.P.M.S. **Fruteiras: uma opção para o reflorestamento do Nordeste**. Fortaleza: BNB/ETENE, 1986. 95p.

LOPES NETO, A. **A industrialização da castanha de caju**. Superintendência do desenvolvimento do Estado do Ceará, SUDEC, Divisão de Experimentação Agropecuária, Publ., n.6, 60p., 1972 (mimeografado)

LOPES NETO, A. **A agroindústria do caju**. Fortaleza: IPLANCE, 1997.

MEDINA, J.C.; BLEIWROTH, E.W. **Caju: da cultura ao processamento e comercialização**. Série frutos tropicais – 4. Campinas: ITAL, 1978.

MENDELSON, A., **Plasticity: theory and applications**. London: Macmillan Company, N.Y. Collier-Macmillan, Ltda, 1965.

MITCHELL, J. D.; MORI, S. A. **The cashew and its relatives** (Anacardium: Anacardiaceae). Memoirs of the New York Botanical Garden, New York, v. 42, n.1, p.1-76. 1987.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**: structure, physycal characteristics and mechanical properties. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1970.

MONTEIRO, O. Máquina automática decorticadora de castanha de caju. In: ENCONTRO NACIONAL DA AGROINDUSTRIA DO CAJU, 1. Fortaleza, nov. 1984 e SEMANA CEARENSE DO CAJU, . Fortaleza, nov. 1984. **Resumos...** Fortaleza, EMBRAPA/ EPACE, 1984, p.35.

OLOSO, A.O.; CLARKE, B. Some aspects of stength properties of Cashew nuts. **Journal of Agricultural Engineering Research**. volume n.55, 27-43p., 1993.

PAIVA, F.F.de A.; GARRUTTI, D.dos S.; SILVA NETO, R.M.da. **Aproveitamento industrial do caju**. Fortaleza: Embrapa-CNPAT/SEBRAE/CE, 2000. 430p. (Embrapa-CNPAT. Documentos, 38).

PRAGER, W., **An introduction to plasticity**. London: Addison-Wesley Publishig Company, Inc., 1959.

RODRIGUES, A. L.G. **Utilização de indentes cônicos associados ao impacto para a quebra da noz macadâmia**. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

RUSSEL, D.C. **Cashew nut processing**. FAO – Agricultural Services Bulletin. n.6, 86p., 1969.

SEGERLIND, L. J.; DAL FABBRO, I. A failure criterion for apple flesh. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, paper nº 78-3556, 1978.

SCHOONMAM, A.; MAYOR G.; DILLMANN, M-L. BISPERINK, C.; UBBINK, J. The microstructure of foamed maltodextrin/sodium caseinate powders: a comparative study by microscopy and physical techniques. **Food Research Internacional**.v.34, p.913-929, 2001.

SILVA, V.V.da. **Caju: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa – SPI; Fortaleza: Embrapa. CNPAT, 1998.

SOARES, J. B. **O caju: aspectos tecnológicos**. Fortaleza: Banco Nordeste Brasil, 1986. 256p. (Monografia, 24)

TANG, G.P.; LIANG, T.; MUNCHMEYER, F. A variable deformation macadamia nut cracker. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, n.6, p. 1506-1511, 1982.

TIMOSHENKO, S.P.; GOODIER, J.N. **Theory of Elasticity**. 3ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970. 567p.

WAIT, A.J.; JAMIESON, G.I. **The cashew: its botany and cultivation**. Queensland Agricultural Journal, Brisbane, p.253-257, 1986.

APÊNDICE 1
ROTINA PARA GERAR AS EQUAÇÕES DO SISTEMA
MATLAB 6.5

```

clear all
syms N1 N2 mc mi Dc Dr e g

% st2 = (Dr/2 + e/2) / (Dr + Dc) / 2 = (Dr + e) / (Dr + Dc) ;
st2 = (Dr + e) / (Dr + Dc) ;
ct2 = sqrt( 1 - st2^2) ;

% 2 pi - teta1 = teta2 ; 2 pi - teta2 = teta1 ;
% sin( 2 pi - teta2 ) = - sin(teta2) ; cos( 2 pi - teta2 ) = cos(teta2)
% sin( teta1 ) = - sin( 2 pi - teta1 ) = - sin( teta2 )
st1 = - st2 ;
% cos( teta1 ) = cos( 2 pi - teta1 ) = cos( teta2 )
ct1 = ct2 ;
T1 = [ ct1 st1 ; -st1 ct1 ] ; % Cilindro Esquerdo
T2 = [ ct2 st2 ; -st2 ct2 ] ; % Cilindro Direito

R1i = T1.' * [ mi * N1 ; N1 ] ; % Cilindro Esquerdo
R2i = T2.' * [ - mi * N2 ; N2 ] ; % Cilindro Direito

Wci = [ 0 ; -mc * g ] ;

% EQUILIBRIO

eq = R1i + R2i + Wci ; % Incognitas : N1 e N2

coef(1,1)= diff(eq(1),N1) ; coef(1,2)= diff(eq(1),N2) ;
coef(2,1)= diff(eq(2),N1) ; coef(2,2)= diff(eq(2),N2) ;
N1 = 0 ; N2 = 0 ;
TI = -eval(eq) ;

N = inv(coef) * TI ; N1 = N(1) ; N2 = N(2) ;

% INCLINAÇÃO DA RESULTANTE

R1i = T1.' * [ mi * N1 ; N1 ] ; % Cilindro Esquerdo
R2i = T2.' * [ - mi * N2 ; N2 ] ; % Cilindro Direito

FV1 = simple(R1i(2)) ; % Cilindro Esquerdo
FV2 = simple(R2i(2)) ; % Cilindro Direito

FH1 = simple( R1i(1)) ;
FH2 = simple( R2i(1)) ;

save rolosconv FH1 FH2 FV1 FV2 N1 N2

```

APÊNDICE 2
ROTINA PARA O CÁLCULO DO DIÂMETRO DO CILINDRO
MATLAB 6.5

```

clear all

load rolosconv

Dc = 38          ; % diametro da castanha [mm]
mc = 7/ 1000     ; % massa da castanha [Kg]
mi = .4          ; % coef.de atrito corpo / sup.dos cilindros
e = 26.29        ; % Espaçamento entre os cilindros [ mm ]

Dmin = 1         ; % Diametro minimo a ser estudado [ mm ]
Dmax = 1100      ;
g = 9.82         ;

% Teta1 : Posiciona angularmente a Base 1 com relação a Base Inercial
% Teta2 : Posiciona angularmente a Base 2 com relação a Base Inercial

i = 0 ;   DER = 0 ; % DER: Derivada da FH com relação ao diâmetro do cilindro

for Dr = Dmin:Dmax
    i = i + 1      ;   Drolo(i) = Dr ;   FH1G(i) = eval(FH1)
;

if FH1G(i) < 300   FH1G(i) = eval(FH1)    ;   else FH1G(i) = 0 ; Dra(i) = Dr ; end
if FH1G(i) < 0     FH1G(i) = 0             ;   else                               ; end
end

DD(1) = e          ;   DD(2) = mi          ;   DD(3) = Dc          ;
figure(1)          ;
plot(Drolo , FH1G , 'g-') ; xlabel('Diam. Cilindro [mm]','fontsize', 12) ;
                                ylabel(' Forca Hor. Cilindro Esq. [N]','fontsize', 12) ;
grid ; title(['Folga "e" [ mm ] = ', num2str(DD(1)), '   Coef. Atrito = ', num2str(DD(2)),...
            '   Diametro da Castanha Dc [mm] = ', num2str(DD(3)) ]) ;

                                % FH2G(i) = eval(FH2)    ;
                                % FV1G(i) = eval(FV1)    ;
                                % FV2G(i) = eval(FV2)    ;

%figure(2)          ;
%plot(Drolo , FH2G , 'g-') ; xlabel('Diam. Cilindro [mm]','fontsize', 12) ; ylabel('
FH2[N]','fontsize', 12) ;
%axis([Dmin, Dmax , -100 , 0 ])
%grid ; title(['Folga e [ mm ] = ', num2str(DD(1)), '   Coef. Atrito = ', num2str(DD(1)) ]) ;

%subplot(2,2,1)

```

```

%plot(Drolo , FV1G , 'g-') ; xlabel('Diam. Cilindro [mm]', 'fontsize', 12) ; ylabel(' '
FV1[N]', 'fontsize', 12) ;
%axis([Dmin, Dmax , .99*min(FV1G) , 1.01*max(FV1G) ])subplot(2,2,3)

%plot(Drolo , FV2G , 'g-') ; xlabel('Diam. Cilindro [mm]', 'fontsize', 12) ; ylabel(' '
FV2[N]', 'fontsize', 12) ;
%axis([Dmin, Dmax , 0.99*min(FV2G) , 1.01*max(FV2G) ])
%grid

```

APÊNDICE 3

MATERIAL UTILIZADO NA CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Material utilizado na construção do protótipo.

Item	Quant.	Descrição
01	04	Mancal P204 para eixo Ø20mm com rolamento UC204
02	04	Rolamento de esfera 6000-2RS
03	10	Anel trava para eixo de Ø23mm
04	10	Anel trava para eixo de Ø25mm
05	02	Motor elétrico monofásico 220V - 0,5CV – 1700rpm
06	02	Inversor de frequência monofásico 220V – 0,5CV – 370W – mod. 2,6/1ac.220-230 – cod. CFW-07 (Weg)
07	01	Correia V perfil “B” cod. 030 (Rexon)
08	01	Correia V perfil “B” cod. 033 (Rexon)
09	02	Polia V perfil “B” Ø120mm
10	02	Polia V perfil “B” Ø80mm
11	02	Disco em aço 1020 Ø1/2” X 38mm
12	01	Tarugo aço 1020 Ø 1 ¼” X 2,0m
13	01	Varão roscado (12fpp) Ø1/2” X 1,0m
14	01	Perfil L 44xX44x3mm x 6m
15	01	Chapa #1,5mm x 1,0m x 3m
16	01	Chapa #3mm x 400 x 400
17	-	Parafusos, travas, arruelas, porcas

