



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE
PRODUTOS AGRÍCOLAS



DISSERTAÇÃO

ADEQUAÇÃO DE TECNOLOGIA DE HIGIENIZAÇÃO, QUEBRA E SEPARAÇÃO
PARA BENEFICIAMENTO DE COCO CATOLÉ

ALUNA: THAÍS PEREIRA DE AZEVEDO

CAMPINA GRANDE - PB

Dezembro de 2013

**ADEQUAÇÃO DE TECNOLOGIA DE HIGIENIZAÇÃO, QUEBRA E SEPARAÇÃO
PARA BENEFICIAMENTO DE COCO CATOLÉ**

THAÍS PEREIRA DE AZEVEDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento e Armazenamento de Produtos
Agrícolas**

Orientadores:

Prof^a. Dra. Maria Elita Martins Duarte

Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro/2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- A994a Azevedo, Thaís Pereira de.
Adequação de tecnologia de higienização, quebra e separação para beneficiamento de coco catolé / Thaís Pereira de Azevedo. – Campina Grande, 2013.
111 f. : il.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
- "Orientação: Prof^a. Dr^a. Maria Elita Martins Duarte, Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata".
Referências.
1. Coco Catolé. 2. Linha de Beneficiamento. 3. Propriedades Físicas. 4. Velocidade Terminal. 5. Coeficiente de Arrasto. I. Duarte, Maria Elita Martins. II. Mata, Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti. III. Título.

CDU 631.563.2(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

THAÍS PEREIRA DE AZEVEDO

ADEQUAÇÃO DE TECNOLOGIA DE HIGIENIZAÇÃO, QUEBRA E
SEPARAÇÃO PARA BENEFICIAMENTO DE COCO-CATOLÉ

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Maria Elita Martins Duarte
Dr.^a Maria Elita Martins Duarte
Orientadora (UAEA/CTRN/UFCG)

APROVADA

Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata
Dr. Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata
Orientador (UAEA/CTRN/UFCG)

APROVADA

Severina de Sousa
Dr.^a Severina de Sousa
Examinadora (UFCG/CNPq)

APROVADA

Deyzi Santos Gouveia
Dr.^a Deyzi Santos Gouveia
Examinadora (UAEA/CTRN/UFCG)

APROVADA

DEZEMBRO DE 2013

Àqueles que sempre estiveram ao meu lado, apoiando minhas escolhas e contribuindo para minha felicidade.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por me apoiar nos momentos difíceis, mostrar o caminho nas horas incertas e me proteger de todo o mal.

A meus pais (Sergio e Marília), que me deram não somente a vida mas sobretudo todas as oportunidades para uma boa formação, além de todo amor e exemplo de caráter.

A meus irmãos, Tomás e Lucas, pelo amor incondicional, carinho e apoio.

A Felipe, pela ajuda com a dissertação, apoio e “puxões de orelha”.

Aos amigos Danielle, Ana Tereza, Flávio e Antônio, que perderam alguns finais de semana me ajudando com o experimento e me dando apoio durante toda essa jornada. Sem vocês eu não teria conseguido quebrar tantos coquinhos. Agradeço imensamente!

Às meninas do Ceará, Danielle e Elizabete, pela casa sempre acolhedora e apoio em diversos momentos difíceis.

Aos Colegas de mestrado, pelas disciplinas que cursamos juntos e momentos compartilhados em Campina Grande.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, por me propiciarem a realização deste sonho e ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro.

Aos meus orientadores, Prof^a. Elita e Prof. Mário, pelos conhecimentos transmitidos, em especial à Prof^a Elita pela oportunidade oferecida, orientação, dedicação, compreensão, paciência, oportunidade de crescimento e, principalmente, por se mostrar sempre disponível.

A todos os professores que contribuíram para meu desenvolvimento profissional.

A todos que colaboraram, de forma direta ou indireta, na realização deste trabalho, o meu MUITO OBRIGADA.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
I.2 Objetivo geral.....	4
I.2.1 Objetivos específicos	4
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 <i>Syagrus oleracea</i> (Mart.).....	5
2.2 Caracterização física.....	7
2.2.1 Tamanho, forma, circularidade e esfericidade.....	7
2.2.2 Massa específica.....	10
2.2.3 Volume.....	11
2.2.4 Área Projetada.....	11
2.3 Quebra e beneficiamento de frutos duros	12
2.4 Estudo dos esforços para quebra do coco catolé	14
2.5 Características aerodinâmicas: coeficiente de arrasto e velocidade terminal	18
2.5.1 Força de arrasto	19
2.5.2 Coeficiente de arrasto	21
2.5.3 Velocidade terminal	22
2.5.3.1 Velocidade terminal para corpos esféricos.....	24
2.5.3.2 Velocidade terminal para corpos não esféricos	25
2.5.4 Fluidos Newtonianos e partículas não esféricas	28
2.5.5 Exemplos de aplicação a produtos agrícolas	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Obtenção do material de estudo	31
3.2 Caracterização física do fruto.....	31
3.2.1 Massa específica real	36
3.2.2 Tamanho.....	37
3.2.3 Massa individual	38
3.2.4 Volume.....	38

3.2.5	Circularidade.....	39
3.2.6	Esfericidade.....	40
3.3	Equipamento para remoção da casca, mucilagem, polpa e fibra.....	41
3.4	Metodologia para remoção da casca, mucilagem, polpa e fibra.....	41
3.5	Estudo dos esforços de compressão	42
3.6	Determinação da velocidade terminal	43
3.6.1	Análise experimental.....	44
3.6.2	Construção do equipamento	44
3.6.3	Procedimento.....	45
3.6.4	Análise teórica da velocidade terminal.....	45
3.7	Simulação da separação e seleção por velocidade terminal	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Caracterização física do fruto.....	51
4.1.1	Tamanho.....	51
	Coco Catolé in natura.....	51
	Coco Catolé despulpado antes da quebra.....	51
	Coco Catolé após a quebra	52
4.1.2	Massa, Volume e Massa Específica.....	57
	Coco Catolé in natura.....	57
	Coco Catolé antes da quebra	57
	Coco Catolé após a quebra	57
4.1.3	Forma: circularidade e esfericidade.....	61
4.2	Projeto do equipamento de limpeza e despêliculagem.....	65
4.3	Remoção da casca, mucilagem, polpa e fibras	71
4.4	Estudo dos esforços de compressão	74
4.5	Desenvolvimento de equipamento para extração das amêndoas.....	77
4.6	Dados da velocidade terminal das partículas obtidas com a quebra e classificadas por categorias	78
	Velocidade terminal obtida pelo Método 1	78

Velocidade terminal obtida pelo Método 2	79
Velocidade terminal obtida pelo Método 3	81
Velocidade terminal obtida pelo Método 4	83
Velocidade terminal experimental.....	85
Comparativo entre as velocidades terminal teóricas e experimental para amêndoas e cascas	88
Comparativo entre os coeficientes de arrasto em função de Reynolds, corrigido pela esfericidade da partícula e calculado em função da velocidade terminal experimental para amêndoas e cascas	91
4.7 Simulação da separação e seleção por velocidade terminal	93
5 CONCLUSÕES	97
6 REFERÊNCIAS	100
Apêndice A	104
Apêndice B	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: <i>Syagrus oleracea</i> (Mart.).....	5
Figura 2: Eixos perpendiculares para verificação do tamanho	8
Figura 3: Determinação aproximada da esfericidade e da circularidade	9
Figura 4: Raios de curvatura do produto e da maior esfera inscrita para cálculo da circularidade.....	9
Figura 5: Elipsóide triaxial.....	12
Figura 6: Curvas típicas do comportamento força-deformação para alimentos (BOURNE, 2002).....	17
Figura 7: Coeficiente de arrasto para uma elipse com área frontal igual a bD ou área de seção transversal no plano perpendicular à figura igual a bl	21
Figura 8: Fragmentos de casca obtidos após a quebra manual do coco catolé	33
Figura 9: Fragmentos de casca correspondentes à metade do coco catolé com quebra longitudinal...	33
Figura 10: Amêndoas danificadas.....	34
Figura 11: Amêndoas inteiras	34
Figura 12: Faixas de comprimento das amêndoas inteiras.....	36
Figura 13: Faixas de comprimento dentro da classe 3/4 Casca com quebra longitudinal.....	36
Figura 14: Projeção das partículas fraturadas após a quebra do coco para obtenção das maiores dimensões	38
Figura 15: Pesos necessários para análise do volume por deslocamento de fluido	39
Figura 16: Volume por deslocamento de fluido.....	39
Figura 17: Máquina de limpeza e despeliculagem.....	41
Figura 18: Máquina Universal de Ensaio - Shimadzu	42
Figura 19: Ensaio de compressão.....	43
Figura 20: Desenho esquemático do equipamento utilizado para a determinação experimental da velocidade terminal das amêndoas do coco catolé	45
Figura 21: Número de Reynolds, N_R , versus CN_R^2 para esferas	47
Figura 22: Número de Reynolds, N_R , versus CN_R^2 para discos	47
Figura 23: Coeficiente de Arraste x Número de Reynolds	49
Figura 24: Frequência das classes de amêndoas	54

Figura 25: Coco Catolé in natura	62
Figura 26: Coco Catolé sem polpa e fibras	62
Figura 27: Esquema do equipamento de limpeza e despeliculagem de coco catolé. Vista interna.....	66
Figura 28: Vista lateral com tampa e aletas para guia de fluxo	67
Figura 29: Vista lateral do equipamento de limpeza e despeliculagem de coco catolé	67
Figura 30: Equipamento de limpeza e despeliculagem	68
Figura 31: Vista lateral do equipamento	68
Figura 32: Gabinete de exaustão	69
Figura 33: Ralos e aletas	69
Figura 34: Disco abrasivo	69
Figura 35: Coco catolé retirado da planta-mãe, antes da higienização no equipamento.....	70
Figura 36: Coco catolé coletado no chão, antes da higienização no equipamento	70
Figura 37: Coco catolé após higienização no equipamento desenvolvido	70
Figura 38: Coco catolé após 15 minutos de lavagem.....	72
Figura 39: Coco catolé após 20 minutos de lavagem.....	72
Figura 40: Coco catolé após 25 minutos de lavagem.....	73
Figura 41: Ensaio de compressão de coco catolé.....	76
Figura 42: Gráfico Força x Deslocamento para força aplicada no sentido transversal	77
Figura 43: Gráfico tempo x deslocamento para as diversas classes (segundo a parte correspondente do todo) de cascas e amêndoas segundo o sentido de quebra	88
Figura B.1: Vista frontal do equipamento de limpeza e despeliculagem.....	107
Figura B.2: Vista do corte A, com os constituintes internos do equipamento de limpeza e despeliculagem	108
Figura B.3: Vista lateral externa do equipamento de limpeza e despeliculagem.....	109
Figura B.4: Vista lateral interna do equipamento de limpeza e despeliculagem	110
Figura B.5: Vista lateral e superior da tampa do equipamento de limpeza e despeliculagem	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das cascas e amêndoas	35
Tabela 2: Valores médios e desvios padrão das medidas dos 3 diâmetros mutuamente perpendiculares do coco catolé <i>in natura</i>	51
Tabela 3: Diâmetro maior e menor do coco catolé antes da quebra.....	51
Tabela 4: Classes de comprimento e diâmetro de amêndoas, sementes inteiras e sementes danificadas	52
Tabela 5: Classes de comprimento e diâmetro de fragmentos de cascas	53
Tabela 6: Tamanhos médios dos diâmetros a, b e c obtidos com paquímetro digital	56
Tabela 7: Valores médios de massa, volume e massa específica do coco catolé <i>in natura</i>	57
Tabela 8: Massa, Volume e Massa Específica do coco catolé antes da quebra	57
Tabela 9: Valores médios de massa (M) em gramas, volume (V) em cm ³ e massa específica (ρ) em g/cm ³ para as classes e faixas de comprimento de amêndoas	58
Tabela 10: Valores médios de massa (M) em gramas, volume (V) em cm ³ e massa específica (ρ) em g/cm ³ para as classes e faixas de comprimento de fragmentos de cascas.....	60
Tabela 11: Área Projetada - Ap (mm ²), Circularidade – Cr (%) e Esfericidade - ϕ (%) do coco catolé <i>in natura</i>	61
Tabela 12: Área Projetada - Ap (mm ²), Circularidade – Cr (%) e Esfericidade - ϕ (%) do coco catolé processado em máquina de limpeza e despeliculagem, sem polpa e fibras	61
Tabela 13: Área Projetada - Ap (mm ²), Circularidade – Cr (%) e Esfericidade - ϕ (%) das amêndoas de coco catolé processado em máquina de limpeza e despeliculagem, sem polpa e fibras, após quebra manual	63
Tabela 14: Área Projetada - Ap (mm ²), Circularidade – Cr (%) e Esfericidade - ϕ (%) das faixas de tamanho dos fragmentos de cascas de coco catolé processado em máquina de limpeza e despeliculagem, sem polpa e fibras, após quebra manual	64
Tabela 15: Análise de variância dos tempos de lavagem de coco catolé em máquina de limpeza e despeliculagem	71

Tabela 16: Média geral, coeficiente de variação e médias dos tratamentos, tempos de lavagem do coco catolé, submetidos ao teste de Tukey.....	72
Tabela 17: Massa das amostras antes e após a lavagem na máquina de limpeza e despeliculagem	73
Tabela 18: Estudo dos esforços de compressão para o coco catolé no sentido longitudinal (sentido do seu maior diâmetro).....	74
Tabela 19: Estudo dos esforços de compressão para o coco catolé no sentido transversal (sentido do seu menor diâmetro).....	75
Tabela 20: Análise de variância do sentido de quebra, se longitudinal ou transversal ao maior eixo do produto, de coco catolé em máquina de ensaio	75
Tabela 21: Média geral, coeficiente de variação e médias dos tratamentos, sentido de quebra do coco catolé, submetidos ao teste de Tukey	76
Tabela 22: Número de Reynolds, Coeficiente de Arrasto e Velocidade Terminal Teórica obtida pelo Método 1 para amêndoas.....	78
Tabela 23: Número de Reynolds, Coeficiente de Arrasto e Velocidade Terminal Teórica obtida pelo Método 1 para cascas	79
Tabela 24: Velocidade Terminal teórica obtida pelo Método 2 para amêndoas inteiras e danificadas	80
Tabela 25: Velocidade Terminal teórica obtida pelo Método 2 para cascas	81
Tabela 26: Velocidade Terminal teórica obtida pelo Método 3 para amêndoas inteiras e danificadas	82
Tabela 27: Velocidade Terminal teórica obtida pelo Método 3 para cascas	82
Tabela 28: Dados de Coeficiente de Arrasto (C_D), Esfericidade (ϕ (%)), Coeficiente de Arrasto Corrigido pela esfericidade da partícula e Velocidade Terminal teórica pelo Método 4	83
Tabela 29: Dados de Coeficiente de Arrasto (C_D), Esfericidade (ϕ (%)), Coeficiente de Arrasto Corrigido pela esfericidade da partícula e Velocidade Terminal teórica pelo Método 4	84
Tabela 30: Dados de velocidade terminal experimental e temperatura ambiente durante a coleta dos dados para amêndoas.....	85
Tabela 31: Dados de velocidade terminal experimental e temperatura ambiente durante a coleta dos dados para cascas	86

Tabela 32: Dados de velocidades terminal experimental (V_{exp}) e teóricas (V_t) das amêndoas inteiras e danificadas.....	88
Tabela 33: Dados de velocidades terminal experimental (V_{exp}) e teóricas (V_t) das cascas.....	89
Tabela 34: Análise de variância das velocidades experimental e teóricas de amêndoas de coco catolé.....	90
Tabela 35: Coeficientes de arrasto calculados em função do número de Reynolds (C_D), corrigido em função da esfericidade ($C_{Dcorrigido}$) e calculado ($C_{Dcalculado}$) a partir da velocidade terminal experimental para amêndoas.....	92
Tabela 36: Coeficientes de arrasto calculados em função do número de Reynolds (C_D), corrigido em função da esfericidade ($C_{Dcorrigido}$) e calculado ($C_{Dcalculado}$) a partir da velocidade terminal experimental para cascas.....	92
Tabela 37: Percentuais de partículas separadas (arrastadas pelo fluxo de ar), em relação a cinco velocidades de fluxo de ar – fragmentos de cascas.....	94
Tabela 38: Percentuais de partículas separadas (arrastadas pelo fluxo de ar), em relação a cinco velocidades de fluxo de ar – amêndoas.....	95
Tabela A.1: Correlação simples entre as variáveis massa (g) e tamanho (cm).....	105
Tabela A.2: Correlação simples entre as variáveis volume (cm^3) e tamanho (cm).....	105
Tabela A.3: Correlação simples entre as variáveis massa específica (g/cm^3) e tamanho (cm).....	105
Tabela A.4: Correlação simples entre as variáveis velocidade experimental (m/s^2) e volume (cm^3) para amêndoas inteiras.....	105

RESUMO

O coco-catolé (*Syagrus oleracea* (Mart.)) é um produto bastante apreciado na região semiárida do nordeste brasileiro devido principalmente às suas características organolépticas, porém é pouco utilizado industrialmente. As pesquisas com este produto ainda são escassas, o que despertou o interesse para a realização deste trabalho com o intuito de caracterizar o coco-catolé e permitir a criação de uma linha de beneficiamento para o produto. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi adequar uma tecnologia para beneficiamento de coco-catolé por meio do desenvolvimento de equipamentos que promovessem a despeliculagem, limpeza, quebra e separação das amêndoas. Para isso foram avaliadas as propriedades físicas do coco catolé in natura, após a remoção de sua polpa e fibras, e dos fragmentos e amêndoas resultantes da quebra, bem como suas propriedades aerodinâmicas, como velocidade terminal e coeficiente de arrasto. Foi realizado, ainda, estudo de esforços de compressão a fim de mensurar o esforço necessário a ser imposto por um equipamento de quebra por compressão. Ao final deste trabalho foram definidas todas as propriedades físicas necessárias à caracterização do produto estudado, e desenvolvido um equipamento de limpeza e despeliculagem eficiente na remoção de polpa e fibras, com tempos de processamento entre 15 e 25 min, além de determinadas as propriedades aerodinâmicas necessárias ao desenvolvimento de um equipamento que promova a separação de amêndoas sem danos mecânicos de fragmento de casca ou impurezas. Esta separação é possível utilizando-se o princípio de velocidade terminal, visto que esta pesquisa demonstrou que a velocidade terminal obtida para amêndoas inteiras foi 13,2% maior que a maior velocidade terminal encontrada entre os fragmentos de cascas.

Palavras-chave: coco catolé, linha de beneficiamento, propriedades físicas, velocidade terminal, coeficiente de arrasto.

ABSTRACT

The catolé coconut is a foodstuff appreciated at Brazilian's northeastern semiarid especially because their organoleptic properties, however with little used industrially. There are few research about this fruit, which aroused interest in conduct this experiment, wherein the objective is obtain catolé coconut characteristics and to allow industrial processing line. Therefore, this experiment goal was to suit a industrial processing line for catolé coconut with machine development that could pelling, clean, brake and separate almonds. For this, physic properties from the fruit in natura, after remove pulp and fiber, were obtained, the fragments and almonds resulted from brake, even as aerodynamic properties, terminal velocity and drag coefficient. Compression stress evaluations were made to measure the necessary effort by compression machine. At the end of this experiment, all physics properties necessary for the foodstuff were obtained and, a efficient machine was developed to clean and peel and removal of pulp fibers, With a process time of 15 and 25 min respectively, as well as the determination of aerodynamics properties necessary for a machine development who can do the almonds separation without mechanical damage by shell fragment or impurities. This separation is possible using the terminal velocity, whereas this experiment stage showed that the terminal velocity obtained by the almonds was 13.2% more than the terminal velocity obtained by the shell fragment.

Keywords: catolé coconut, industrial processing line, physic properties, terminal velocity, drag coefficient.

1 INTRODUÇÃO

As palmeiras, espécies da família *Arecaceae*, possuem elevada importância econômica e são exploradas comercialmente para a produção de óleo, amido, palmito, cera e fibras. Além disto, são utilizadas, como fonte de alimentos, bebidas e, como matéria-prima para construção de barcos, pontes e casas.

Essas plantas são de ocorrência predominantemente tropical (HENDERSON et al., 1995), e apresentam a capacidade de se estabelecer em diversos tipos de habitat, como mata de terra firme, matas periodicamente inundadas, cerrado e em ambientes degradados, encontrando-se extensamente distribuídas no Brasil, frutificando de outubro a fevereiro (LORENZI et al., 2004).

A palmeira *Syagrus oleracea* (Mart.) Becc., popularmente conhecida como gueroaba na região centro-oeste, é chamada coco catolé no interior dos estados da Paraíba e Pernambuco. Além dos frutos serem apreciados pela população local, devido à sua amêndoa de sabor agradável e rica em óleo, esta palmeira também possui grande uso ornamental sendo utilizada em praças e jardins, sobretudo, da região centro-oeste.

Os frutos são ovalados e sua coloração externa é verde amarelada. Possuem polpa fibrosa amarelada quando madura, contendo amêndoa sólida, dura, branca e oleaginosa, são comestíveis e de sabor agradável e servem de alimento também aos animais domésticos. Esses frutos são encontrados em cachos, variando de 60 a 120 frutos por cacho (LORENZI et al., 2004).

As flores são procuradas pelas abelhas e os frutos maduros servem de alimento para muitas espécies de aves e animais silvestres; além disto, as folhas são consumidas pelo gado, enquanto as amêndoas são utilizadas para a produção de doces caseiros e para a extração de um óleo de excelente qualidade para uso na culinária, podendo ser encontrado também em supermercados e farmácias cosméticos produzidos com este produto.

Segundo Fernandes et al. (2002), dessa planta se pode aproveitar também o palmito, de sabor amargo, e que é utilizado *in natura*, tal como em pratos típicos de algumas regiões, principalmente em Goiás. O cultivo dessa palmeira é simples em virtude de sua pouca exigência quanto à fertilidade do solo (HENDERSON et al., 1995; LORENZI et al., 2004).

Um grande problema verificado é a falta de cuidado durante a colheita dos frutos que se trata, na maioria das vezes, de uma coleta, pois as vezes o cacho do coco catolé não apresenta amadurecimento uniforme; os frutos, então, amadurecem e caem, permanecendo

no local algum tempo. Esses frutos são cobertos por uma mucilagem altamente viscosa e, quando maduros, facilita a aderência de sujidades, que permanecem fortemente grudadas ao fruto e apresentam grande resistência à remoção, quando secas.

Na colheita os frutos remanescentes nos cachos são retirados da planta-mãe e são armazenados juntamente com aqueles coletados. As condições de higiene são precárias, e, como comentado, os frutos caídos apresentam uma crosta de sujidades adquiridas durante o período em que permaneceu no solo, inclusive com grande quantidade de fezes de animais. Esses produtos não passam por nenhum tratamento de higienização antes da quebra para retirada da amêndoa, o que causa contaminação das amêndoas e, conseqüentemente, do óleo que será produzido.

Neste sentido, o conhecimento das propriedades físicas dos grãos é fundamental para o projeto, construção e operação dos equipamentos de lavagem, limpeza, secagem e armazenagem dos produtos agrícolas (SILVA & LUCENA, 1995; AFONSO JÚNIOR et al., 2000). Dentre as propriedades físicas mais relevantes ao projeto de máquinas de limpeza se destacam: forma e tamanho dos grãos, velocidade terminal e massa específica aparente (SRIVASTAVA et al., 1993).

Muitos dos equipamentos utilizados para o beneficiamento utilizam o ar para separar ou transportar o produto desejável das impurezas ou, ainda, daqueles que estejam danificados. Por isso, o conhecimento das propriedades aerodinâmicas dos produtos agrícolas é essencial para auxiliar no projeto e dimensionamento dos equipamentos utilizados nas operações de colheita e pós-colheita (SILVA et al., 2003). De acordo com Vaughan et al. (1980), o fator determinante para a separação de impurezas é, em geral, o peso, desde que as sementes da mistura possuam o mesmo formato e volume.

Mohsenin (1986) descreve a velocidade terminal como um fenômeno simples, em que um objeto em queda livre é imerso em uma corrente de ar ascendente. Caso o objeto possua densidade inferior à do material ele estará sujeito à ação de três forças: a força gravitacional, à força devida ao empuxo do fluido e à força de resistência ao arraste do material. No momento em que essas grandezas vetoriais se equilibram o objeto passa a se deslocar com velocidade constante, denominada velocidade terminal.

Os produtos estudados possuem, normalmente, possuem propriedades físicas e aerodinâmicas razoavelmente constantes, podendo ser transportados em tubulações de pequeno diâmetro com o auxílio de uma corrente de ar.

No que diz respeito aos produtos agrícolas, ainda não é possível a produção de sementes e grãos com precisão de forma e tamanho; no entanto, é possível otimizar a

Engenharia para empregá-la no melhoramento de processos agrícolas. Essa melhoria se dá através das informações das propriedades físicas e aerodinâmicas que surgem da evolução das ciências agrárias, possibilitando a formulação e a evolução de novos projetos de máquinas e equipamentos evitando, desta maneira, desperdício do produto trabalhado (ZANINI, et al., 2008).

Os fatores que afetam a velocidade terminal de uma partícula são a massa e o coeficiente de arraste, sendo este uma função da sua forma. No final da década de 1940 surgiram os primeiros estudos sobre transporte pneumático de grãos em dutos. Vogt e White, citados por Duarte (1997) apontaram a necessidade de conhecer o efeito das propriedades aerodinâmicas dos produtos a serem transportados.

O comportamento de determinados tipos de grãos em sistemas de transporte, tal como o dimensionamento adequado e sua otimização, ainda são respostas a serem dadas pelos pesquisadores sendo imprescindível conhecer em profundidade o comportamento dinâmico desses produtos em sistemas de transporte aerodinâmicos.

Para que ocorram melhorias no que diz respeito ao beneficiamento do coco catolé, é preciso realizar a remoção da mucilagem, despeliculagem e higienização do fruto antes do processamento com posterior separação das amêndoas de cascas e/ou de amêndoas danificadas promovendo melhor qualidade ao produto tanto para consumo in natura quanto para produção de óleo, porém, os estudos com o coco catolé, que se constitui em fonte de renda para muitos produtores rurais, ainda são escassos. Esta ausência de informações gera problemas no beneficiamento deste produto resultando em amêndoas com baixa qualidade, no que diz respeito à higienização e cor, além de baixa produtividade.

O coco catolé é um produto bastante apreciado na região semiárida do nordeste brasileiro devido, sobretudo, às suas características organolépticas, mas é pouco utilizado industrialmente; outro impasse é a ausência de incentivo ao seu plantio industrial em consequência das dificuldades de processamento e da inexistência de técnicas e equipamentos de extração da amêndoa e do seu óleo. Nas feiras livres de cidades do interior, pode-se observar a comercialização de amêndoas para consumo “in natura”, normalmente vendidas nos chamados rosários, porém não existe relato da comercialização do óleo obtido da amêndoa. Apesar de muito gorduroso o óleo da amêndoa de coco catolé é considerado bastante saudável já que suas gorduras são compostas de ácidos graxos, predominantemente monoinsaturados, como o ácido oleico, que contribui na redução do teor de colesterol.

Como mencionado, as pesquisas para este produto ainda são deficientes ou até mesmo ausentes, o que despertou o interesse para a realização deste trabalho com o intuito de caracterizar o coco catolé e permitir a criação de uma linha de beneficiamento para este produto.

I.2 Objetivo geral

Adequar uma tecnologia para beneficiamento de coco catolé por meio do desenvolvimento de equipamentos que promovam a despeliculagem, limpeza, quebra e separação das amêndoas.

I.2.1 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física do coco catolé quanto ao seu tamanho e forma, massa, massa específica, tamanho dos diâmetros mutuamente perpendiculares, volume, esfericidade e circularidade;

- Desenvolver um equipamento para despeliculagem do coco catolé e testar os parâmetros de retirada da mucilagem e fibra, de acordo com o equipamento desenvolvido;

- Realizar um estudo dos esforços requeridos para quebra do coco catolé por meio de máquina universal de ensaio;

- Desenvolver, com base nos esforços, um protótipo de teste para realizar a quebra do fruto;

- Realizar a separação e caracterização física (massa, massa específica, tamanho dos diâmetros mutuamente perpendiculares, volume, esfericidade e circularidade) das amêndoas e fragmentos de casca resultantes da quebra do coco catolé;

- Determinar os parâmetros para separação aerodinâmica (velocidade terminal e coeficiente de arraste) do produto resultante da quebra (casca e amêndoas).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 *Syagrus oleracea* (Mart.)

A palmeira *Syagrus oleracea* (Mart.), popularmente conhecida como gueroba, ocorre nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, Bahia e no Distrito Federal (LORENZI et al., 2004). O gênero *Syagrus* é um dos três mais frequentes em número de espécies de palmeiras no Brasil e o de maior representatividade na região do Cerrado (HENDERSON et al., 1995).

Possui caule solitário, colunar, superficialmente anelado, acinzentado, de 5 a 20 m de altura e 15 a 30 cm de diâmetro, com 15 a 20 folhas dispostas espiraladamente na copa; apresenta inflorescências interfoliaras, com pedúnculo de 18 a 48 cm de comprimento; bráctea peduncular lenhosa, profundamente frisada, de comprimento total de 84 a 128 cm e largura de 12 a 22 cm; raque (parte ramificada) de 40 a 70 cm de comprimento, com 27 a 70 ráquulas de 15 a 55 cm de comprimento (LORENZI et al., 2004) (Figura1).



Figura 1: *Syagrus oleracea* (Mart.)

Esta palmeira fornece diversos produtos úteis; seu caule solitário, colunar, superficialmente anelado, possui cor cinza com 5 a 20 m de altura e 15 a 30 cm de diâmetro. É moderadamente pesado, macio, de boa durabilidade e muito utilizado como madeira na construção civil, como mourões, estacas, ripas e calhas para água (DINIZ & SÁ, 1995). As folhas são utilizadas na alimentação animal e na cobertura de casas. Os

frutos são elipsoides, verde-amarelados e lisos, de 4,0 a 5,5 cm de comprimento, contendo mesocarpo espesso, carnoso, adocicado e fibroso.

O fruto é uma drupa que contém uma amêndoa sólida, córnea, branca e oleaginosa na qual se localiza o embrião; cada fruto contém apenas uma semente. Segundo Melo (2000), o fruto é constituído por: epicarpo (casca verde amarelada); mesocarpo (carnoso, amarelado, fibroso); endocarpo (espesso, lignificado, celulósico, muito duro, de formato ovoide, impermeável, de cor marrom, com três poros tendo somente um funcional, com diâmetro variando entre 0,5 a 2,0 mm, que é utilizado para trocas gasosas, entrada de água e saída do embrião).

A semente (coquinho ou amêndoa) está inserida dentro do fruto que apresenta um tegumento amarronzado que envolve o endosperma sólido, branco, oleoso, carnoso, com cavidade interna, onde o embrião está inserido, como mencionado. O embrião é de coloração branca, cilíndrico, com comprimento e diâmetro médios de 2,5 e 1,2 mm, respectivamente, e uma extremidade direcionada para o poro funcional de germinação (MELO, 2000).

A propagação dessa cultura é feita unicamente por via sexuada, através de sementes; entretanto, essas sementes apresentam dormência e grande variabilidade quanto à porcentagem de germinação. Dependendo da semente, das condições climáticas e da fertilidade do solo, o período de germinação fica entre 30 e 90 dias após o plantio (ABREU, 1997).

Esta germinação, porém, depende sobretudo da época de colheita dos frutos, que devem ser colhidos após a maturação fisiológica, período após o qual a semente vai perdendo umidade, o que reduz o respectivo poder germinativo (ABREU, 1997).

Ocorre da Bahia até o Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás, Mato Grosso, Tocantins e Minas Gerais, na floresta semidecídua e nos cerradões (LORENZI et al., 2004). São encontradas, ainda, em comunidades rurais dos estados da Paraíba e Pernambuco. Podem ser utilizados na fabricação de doces, licores e sorvetes ou consumidos 'in natura' e tanto o mesocarpo como a amêndoa (semente) são comestíveis sendo que esta última é bastante apreciada pela população tanto goiana quanto do interior do Nordeste. A semente pode ser usada, ainda, para extração de óleo comestível ou como alternativa para produção de biodiesel. As flores são melíferas, sendo de grande importância para a apicultura (DINIZ & SÁ, 1995).

A dificuldade para formação de uma área de coco catolé de médio ou de grande porte é a colheita de cocos-semente, que se tornou mais difícil devido à redução das áreas

nativas. Segundo Lorenzi et al. (2004), um quilograma de fruto contém cerca de 70 caroços ou frutos despolidos. Após a colheita os cocos maduros devem ser espalhados ao sol para que ocorra secagem da polpa evitando, então, o apodrecimento da polpa e diminuindo seu aroma, que é um atrativo para a mosca-das-frutas; enfim, cada matriz produz cerca de 500 cocos/ano.

O coco catolé recém-colhido do cacho apresenta índice de germinação baixo quando comparado com os frutos que caem naturalmente, sendo esta germinação de até 70% e o período variando de 90 a 120 dias, sendo o pico aos 90 dias (LORENZI et al., 2004); entretanto, para remoção da amêndoa visando fins alimentícios deve-se realizar a coleta dos frutos imediatamente após sua queda ou quando o fruto ainda se encontra ligado à planta-mãe mas em maturidade fisiológica, para evitar que os mesmos sejam contaminados.

2.2 Caracterização física

2.2.1 Tamanho, forma, circularidade e esfericidade

O estudo das propriedades físicas dos produtos agrícolas é de suma importância no que diz respeito à construção e operação de equipamentos de secagem e armazenagem e para a adaptação de equipamentos já existentes, visando obter maior rendimento nas operações de processamento (SILVA, 2008).

Por outro lado, o conhecimento das propriedades físicas é fundamental quando se trata de problemas relacionados aos fenômenos de transferência de calor e de massa, durante a secagem e o armazenamento de produtos agrícolas (FRANCESCHINI et al., 1996).

No desenvolvimento de projetos de máquinas e equipamentos para materiais biológicos é necessário o conhecimento de suas características físicas porém é oportuno considerar que um material biológico não tem a uniformidade dos produtos confeccionados e moldados pela indústria química, mecânica e/ou elétrica (CAVALCANTI-MATA & DUARTE, 2002).

O tamanho e a forma são características físicas específicas de cada produto, determinadas geneticamente, e que podem ser influenciadas pelo ambiente, tanto durante, quanto após sua formação, e são fatores que influenciam nas demais propriedades físicas dos produtos biológicos. A determinação dessas propriedades é conveniente, por exemplo,

para o dimensionamento de peneiras em equipamentos destinados à separação e classificação de sementes e frutos (SILVA & CORRÊA, 2012).

Essas características também são relevantes em problemas de distribuição de estresse no material em operações de carregamento, separação eletrostática de grãos e sementes, em avaliações de cor e reflectância luminosa e no desenvolvimento de equipamentos de classificação e separação por tamanho (MOHESENIN, 1986).

Segundo Sokhansanj & Lang (1996), a desidratação de um produto agrícola é considerada a primeira causa das modificações na forma, tamanho, massa específica real e aparente e velocidade terminal.

De modo geral, grãos e frutos não apresentam uma forma geométrica definida sendo necessário, para a resolução de problemas relacionados à sua geometria admitir, para o produto estudado, um formato geométrico conhecido, o que acarreta em aproximações e prováveis erros (DIAS, 2007). Para a maioria dos produtos agrícolas assumem-se as formas de um elipsoide ou esferoide composto por três dimensões, o eixo maior, menor e médio.

O tamanho é determinado pelas medições dos eixos perpendiculares do produto e, quanto mais irregular, maior o número de medições necessárias (Figura 2). Já a forma é determinada pela comparação com um formato-padrão predeterminado (SILVA & CORRÊA, 2012).

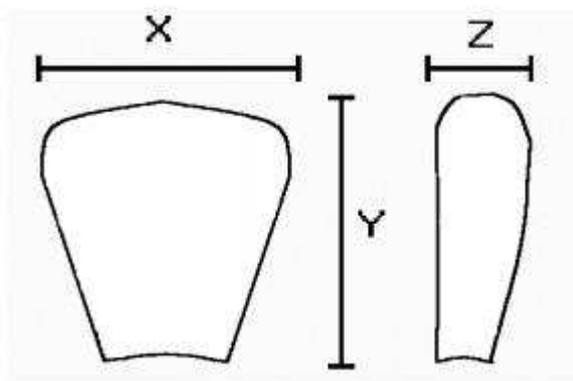


Figura 2: Eixos perpendiculares para verificação do tamanho

Segundo Lucena & Silva (1995), a forma e o tamanho são propriedades inseparáveis para se descrever um produto de forma satisfatória e dentro dessas propriedades físicas os principais parâmetros a serem definidos são a esfericidade e a circularidade.

A circularidade e a esfericidade são os parâmetros principais, ou seja, quanto mais próximos da unidade estiverem esses valores mais próximos também de um círculo ou de uma esfera estará o produto em estudo. A circularidade é a razão entre a maior área projetada do produto na sua posição de repouso (A_p) e a área do menor círculo circunscrito (A_c). Já a esfericidade é a razão entre o diâmetro do maior círculo inscrito (d_i) e o diâmetro do menor círculo circunscrito (d_c) (Figura 3) (SILVA & CORRÊA, 2012).

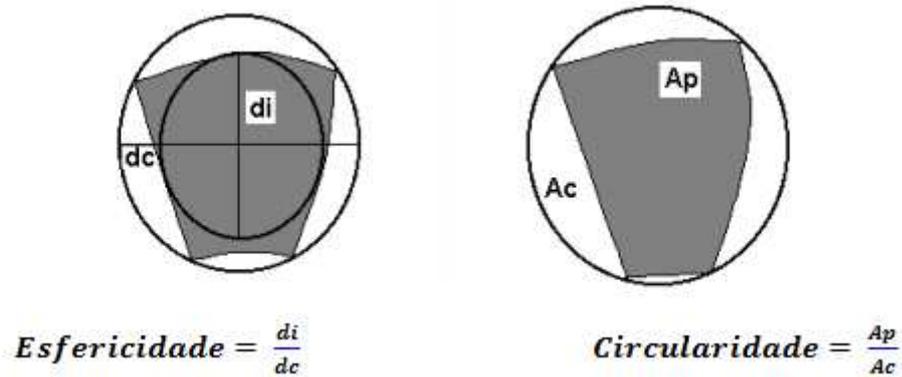


Figura 3: Determinação aproximada da esfericidade e da circularidade

A circularidade pode ainda ser calculada pela Equação 1 e ilustrada pela Figura 4, que seguem:

$$C_r = \sum_{i=1}^N \left(\frac{r_i}{NR} \right) 100 \quad (1)$$

Em que,

r_i = raios de curvatura,

R = raio da maior circunferência inscrita na projeção do objeto

N = número de raios de curvaturas feitos na projeção da semente na posição de repouso

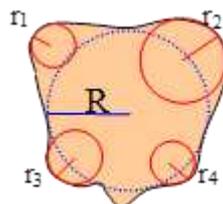


Figura 4: Raios de curvatura do produto e da maior esfera inscrita para cálculo da circularidade

Curry (1951) descreve mais dois métodos para determinação da esfericidade além do citado acima (Figura 4). O primeiro considera o produto em estudo como um elipsoide com volume $V_{\text{elip}} = 4\pi r_a r_b r_c / 3$, em que r_a é o maior raio, r_b o raio médio e r_c o menor raio. Considerando ainda $a = 2r_a$, $b = 2r_b$ e $c = 2r_c$, tem-se (Equação 2):

$$\varphi = \left(\frac{\text{volume do produto}}{\text{volume da menor esfera circunscrita}} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{\text{média geométrica dos diâmetros}}{\text{maior diâmetro}} = \frac{(abc)^{1/3}}{a}$$

O segundo método citado por Curry (1951), leva em consideração o diâmetro de uma esfera de volume equivalente ao volume do produto estudado e o diâmetro da menor circunferência circunscrita na projeção do produto (Equação 3).

$$\varphi = \frac{d_e}{d_c} \times 100 \quad (3)$$

em que,

d_e = diâmetro de uma esfera de volume igual ao da semente, também chamado diâmetro da esfera equivalente;

d_c = diâmetro da menor circunferência que circunscribe a projeção da semente na posição de repouso.

Segundo Sirisomboon et al. (2007), o tamanho (área superficial, área projetada e volume) e a forma (circularidade, esfericidade) dos frutos, nozes e sementes, são imprescindíveis para seu processo de descasque. Esses dados podem ser usados para determinar o limite inferior do tamanho dos transportadores, como esteira, elevador de canecas e transportador helicoidal.

2.2.2 *Massa específica*

A massa específica de um material é a razão entre sua massa e seu volume, podendo ser real ou aparente. A massa específica real considera apenas o volume ocupado pela massa granular, enquanto a aparente inclui o volume do espaço intergranular (MOHSENIN, 1986), ou seja, a massa específica pode ser definida como a razão entre a

massa e o volume ocupado por determinado produto. Este conceito, aplicado à massa e volume de apenas uma unidade de produto, determina a massa específica real ou unitária. Já a aplicação do conceito para determinada massa ou quantidade de produto estabelece a definição da característica massa específica aparente (PABIS et al., 1998).

No que se refere aos principais parâmetros envolvidos na quantificação da resistência que uma massa de grãos oferece ao escoamento de ar, pode-se relacionar três propriedades físicas principais, a porosidade, a massa específica real e a massa específica aparente que, de modo geral, são funções do teor de água do material e da presença de impurezas na amostra (SILVA et al., 2006).

Segundo Srivastava et al. (1993), o tamanho e a massa são as características mais importantes no que se refere à limpeza de um produto, sendo o fluxo de ar intermitente influenciado pela massa. Este processo se baseia nas diferenças significativas existentes entre as massas específicas dos produtos, com diferentes tamanhos, e dos materiais estranhos, o que permite que o ar promova tal separação.

2.2.3 *Volume*

O volume pode ser determinado pelo deslocamento de água, cujo produto é pesado, e em seguida mergulhado em um recipiente graduado com água, estando este suspenso. O conjunto (recipiente, água e produto) é pesado e dele é retirado o peso do recipiente mais água, restando o peso da água deslocada que é utilizado na Equação 4, para o cálculo do volume (MOHSEIN, 1986).

A utilização do recipiente graduado é importante por permitir a verificação da variação de volume possibilitando uma comparação com o resultado obtido através da medida de água deslocada.

$$\text{Volume} = \frac{\text{massa de água deslocada (g)}}{\text{massa específica da água (g.cm}^{-3}\text{)}} \quad (4)$$

2.2.4 *Área Projetada*

Conforme Jindal et al. (1974), as informações sobre área superficial de vários produtos agrícolas são necessárias nas suas diferentes fases de crescimento, para que possam ser realizados a manipulação e seu processamento. O valor superficial da área dos

grãos é de aplicação direta na determinação da velocidade terminal do grão, em projeto de máquinas de limpeza e na simulação de taxas de secagens, por exemplo.

A semelhança da forma de frutas, ovos, legumes e grãos com aquela de certos corpos geométricos (esferas, forma esférica alongada ou achatada, elipsóide, etc.) pode ser empregada para calcular a área superficial do produto considerando-a como a do corpo-padrão de mesmo volume. Jindal et al. (1974) estabeleceram fatores de correção para a diferença entre a forma do produto e a do corpo-padrão comparando a área superficial do produto determinada experimentalmente com aquela do objeto-padrão de mesmo volume.

Para objetos pequenos, como sementes, o esboço da projeção do grão pode ser determinado usando-se um ampliador fotográfico para registrar a área de critério de frutas e legumes em várias posições e classifica-los segundo o tamanho. Para testar experimentalmente a validade deste critério, uma relação foi desenvolvida entre a média verdadeira da área projetada (quando são consideradas todas as possíveis direções de projeção) e o volume do objeto (MOHSENIN, 1970).

Considerando a forma do produto um elipsóide triaxial (Figura 5), Agrawal, citado por Soares (1986), estimou o valor da área projetada pela seguinte equação (Equação 5):

$$A_p = \frac{4(a.c)}{\pi} \quad (5)$$

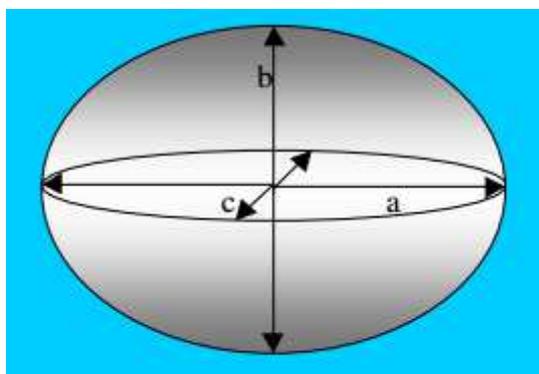


Figura 5: Elipsóide triaxial

2.3 Quebra e beneficiamento de frutos duros

Frutos duros apresentam grande resistência à quebra sendo este fator limitante para o aumento da produtividade e renda das famílias que vivem da coleta de babaçu, coco catolé, castanha de caju e licuri, entre outros.

No caso do babaçu (*Orbignya speciosa*), o trabalho de colheita se limita ao recolhimento e ao transporte dos cocos para o lugar onde devem ser quebrados a fim de serem extraídas as amêndoas (SOLER et al., 2007).

A dificuldade da quebra do babaçu consiste na dureza do coco e na circunstância de que o endocarpo somente se quebra de forma irregular. Dificilmente se consegue evitar que as amêndoas se quebrem ou sejam machucadas e isto é prejudicial para a extração de óleo porque as amêndoas machucadas se tornam rançosas dentro de 24 a 48 horas perdendo, assim, o valor comercial (SOLER et al., 2007).

A quebra manual do babaçu e de outros coquinhos semelhantes absorve cerca de 57% dos gastos industriais sendo, há mais de um século realizada com o machado e até pedras (SOLER et al., 2007). A produção de amêndoa em 1966 foi de 172 mil toneladas, resultando mais de 128.000 toneladas de resíduos (cascas). Cada quebradeira produz em média 5,0 kg de amêndoas por dia de trabalho que, a um preço médio de R\$ 0,30 por quilograma proporciona uma renda diária de R\$ 1,50 (FRAZÃO, 2001). No caso do coco catolé, cada rosário (cordão formado por amêndoas de coco catolé) é comercializado nas feiras livres a R\$1,00 e é composto por cerca de 30 amêndoas.

Até hoje o machado é utilizado como instrumento principal na quebra do coco para extração das amêndoas, trabalho este realizado por famílias rurais de baixa renda. A quebra do coco é um trabalho penoso e demorado executado por meio extremamente simples. Os trabalhadores, geralmente mulheres e crianças acima de 10 anos, seguram com os pés, no chão, um machado cujo gume é dirigido para cima. Segundo Soler et al. (2007) o coco é colocado sobre o gume e são aplicadas pancadas com um pau ou um macete, até que o mesocarpo e o endocarpo se partam e as amêndoas possam ser retiradas primeiro, o coco é fendido em duas partes e depois, até a soltura completa das amêndoas.

O coco catolé possui endocarpo duro e lignificado, o que dificulta a sua quebra. O uso do processo mecanizado de beneficiamento, como é utilizado na castanha de caju, caracteriza-se pela operação de descasque ou corte automático do fruto. É uma operação delicada e dificultada pela estrutura da casca, que por ser elástica e dura, favorece a ocorrência de danos e, conseqüentemente, a contaminação da amêndoa (PAIVA et al., 2000), característica esta que pode ser observada no coco catolé que possui endocarpo duro e lignificado, contendo a amêndoa de interesse.

Já as pequenas fábricas que operam com corte manual e cozimento da castanha com vapor saturado estão implantadas em todos os estados produtores de castanha do Nordeste,

com cerca de cem unidades e capacidade anual de processar vinte mil toneladas de castanha (PAIVA et al., 2000).

Segundo Arango (1994), a qualidade da amêndoa de castanha de caju pode ser definida como um conjunto de características sensoriais como cor, sabor, cheiro e homogeneidade morfológica. Isso faz com que atributos como tamanho, integridade física do produto, cor e sabor sejam relevantes na determinação das preferências do consumidor.

No caso da castanha de caju as indústrias tradicionais de beneficiamento vêm sofrendo perda de qualidade devido aos equipamentos utilizados e ao processo de beneficiamento, que se reflete no índice de amêndoas inteiras, na incidência de manchas e na sua coloração. (LIMA, 2009).

Como para a castanha de caju, para outras amêndoas como a do coco catolé, necessitam-se pesquisas para o desenvolvimento de processos visando otimizar o beneficiamento da amêndoa e promover um produto com alta qualidade, proporcionando um despêliculamento satisfatório, ausência de manchas e redução de índice de quebras, agregando valor ao produto.

Assim como no babaçu, onde o trabalho é realizado por famílias rurais de baixa renda (SOLER et al., 2007), ocorre também com o coco catolé, que no interior dos estados da Paraíba e Pernambuco são quebrados com uma espécie de martelo.

2.4 Estudo dos esforços para quebra do coco catolé

As propriedades de um material relativas à sua capacidade de resistir a forças mecânicas, são denominadas propriedades mecânicas. São exemplos de propriedades mecânicas a resistência, elasticidade, dureza e tenacidade e para se compreender as propriedades mecânicas é preciso conhecer a definição de tensão e deformação.

Tensão nada mais é do que a relação entre a força aplicada e a área que impõe resistência a esta força. A tensão pode ser obtida pela Equação 6 e é expressa em N/m^2 , ou seja, em Pascal (Pa). Já a deformação é definida como a relação entre a variação de comprimento que o material sofre após a aplicação de determinada carga, esta deformação é expressa pela seguinte expressão (Equação 7):

$$\sigma = \frac{F}{A_{resistente}} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

O conhecimento das características mecânicas dos produtos agrícolas é imprescindível para que os equipamentos possam ser desenvolvidos para atingir a máxima eficiência sem, contudo, comprometer a qualidade final do produto. As trincas e quebras ocorrem nos materiais se os esforços, aos quais são submetidos, excederem a força de resistência do material (RESENDE et al., 2007).

O módulo de deformidade é função da razão de Poisson, que assume valores constantes para cada material. Na ausência deste valor, Batista et al. (2003) utilizaram outra variável proporcional ao módulo de deformidade, denominada módulo proporcional de deformidade.

A partir da curva de “força-deformação”, obtida a partir do teste de compressão, pode-se obter parâmetros que caracterizam o comportamento do material quando submetido a uma carga. Para material não-biológico, de forma geométrica regular ao dividir a força pela área da seção transversal e a deformação pelo comprimento inicial do material, obtém-se a curva “tensão-deformação específica”. Para grande número de materiais o comportamento inicial da curva de “tensão-deformação específica” é linear (elástico), sendo a inclinação da reta denominada módulo de elasticidade ou de Young, único para cada material (RIBEIRO, et al., 2007).

No caso de corpos convexos (grãos, frutos e vegetais intactos), a determinação do módulo de elasticidade por meio das curvas de “força-deformação”, obtidas de testes de compressão entre placas paralelas, torna-se mais complexa. Isto se deve ao contorno convexo do produto que faz com que as áreas de contato entre o material e as placas variem de acordo com a deformação do produto (RIBEIRO, et al., 2007).

Dentre as diversas propriedades mecânicas o módulo de deformidade permite que se realizem comparações de resistência relativa entre os diversos materiais. Para determinação do módulo de deformidade do produto faz-se a separação da sua deformação total nas duas componentes: elástica e plástica; assim, com a obtenção de curvas de força em função da deformação durante a aplicação de cargas ao produto e se considerando sua deformação total, será obtido o módulo de deformidade total do produto (RESENDE et al., 2007).

Segundo Couto et al. (2002), no estudo do comportamento mecânico de um material o módulo de deformidade é considerado mais significativo que o de elasticidade visto que, quando um produto é comprimido, a deformação total é que tem aplicação prática.

Henry et al. (1996) relataram que a força necessária para deformar materiais biológicos pode ser descrita como função da deformação, de acordo com a série de Taylor truncada (Equação 8):

$$F = ax + bx^2 + cx^3 + \dots \quad (8)$$

Em que:

F - força, N;

x - deformação, mm;

a, b, c - coeficientes elásticos do modelo, $N\text{ mm}^{-1}$, $N\text{ mm}^{-2}$ e $N\text{ mm}^{-3}$, respectivamente.

Com base na Equação 8 a inclinação da curva força-deformação para um ponto qualquer, é a tangente, T, obtida a partir da primeira derivada da equação anterior:

$$T = a + 2bx + 3cx^2 \quad (9)$$

A tangente máxima é obtida no ponto de inflexão da curva, em que $x = -b/3c$, sendo considerado indicador da dureza do produto. A secante S, considerada a inclinação da reta que passa pela origem e por um ponto qualquer da curva, é expressa pela Equação 10:

$$S = a + bx + cx^2 \quad (10)$$

A secante máxima corresponde ao ponto em que o valor de deformação x é $-b/2c$, descrevendo a elasticidade em diferentes níveis de deformação. Os valores de deformação referentes à tangente e à secante máximas são obtidos igualando a zero, respectivamente, a derivada da tangente (dT) e da secante (dS), em função da deformação (x).

Segundo Bourne (2002), as curvas de força-deformação comuns para alimentos se apresentam conforme a Figura 6. A maioria dos produtos apresenta comportamento semelhante à curva A, que é côncava em relação ao eixo y; esta curva é típica de produtos, como marshmallows, alguns frutos e vegetais maduros; a curva B descreve o comportamento de produtos rígidos, como frutos, vegetais verdes e ovos. Esses produtos obedecem à lei de Hooke, que estabelece que a deformação de um corpo é diretamente proporcional à força nele aplicada; já a curva C, que tem formato de S, é típica para pães, doces, bolos, alguns queijos e outros alimentos porosos.

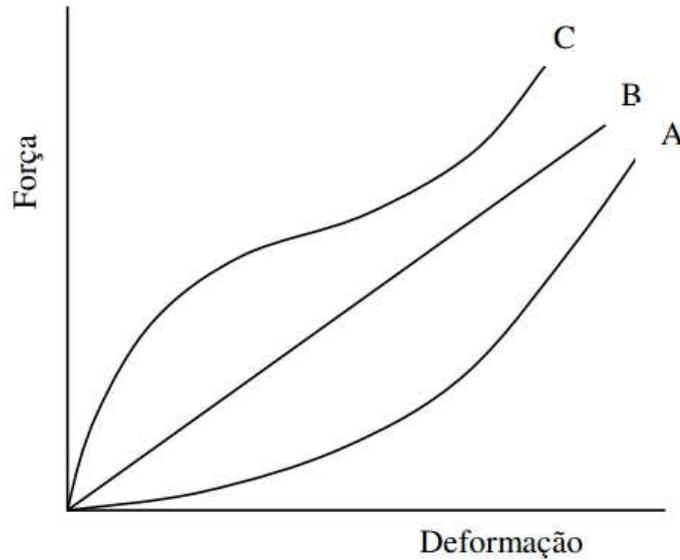


Figura 6: Curvas típicas do comportamento força-deformação para alimentos (BOURNE, 2002)

Em estudos realizados por Couto et al. (2002) com frutos do café, observou-se que seu comportamento mecânico poderia ser considerado dependente dos seguintes parâmetros: variedade do produto, estágio de maturação dos frutos na colheita, tipo de força que atuará sobre o material, velocidade de aplicação das forças e local de aplicação dessas forças no fruto.

Das curvas de compressão do produto (força versus deformação, provenientes da máquina de ensaios) foram obtidas as seguintes informações para o café: valores da força máxima sustentada pelo fruto antes do colapso; deformação específica do produto ao atingir esta força e energia requerida para o colapso do produto. As forças máximas foram obtidas diretamente das curvas e a deformação específica foi determinada pela relação entre a deformação do fruto após compressão (deslocamento da placa compressor da máquina) e o seu comprimento inicial, todos medidos segundo o eixo de compressão. A energia para o colapso do fruto foi obtida através da determinação da área sob a curva de força versus deformação, até o ponto de interesse (COUTO et al., 2002).

Em geral, a finalização de um ensaio de compressão pode ocorrer de duas maneiras. A primeira delas seria por ruptura, e a outra por colapso. No primeiro caso, a força atuante em um corpo, após atingir determinado valor, sofre queda brusca até se igualar a zero, enquanto no segundo caso a força atuante no material atinge um valor máximo e, a seguir, cai lentamente, até atingir valor nulo ou tem sua intensidade reduzida, mas não alcança um valor nulo. Para os frutos de café estudados por Couto et al. (2002), foi verificada a última

situação, onde as forças atuantes durante a compressão do produto atingem valor máximo e, depois, têm a intensidade reduzida, indicando a ocorrência de algum colapso na estrutura do fruto.

Estudos realizados com a fisiologia pós-colheita de frutos de gueroaba revelaram que a firmeza dos frutos diminui em função do tempo de armazenamento. Sendo esta gradual ao longo de todo o processo de amadurecimento. Segundo Santelli & Calbo (2006) a firmeza dependente da turgidez celular apresentou inicialmente níveis ao redor de $0,35 \text{ kgf cm}^{-2}$, os frutos nos primeiros dias após a colheita suportando a carga de peso sem se deformar, apresentando apenas marcas reversíveis. Com o passar dos dias a sua resistência foi diminuindo e ao fim do experimento a firmeza apresentou valores mais baixos que $0,1 \text{ kgf cm}^{-2}$, em que os frutos passaram a apresentar pequenas fissuras quando submetidos ao método e apresentaram também deformações irreversíveis.

Santelli & Calbo (2006) também observaram que os frutos são sensíveis à injúria de resfriamento e quando armazenados à temperatura de 8°C apresentam sinais de injúria pelo frio e não amadurecem mesmo quando recolocados à temperatura ambiente. Além disso, os picos de evolução de etileno e CO_2 ocorreram no sexto dia de armazenamento. Concluiu-se também que a gueroaba é um fruto climatérico.

Em estudos realizados por Pessoa, Assis & Braz (2004) com castanha-de-cutia (*Couepia edulis* (Prance) Prance), verificou-se que, nos testes de compressão, o fruto submetido a pressões de até 2 ton apresentou, na casca, apenas pequenas fraturas consequentes da mudança de formato durante o esmagamento, tanto na compressão ao longo do eixo principal como ao longo do secundário, sendo que, no primeiro, a deformação foi maior. O fruto apresentou, ainda, um comportamento viscoelástico, e a maior deformação relativa ao longo do eixo principal indicou que as fibras estavam dispostas preferencialmente ao longo deste eixo. O que fez com que os autores deduzissem também que a abertura do fruto pelo método de impacto e corte deve ser mais eficiente quando aplicada ao longo do eixo principal, como é com o coco (*Cocos nucifera* L.), uma drupa com epicarpo liso e um mesocarpo espesso e fibroso.

2.5 Características aerodinâmicas: coeficiente de arrasto e velocidade terminal

Os fluidos são substâncias que não têm forma própria, assumindo usualmente a forma do recipiente que os contém. Qualquer tensão de cisalhamento aplicada a um fluido

não importa quão pequena ela seja, resultará em movimento deste fluido. O fluido escoar e se deforma continuamente enquanto a tensão de cisalhamento estiver sendo aplicada.

Há duas classes de fluidos, líquidos e gases. Um líquido, composto por moléculas relativamente agrupadas com forças coesivas fortes, tende a manter seu volume e formar uma superfície livre em um campo gravitacional, se não estiver confinado na parte superior. Como as moléculas dos gases são amplamente espaçadas com forças coesivas desprezíveis, um gás é livre para se expandir até os limites das paredes que o confinam (WHITE, 2011). Os gases geralmente são muito compressíveis enquanto os líquidos são pouco compressíveis.

Segundo White (2011), a viscosidade é uma medida quantitativa da resistência de um fluido ao escoamento, ou seja, determina a taxa de deformação do fluido que é gerada pela aplicação de uma tensão de cisalhamento. Uma partícula pode mover-se facilmente através do ar, que possui baixa viscosidade, mas tem o movimento dificultado na água, por exemplo, que tem uma viscosidade 50 vezes maior (WHITE, 2011).

Considerando um referencial fixo no solo e a atmosfera em repouso neste referencial, um corpo abandonado de certa altura, cai através da atmosfera. A partir do instante em que o corpo começa a cair passa a existir, sobre ele, uma força de arrasto. Como o módulo da velocidade do corpo aumenta com a queda aumenta também o módulo da força de arrasto. Se a altura da qual o corpo foi abandonado é suficientemente grande, o módulo da força de arrasto pode ficar igual ao módulo do peso do corpo, torna-se nula a resultante das forças que agem sobre o corpo e, pela segunda lei de Newton, torna-se nula também sua aceleração. A partir de então, o módulo da velocidade do corpo permanece constante e diz-se que o corpo atingiu sua velocidade terminal.

O conhecimento da velocidade terminal de um produto e da força de arrasto em partículas colocadas em fluidos em movimento é sempre necessário em muitas aplicações em engenharia, tais como transporte pneumático e hidráulico de um produto e processos de separação e classificação de materiais.

2.5.1 Força de arrasto

De acordo com Fox, Pritchard & McDonald (2010), a superfície de um corpo imerso em um fluido em movimento, fica submetida a uma força dinâmica, resultante de forças de pressão (normal à superfície) e de cisalhamento (tangente à superfície). Tensões

cisalhantes em virtude da viscosidade e gradientes de velocidade na superfície do corpo causam forças tangenciais à superfície enquanto variações nas intensidades de pressão ao longo da superfície, devido aos efeitos dinâmicos, resultam em forças normais à superfície do corpo. A componente da força total exercida pelo fluido no sólido na direção do escoamento, é denominada arrasto.

A força de arrasto atuante em um corpo é, portanto, composta de duas parcelas: uma devida ao arrasto de atrito e a outra ao arrasto de pressão. A contribuição relativa de cada uma varia com o regime do escoamento e com as condições da superfície do corpo. O arrasto de pressão depende, basicamente, da forma do corpo e pode ser reduzido a um mínimo como, por exemplo, em um elipsoide de revolução exposto a um escoamento paralelo ao eixo de simetria do corpo. O arrasto de atrito não depende significativamente da forma do corpo, entretanto, é influenciado pelas características da superfície (TABAK & WOLF, 1998) (DONG et al., 2001).

Os arrastos de pressão e atrito são, simultaneamente, de grande valor apenas em poucas situações. Para objetos que não apresentam qualquer sustentação o arrasto de pressão pode ser considerado como o arrasto total, Giles (1980). Segundo Fox, Pritchard & McDonald (2010), no caso de escoamento sobre uma esfera lisa, tanto o arrasto de atrito quanto o de pressão contribuem para o arrasto total. Para números de Reynolds, Re , muito baixos ($Re < 1$), o arrasto é predominantemente devido ao atrito. À medida em que o número de Reynolds aumenta até cerca de 1000, o arrasto é uma combinação das parcelas devidas ao atrito e à pressão. A contribuição relativa do arrasto de atrito cai com o aumento do número de Reynolds; para $Re \gg 1000$, o arrasto de atrito é aproximadamente 5% do arrasto total (FOX, PRITCHARD & MCDONALD, 2010).

A força de arrasto (F) em um corpo imerso em um fluido em movimento é comumente expressa conforme Equação 11, em que C é o coeficiente de arrasto (adimensional); A é a área característica (m^2); ρ é a densidade do fluido ($kg.m^{-3}$) e V é a velocidade uniforme do fluido ($m.s^{-1}$). O coeficiente de arrasto inclui os arrastos de pressão e de atrito.

$$Fr = \frac{1}{2} CA\rho V^2 \quad (11)$$

2.5.2 Coeficiente de arrasto

O arrasto total em um corpo é produzido pelos efeitos da pressão e da tensão de cisalhamento na superfície do corpo. Normalmente, esses dois efeitos são considerados conjuntamente e produzem um coeficiente de arrasto total, C_D (MUSSON et al., 2004).

O coeficiente de arrasto sobre um objeto depende de sua forma que pode variar desde uma forma aerodinâmica até uma rombuda. O arrasto sobre um elipse com relação de aspecto l/D , onde D e l são a espessura e o comprimento paralelo ao escoamento, ilustra esta dependência. Na Figura 7 pode-se observar como varia o coeficiente de arrasto da elipse, $C_D = D/(\rho U^2 b D/2)$, baseado na sua área frontal $A = bD$ (em que b é o comprimento do corpo na direção normal ao escoamento). Quanto mais rombuda for a elipse maior será o arrasto sobre ela. Pela Figura 7, também se pode observar que se $l/D = 0$ (ou seja, uma placa normal ao escoamento), $C_D = 1,9$. É importante salientar que o valor de C_D diminui quando a relação l/D aumenta (MUSSON et al., 2004).

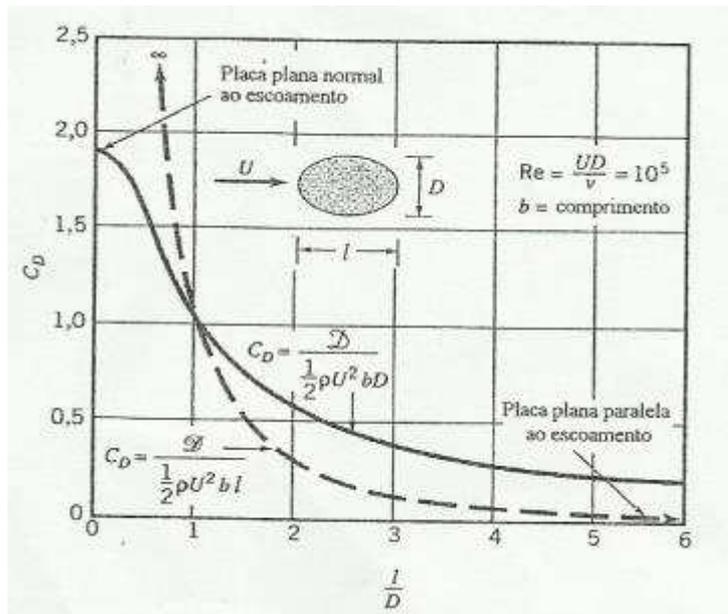


Figura 7: Coeficiente de arrasto para uma elipse com área frontal igual a bD ou área de seção transversal no plano perpendicular à figura igual a bl

Além da dependência da forma, o coeficiente de arrasto também depende do número de Reynolds do escoamento onde o corpo está imerso. Esses escoamentos podem ser classificados em: escoamentos com número de Reynolds muito baixos, com número de Reynolds moderados e com número de Reynolds muito altos (camada limite turbulenta) (MUSSON et al., 2004).

Os escoamentos com números de Reynolds baixos ($Re < 1$) são controlados por um balanço entre as forças viscosas e as de pressão. As forças de inércia são muito pequenas; nestas circunstâncias o arrasto é função da velocidade a montante, U , do tamanho do corpo, l , e da viscosidade dinâmica, μ . Assim, $D = f(U, l, \mu)$ (MUSSON et al., 2004).

Os escoamentos com números de Reynolds moderados tendem a apresentar uma estrutura do tipo camada limite. O coeficiente de arrasto tende a diminuir suavemente com o número de Reynolds no escoamento sobre corpos aerodinâmicos. No caso de corpos rombudos o coeficiente de arrasto tende a números constantes (FOX, PRITCHARD & MCDONALD, 2010). O valor de C_D para esferas e cilindros circulares indica esta característica (valor constante) na faixa de $10^3 < Re < 10^5$.

O coeficiente de arrasto aumenta quando a camada limite se torna turbulenta nos corpos aerodinâmicos porque a maior parte do arrasto é devida à força de cisalhamento, que é muito maior no escoamento turbulento do que no laminar. Por outro lado, o coeficiente de arrasto para um corpo relativamente rombudo, como um cilindro ou uma esfera, diminui quando a camada limite se torna turbulenta (MUSSON et al., 2004).

2.5.3 Velocidade terminal

A qualidade do produto beneficiado resulta da capacidade das máquinas em remover impurezas, sementes de má qualidade e todo material estranho. A aplicação de fluxo de ar para a separação de um produto de materiais indesejados tem sido usada por um grande número de pesquisadores. Srivastava et al. (1993), verificaram em sistemas de separação utilizados em máquinas colhedoras, a necessidade de desenvolvimento de um separador eficiente, compacto e independente da força de gravidade .

Para o desenvolvimento de máquinas em que se utiliza um fluxo de ar para separar os grãos das impurezas, o conhecimento da velocidade terminal de todas as partículas que compõem uma mistura de produto e impurezas, tais como palha, sementes silvestres e folhas, é essencial (MOHSENIN, 1986).

Uhl & Lamp (1966) investigaram o efeito da velocidade do ar na separação das impurezas contidas em amostras de trigo, milho e soja. As faixas de velocidade do ar determinadas para a separação pneumática foram 5,79-9,14; 7,92-12,80 e 9,14-18,29 m s⁻¹ para milho, trigo e soja, respectivamente. Os autores constataram, ao utilizar um único

fluxo de ar no processo de separação das impurezas, a ocorrência de uma separação completa para o trigo e a soja, mas para o milho ocorreram enormes perdas de grão.

Segundo Srivastava et al. (1993), o tamanho e a massa dos grãos e impurezas são as propriedades mais importantes na limpeza, sendo o fluxo de ar intimamente influenciado pela massa. Existem, também, outros fatores que influenciam no movimento relativo entre sólido-fluido, dentre os quais a orientação do sólido durante o movimento e a rugosidade do produto.

Estudos aerodinâmicos de grãos agrícolas têm mostrado que esses assumem, a todo instante, orientações aleatórias, giram em torno do eixo vertical e ainda que existe tendência de sua maior dimensão se movimentar na direção do plano horizontal. Esta rotação e inclinação têm sido explicadas como resultado da falta de simetria do grão e, neste caso, a força aerodinâmica que atua no corpo não passa pelo seu centro de gravidade e a sua direção não é paralela à da velocidade do ar. Esta força pode ser considerada equivalente à soma de uma força vertical passando pelo centro de gravidade, uma força horizontal que tende a girar o grão em torno do eixo vertical, e um binário, no plano vertical, que tende a mudar a inclinação do eixo mais longo do grão (MOHSENIN, 1986). Observa-se experimentalmente que, quando os grãos começam a girar, eles começam, também, a subir em um túnel de vento, indo para uma região de menor velocidade; em outras palavras, a rotação causa maior arraste e menor velocidade terminal.

O acréscimo de elementos de rugosidade à superfície de um corpo pode suprimir oscilações locais na transição entre o escoamento laminar e o turbulento na camada limite. Essas oscilações podem conduzir a variações de arrasto e a flutuações aleatórias da sustentação (FOX, PRITCHARD & MCDONALD, 2010). A determinação experimental da velocidade terminal de um corpo é, frequentemente, realizada de duas maneiras: (a) determinando a velocidade necessária para que o corpo flutue em um fluxo de ar ascendente e (b) por meio da medição do deslocamento, em função do tempo de uma partícula em queda livre no ar.

Em queda livre, o corpo alcançará velocidade constante, na qual a força de aceleração da gravidade se iguala à força de arraste, sendo esta a velocidade terminal. Tomando-se que a força gravitacional, F_g , é igual à força de arraste, F_r , e a velocidade, V , é igual à velocidade terminal V_t , tem-se:

$$F_g = m_p g \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \right) = \frac{1}{2} C_D A_P \rho_f V^2 \quad (12)$$

e

$$V_t = \left[\frac{2W (\rho_p - \rho_f)}{\rho_p \rho_f A_p C_D} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$C_D = \frac{2W \cdot (\rho_p - \rho_f)}{V_t^2 A_p \rho_p \rho_f} \quad (14)$$

onde:

g – aceleração da gravidade

m_p – massa da partícula

ρ_p – massa específica da partícula

ρ_f – massa específica do fluido

A_p – área projetada da partícula na posição normal ao movimento

W – peso da partícula

C_D – coeficiente de arraste

2.5.3.1 Velocidade terminal para corpos esféricos

Para corpos esféricos, uma esfera de diâmetro D_p , por exemplo, tem-se:

$$A_p = \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad (15)$$

$$W = \frac{\pi}{6} \rho_p g D_p^3 \quad (16)$$

Assim, a velocidade terminal de uma partícula esférica será dada por:

$$V_t = \left[\frac{4g D_p (\rho_p - \rho_f)}{3 \rho_f C_D} \right]^{1/2} \quad (17)$$

Para condições de corrente laminar o coeficiente de arraste, C_D , é calculado por:

$$C_D = \frac{24}{N_R} \quad (18)$$

onde,

N_R – número de Reynolds, $N_R = (V_t \cdot D_p \cdot \rho_f) / \eta$

D_p – diâmetro do objeto (esfera)

η - viscosidade do fluido

V_t - velocidade terminal

ρ_f – massa específica do fluido para um número de Reynolds menor que 1

Substituindo C_D (Equação 18) na equação 17, tem-se:

$$V_t^2 = \frac{g D_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{18\eta} \quad (19)$$

Para as condições de corrente turbulenta numa região onde $10^3 < N_R < 2 \times 10^5$ e C_D é aproximadamente igual a 0,44 para partículas esféricas, a velocidade terminal é obtida através da Equação 20 (LAPPLE, 1956).

$$V_t = 1,74 \left[\frac{g D_p (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{1/2} \quad (20)$$

Numa região intermediária em que o número de Reynolds está no intervalo $10^2 < N_R < 10^3$, o coeficiente de arrasto e a velocidade terminal são dados pelas Equações 21 e 22, respectivamente.

$$C_D = \frac{18,5}{N_R^{0,6}} \quad (21)$$

$$V_t = \frac{0,153 g^{0,714} D_p (\rho_p - \rho_f)^{0,714}}{\rho_f^{0,286} \eta^{0,248}} \quad (22)$$

2.5.3.2 Velocidade terminal para corpos não esféricos

A determinação da velocidade terminal de corpos baseando-se em expressões que relacionam o coeficiente de arrasto e o número de Reynolds, tem sido extensivamente investigada por vários pesquisadores nos últimos noventa anos. Nguyen et al. (1997)

relatam que, atualmente, existem pelo menos 35 equações na literatura que expressam o coeficiente de arrasto (C_D) sobre uma partícula em função do número de Reynolds (N_R). A determinação da velocidade terminal através de quaisquer dessas equações propostas para " C_D versus N_R ", requer um procedimento de tentativa e erro visto que a velocidade se encontra presente nas duas variáveis e a relação entre " C_D e N_R " é altamente não linear.

O coeficiente de arrasto de uma partícula e sua velocidade terminal são por demais influenciados pela sua forma, tamanho e orientação, pela viscosidade do meio e pelas densidades da partícula e do fluido. Dos modelos semiempíricos desenvolvidos para prever forças de arrasto em corpos submersos em um fluido, grande parte considera as partículas tendo uma forma esférica, apesar das partículas envolvidas em processos de engenharia não terem, na grande maioria, esta forma. Atualmente, é possível se estimar forças de arrasto ou velocidades terminais de uma partícula esférica sob a maioria das condições de interesse prático em um meio newtoniano incompressível. Chhabra et al. (1999), citados por Couto et al. (2004) afirmam que quando se trata de partículas não esféricas a falta de padrões para a medição da sua forma, seu tamanho e orientação durante a flutuação, constitui um dos grandes obstáculos para obtenção de modelos adequados para prever forças de arrasto e no desenvolvimento de correlações aplicáveis universalmente.

Arsenijevic et al. (1999) desenvolveram um método com vista à determinação da velocidade terminal de partículas não esféricas, no qual usaram dados de queda de pressão em um leito recheado do produto para determinação indireta do fator de forma para a partícula. Segundo os autores, os outros métodos existentes necessitam do conhecimento da forma da partícula, parâmetro de difícil obtenção para materiais reais.

Chhabra et al. (1999) investigaram a eficácia de correlações mais comumente usadas para estimar o coeficiente de arrasto de partículas não esféricas em fluidos viscosos incompressíveis e observaram que a influência da forma da partícula sobre o coeficiente de arrasto aumenta com o número de Reynolds e, ainda, que melhores estimativas desta grandeza poderiam ser obtidas somente se parâmetros ligados à forma da partícula fossem adicionados às correlações.

Schiller (1932), citado por Duarte (1997), apresentou dados sobre coeficientes de arrasto (C_D) em termos do número de Reynolds (N_R), para partículas irregulares como areia, cascalho e carvão. Os coeficientes de arrasto e o número de Reynolds foram obtidos pela determinação da velocidade experimental de sustentação da partícula sob queda livre ao ar, parafina líquida e água.

O cálculo da velocidade terminal através do número de Reynolds e do coeficiente de arrasto leva à soluções baseadas na tentativa e erro, razão por que os termos $C_D \cdot N_R^2$ ou C_D/N_R são calculados e plotados em oposição a N_R . Assim, tem-se:

$$CN_R^2 = \frac{4g\rho_f D_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{3\eta^2} \quad (23)$$

e

$$\frac{C_D}{N_R} = \frac{4g\eta(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f^2 v_t^3} \quad (24)$$

que são equações obtidas pela combinação das Equações 25 e 26, que seguem:

$$N_R = \frac{V_t D_p \rho_f}{\eta} \quad (25)$$

$$V_t = \left[\frac{4g D_p (\rho_p - \rho_f)}{3 \rho_f C_D} \right]^{1/2} \quad (26)$$

onde:

D_p – diâmetro da esfera equivalente

η - viscosidade do fluido

V_t - velocidade relativa entre o fluido e o objeto

ρ_f – massa específica do fluido

Se as Equações 14 e 25 forem combinadas, o termo CN_R^2 não incluirá D_p , mas necessitará do conhecimento do peso e da massa específica da partícula, dando origem à Equação 27.

$$CN_R^2 = \frac{8W \cdot \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{\pi \eta^2 \rho_p} \quad (27)$$

Os valores de N_R^2 , podem ser obtidos em gráficos de CN_R^2 em função de N_R (MOHSEIN, 1986).

2.5.4 Fluidos Newtonianos e partículas não esféricas

A Lei de Stokes está relacionada à força que uma partícula esférica experimenta quando se move em um fluido em um regime laminar, ou seja, de número de Reynolds baixo, que se caracteriza por baixa velocidade relativa entre a esfera e o meio.

Na região da Lei de Newton do Movimento, ou seja, na faixa em que há predominância de efeitos inerciais, o coeficiente de arraste é considerado constante, já que a força que atua sobre a esfera é aproximadamente proporcional ao quadrado da velocidade do fluido que escoar em torno da esfera (MOHSEIN, 1986) sendo o coeficiente de arrasto de 0,44 para $5 \times 10^2 < N_R < 2 \times 10^5$.

Em partículas não esféricas, são utilizadas relações matemáticas para partículas esféricas modificadas, que levam em consideração fatores de forma como a esfericidade (MOHSEIN, 1986). Assim, a velocidade terminal de uma partícula esférica e não esférica na região de Stokes será dada pelas Equações 28 e 29, respectivamente, que, no caso da equação para uma partícula esférica, se constitui na clássica expressão da Lei de Stokes (LIMA & LUZ, 2001).

$$V_t = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho_f)}{18\mu} D_p^2 \quad (28)$$

$$V_t = \frac{K_1 g \cdot (\rho_p - \rho_f)}{18\mu} D_p^2 \quad (29)$$

onde, K_1 é uma função empírica da esfericidade ϕ e é dada por:

$$K_1 = 0,843 \log\left(\frac{\phi}{0,065}\right) \quad (30)$$

Para as condições de regime turbulento, em uma região onde há predominância de efeitos inerciais, tem-se:

$$V_t = \left[\frac{4g(\rho_p - \rho_f)D_p}{3\rho_p K_2} \right]^{1/2} \quad (31)$$

onde, K_2 é função da esfericidade e é dado por:

$$K_2 = 5,31 - 4,88\varphi \quad (32)$$

Em resumo pode-se escrever as Equações 29 e 3,1 respectivamente, como:

$$C_D = \frac{24}{K_1 N_R}, \text{ válida para regime laminar} \quad (33)$$

$$C_D = K_2, \text{ válida para regime turbulento} \quad (34)$$

Mohsenin (1986) fornece uma tabela de equações comparativas para esferas e outros objetos de forma geométrica irregular. O autor ressalta, ainda, que os poucos trabalhos com partículas de formas geométricas irregulares são devidos às complicações referentes à orientação dessas partículas ao acaso e à variedade de métodos existentes para expressar tamanho e dimensões a serem usados no cálculo do número de Reynolds e da área frontal da partícula.

2.5.5 Exemplos de aplicação a produtos agrícolas

O ar é utilizado, muitas vezes, no beneficiamento e no armazenamento de produtos agrícolas, tanto para o transporte quanto para separar os produtos desejáveis de materiais indesejados, pois as propriedades aerodinâmicas de cada produto ou partícula, como a velocidade terminal e coeficiente de arrasto, são necessárias para a transmissão de ar e consequente separação pneumática de materiais.

Couto et al. (2003) estudaram o comportamento da velocidade terminal de frutos de café em função do estágio de maturação do produto na colheita (verde e cereja), época de colheita, variedade, teor de água dos frutos e número de frutos contidos na amostra usada para as determinações da velocidade e concluíram que os parâmetros que influenciaram significativamente nos valores da velocidade terminal foram os teores de água do produto, estágio de maturação dos frutos e tamanho das amostras usadas nas determinações.

Silva et al. (2003), avaliaram o comportamento da velocidade terminal dos grãos de sorgo e milho, em função do teor de água e concluíram que, semelhante à maioria dos

grãos agrícolas, para a faixa de umidade analisada, a velocidade terminal aumenta com a elevação do teor de água dos grãos.

Vilche et. al. (2003) determinaram a velocidade terminal das sementes de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.); na faixa de umidade de 4,6-25,8% b.s. a velocidade terminal aumentou de 0,6 -1,02 m.s⁻¹.

Gupta et. al. (2007) avaliaram a velocidade terminal de três cultivares de sementes de girassol, NSFH-36, PSF-118 e SH-3322, em função do teor de água; na faixa de umidade entre 6-14% b.s. a velocidade terminal de NSFH-36, PSF-118 e SH-3322 aumentou 2,93-3,28; 2,54-3,04 e 2,98-3,53 m.s⁻¹, respectivamente e o valor do coeficiente de arrasto variou de 0,18-0,24; 0,20-0,31 e 0,17-0,40, respectivamente.

Dursun et. al. (2007) determinaram a velocidade terminal das sementes de beterraba em função da umidade. A velocidade terminal aumentou de 5,6 m.s⁻¹ para 6,6 m.s⁻¹ conforme a umidade tinha aumentado de 8,39 para 14,00% b.s.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção do material de estudo

O material utilizado neste estudo se compunha de frutos de *Syagrus oleracea* (Mart.), conhecidos na região nordeste por coco catolé e na região centro-oeste por gueroba. Esses frutos foram obtidos no município de Belo Jardim, PE e nos municípios de Puxinanã, Lagoa Seca, Remígio, Esperança e Areia, todos no estado da Paraíba, nos meses de Dezembro de 2012, de Fevereiro a Maio e Setembro de 2013.

3.2 Caracterização física do fruto

A caracterização física do coco catolé foi realizada para o fruto in natura, para o fruto sem polpa e fibras e para o fruto após a quebra, ou seja, dos pedaços de cascas e amêndoas. Assim, para cada amostra estudada foram determinados os diâmetros mutuamente perpendiculares, a massa, o volume, a massa específica real, a área projetada na posição de repouso, a circularidade e a esfericidade.

A caracterização física do fruto in natura foi realizada para 20 frutos escolhidos ao acaso dos contentores recebidos no Laboratório de Produtos Agrícolas da UFCG.

Para a caracterização física do coco catolé sem a polpa e após a quebrada foram utilizados 12 kg de coco in natura que depois de lavados na máquina de limpeza e despeliculagem, desenvolvida durante este trabalho, resultaram em uma amostra de 4,357 kg. Desta amostra foram retiradas 20 unidades para caracterização física do fruto inteiro, porém sem polpa, e 40 unidades para os ensaios de compressão.

O restante da amostra foi quebrado manualmente com martelo convencional (Martelo de unha 25 mm, marca Tramontina[®]) no sentido do seu menor diâmetro, já que o teste de compressão realizado neste trabalho indicou que nesta direção a força necessária para o rompimento é menor; além disto, esta é a posição de quebra utilizada pelos agricultores que trabalham com o produto.

O material resultante da quebra de cada coco catolé (fragmentos de casca e amêndoas danificadas ou amêndoas inteiras) foi separado individualmente em sacos plásticos com tamanho de 5x20cm. Esta separação foi realizada com o intuito de classificar os fragmentos (cascas) obtidos da quebra, de acordo com a fração que os mesmos

correspondiam do coco-católé inteiro, ou seja, foram classificados visualmente 500 cocos-católé quebrados de acordo com os seguintes critérios:

- Se representam $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{8}$ do tamanho original do coco catolé (coco catolé antes da quebra);
- Se era do tipo miúdo, ou seja, sem tamanhos e formas definidas;
- E, se a quebra tinha ocorrido no sentido longitudinal (no sentido do eixo maior) ou no sentido transversal (menor eixo).

As amêndoas dos 500 cocos também foram classificadas, e essa classificação se deu da seguinte forma:

- Amêndoas inteiras;
- Amêndoas danificadas nas quais faltava apenas um pedaço;
- Amêndoas com dano transversal;
- Amêndoas pela metade;
- E amêndoas do tipo miúdo, que eram aquelas de que não se conseguia identificar o tipo de dano nem seu tamanho original.

As classes acima relacionadas foram compostas pelas seguintes características e conforme Figuras 8, 9 e 10 e 11:

Amêndoas inteiras

Amêndoas sem dano, com boa reserva e cor característica;

Amêndoa danificada menos um pedaço

Amêndoas que sofreram danos no processo de quebra, resultando em partículas com mais da metade do seu tamanho total.

Amêndoas com dano transversal

Amêndoas que sofreram danos no processo de quebra, que resultou em partículas com corte transversal ao seu eixo maior.

Amêndoas pela metade

Amêndoas que sofreram dano durante a quebra dando origem a duas partes de igual tamanho.

Amêndoas danificadas do tipo miúdo

Amêndoas que sofreram dano no processo de quebra, o que resultou em fragmentos pequenos e de forma indefinida.

Cascas $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{8}$ do tamanho original e com quebra no sentido longitudinal ou transversal.

Identificação do sentido da quebra do coco catolé, se longitudinal ou transversal, e fragmentos de casca com tamanho correspondente à determinada fração do tamanho total do produto antes da quebra.

Casca do tipo miúdo

Fragmentos de casca muito pequenos e de forma indefinida.



Figura 8: Fragmentos de casca obtidos após a quebra manual do coco catolé



Figura 9: Fragmentos de casca correspondentes à metade do coco catolé com quebra longitudinal



Figura 10: Amêndoas danificadas



Figura 11: Amêndoas inteiras

De acordo com as classes obtidas e com o auxílio de um paquímetro digital marca Pantec[®] de 0-200mm/8", obtiveram-se faixas de comprimentos em milímetro dentro de cada classe de tamanho (Tabela 1 e Figuras 12 e 13).

Tabela 1: Classificação das cascas e amêndoas

Sentido da Quebra	Classe	Faixa de comprimento (mm)
Longitudinal	$\frac{3}{4}$	$27 \leq C < 32$
		$32 \leq C < 37$
		$C \geq 37$
Longitudinal	$\frac{1}{2}$	$C < 30$
		$30 \leq C < 35$
		$C \geq 35$
Longitudinal	$\frac{3}{8}$	$20 \leq C < 25$
		$25 \leq C < 30$
		$C \geq 30$
Longitudinal	$\frac{1}{4}$	$C < 22$
		$22 \leq C < 27$
		$27 \leq C < 32$
		$C \geq 32$
Longitudinal	$\frac{1}{8}$	$15 \leq C < 20$
		$20 \leq C < 25$
		$C \geq 25$
Transversal	$\frac{1}{2}$	$C < 23$
		$23 \leq C < 28$
Transversal	$\frac{3}{8}$	$22 \leq C < 27$
		$C \geq 27$
Transversal	$\frac{1}{4}$	$C < 22$
		$22 \leq C < 27$
—	Casca tipo miúdo	—
—	Amêndoas Inteiras	$16 \leq C < 19$
		$19 \leq C < 22$
		$22 \leq C < 25$
—	Amêndoas menos um pedaço	—
—	Amêndoa pela metade	—
—	Amêndoa com dano transversal	—
—	Amêndoa tipo miúdo	—



Figura 12: Faixas de comprimento das amêndoas inteiras



Figura 13: Faixas de comprimento dentro da classe 3/4 Casca com quebra longitudinal

Para obtenção das propriedades físicas como massa específica real, tamanho, volume, massa, circularidade e esfericidade foram utilizadas 25 repetições de cada faixa de tamanho obtida durante a quebra.

3.2.1 *Massa específica real*

A massa específica real, ρ_r , foi obtida por uma relação entre a massa do produto e seu volume, não se levando em consideração a porosidade. Sendo determinada por meio da Equação 35.

$$\rho_r = \frac{m}{V_{real}} \quad (35)$$

Em que:

ρ_r - massa específica real

m - massa

V_r - volume

3.2.2 *Tamanho*

Método do paquímetro digital

As determinações dos diâmetros referentes às três dimensões (comprimento, largura e espessura) foram realizadas pelo método do paquímetro digital e chamadas de “a”, “b”, e “c”, sendo os diâmetros maior, intermediário e menor respectivamente.

Método da Projeção para obtenção da área projetada

Neste método que consiste no uso de um retroprojetor que projeta na parede em maior escala, o produto em estudo, foi utilizado para o coco catolé inteiro e para o material obtido após a quebra. Para tal, o foco do equipamento foi ajustado e o produto e uma régua colocados sobre ele. Uma folha de papel milimetrado foi colada em uma parede sobre a qual o produto foi projetado. A régua era necessária para que a escala com que o desenho foi projetado fosse determinada. Por fim, a sombra do produto projetada no papel foi contornada. O produto foi posicionado de modo que a posição projetada fosse a posição de repouso (Figura 14).

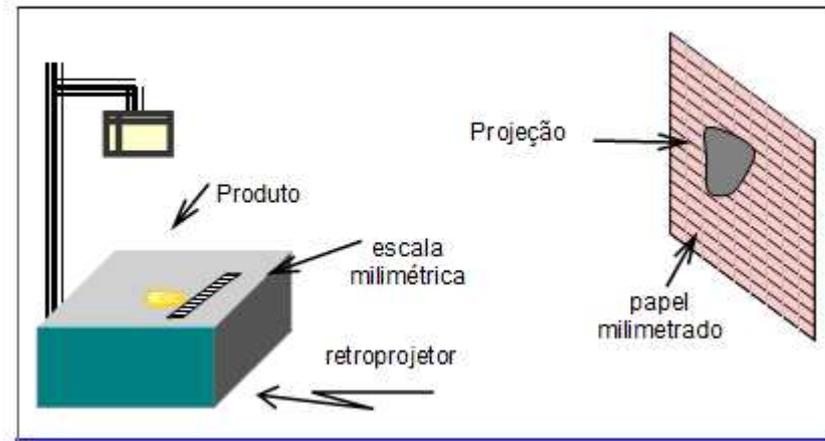


Figura 14: Projeção das partículas fraturadas após a quebra do coco para obtenção das maiores dimensões

Com a projeção e se conhecendo a escala de ampliação, pôde-se obter a área do produto na posição de repouso e sua maior dimensão.

$$\text{Dimensão} = L \times E \quad (36)$$

Em que:

L - leitura da dimensão feita;

E - fator de escala da projeção.

Com vista à determinação da área projetada foi utilizado o software UTHSCSA Image Tool 3.0[®].

3.2.3 Massa individual

A determinação da massa do coco catolé e de seus fragmentos foi realizada de forma direta, em balança analítica.

3.2.4 Volume

O volume do coco catolé foi obtido por deslocamento de massa de fluido.

Primeiramente, o fruto foi pesado individualmente. Após, um Becker graduado contendo água também teve sua massa verificada. Na pesagem do conjunto (Becker com água + produto), foi utilizada uma seringa espetada no material e presa a uma régua para servir de apoio à pesagem; o coco catolé foi, então, suspenso de forma que o mesmo não tocasse nas bordas nem no fundo do Becker, encontrando-se a massa. O volume pôde ser determinado pela Equação 4, já exposta anteriormente; as pesagens necessárias e o esquema para obtenção do volume por deslocamento de fluido estão ilustrados nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

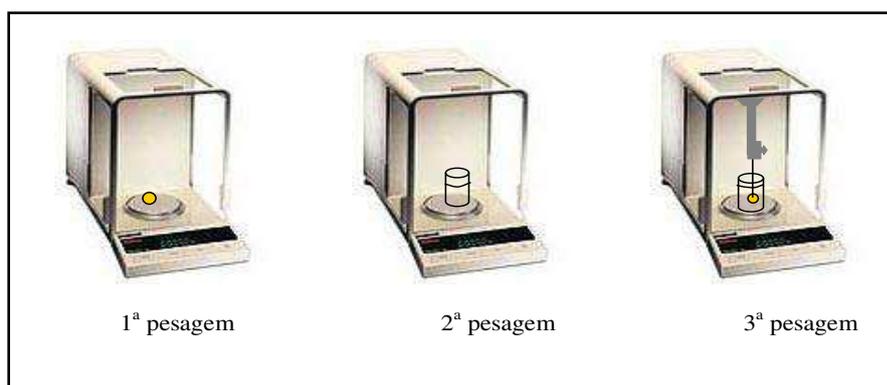


Figura 15: Pesos necessários para análise do volume por deslocamento de fluido

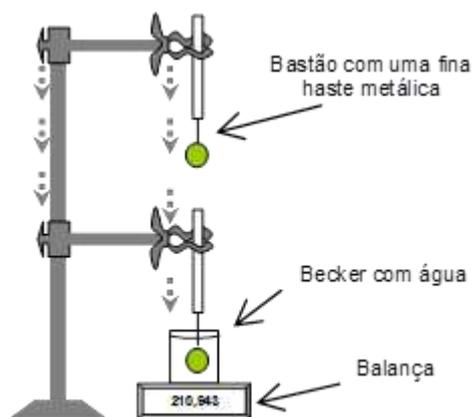


Figura 16: Volume por deslocamento de fluido

3.2.5 *Circularidade*

A circularidade é um fator que sugere o quão próximo está a área do produto de um círculo.

$$0 \leq C_r \leq 100\%$$

$$0 \leq C_r \leq 1$$

A circularidade do coco catolé inteiro e dos fragmentos de casca, amêndoas inteiras e amêndoas danificadas foi determinada pela Equação 37, mostrada a seguir:

$$C_r (\%) = \frac{A_p}{A_c} \times 100 \quad (37)$$

Em que:

C_r - circularidade, em porcentagem (%);

A_p - área projetada na posição de repouso;

A_c - área do menor círculo que circunscreve a projeção do produto na posição de repouso.

A partir dos produtos projetados na posição de repouso foi utilizado o software CorelDRAW® X5 para determinação da área do menor círculo circunscrito em cada projeção.

3.2.6 Esfericidade

Fator que indica o quão próximo está um produto de uma esfera.

$$0 \leq \varphi \leq 100\%$$

$$0 \leq \varphi \leq 1$$

A esfericidade do coco catolé inteiro e dos fragmentos de casca e amêndoas (inteiras e danificadas) resultantes da quebra manual foi determinada pela Equação 38 abaixo:

$$\varphi_I = \frac{D_i}{D_e} \times 100 \quad (38)$$

Em que:

φ_I - esfericidade, em porcentagem (%);

D_i - diâmetro do maior círculo inscrito;

D_e - diâmetro do menor círculo circunscrito.

A partir dos produtos projetados na posição de repouso foi utilizado o software CorelDRAW® X5 para determinação dos diâmetros do menor círculo circunscrito e do maior círculo inscrito em cada projeção.

3.3 Equipamento para remoção da casca, mucilagem, polpa e fibra

Para a remoção da casca, mucilagem polpa e fibras presentes no fruto de coco catolé foi desenvolvido um equipamento de limpeza, que foi adaptado de máquinas utilizadas comercialmente para descascar alho e batatas. Para isso foram realizados ajustes e adicionados acessórios desenvolvidos durante a pesquisa, que fossem eficientes na higienização do coco catolé, visto que se trata de um outro produto com características particulares.

3.4 Metodologia para remoção da casca, mucilagem, polpa e fibra

A primeira higienização do coco catolé para retirada de sujidades grudadas provenientes do solo, foi realizada na máquina de limpeza e despeliculagem por acionamento elétrico (Figura 17), desenvolvida durante esta pesquisa, na UFCG, Campina Grande, PB.



Figura 17: Máquina de limpeza e despeliculagem

A amostra de 10,2 kg de coco catolé foi dividida em 15 lotes de cerca de 680,00 gramas, cada um constituindo uma repetição dos tratamentos, o que totalizou 3 tratamentos e 5 repetições. A lavagem foi realizada na rotação de 340 RPM quando então foram avaliados 3 tempos de remoção de sujidades, polpa e fibras, sendo esses tempos de 15, 20 e 25 minutos. Após a lavagem os cocos-catolé foram recolhidos separadamente, secados ao sol e sob ventilação natural, por 24h, para que a água adquirida durante a lavagem fosse removida, quando então foram pesados.

As fibras que ainda permaneceram no fruto após a lavagem foram removidas com a ajuda de uma lâmina tipo Gillette e levadas à estufa a 105°C, durante 24h, quando então foram pesadas para verificação do peso seco de material que a máquina não foi capaz de remover.

Os dados obtidos foram analisados por meio do Teste de Tukey a 1% de probabilidade, utilizando-se o programa ASSISTAT[®] versão 7.7.

3.5 Estudo dos esforços de compressão

Foi realizado estudo dos esforços de compressão necessários para romper o coco catolé no sentido de suas duas maiores dimensões, ou seja, longitudinal e transversal. O ensaio foi realizado na Máquina Universal de Ensaio, marca Shimadzu[®], modelo SLFL-100kN, P/N: 339-83461-02 e capacidade 100kN (Figura 18).



Figura 18: Máquina Universal de Ensaio - Shimadzu

Foram utilizadas 20 unidades do fruto para quebra no sentido longitudinal e 20 para quebra no sentido transversal, que foram colocadas individualmente em sacos plásticos de 5x20cm, para que no momento do ensaio, com a compressão, não houvesse risco de acidentes com as partes estilhaçadas, já que estas ficariam presas no saco (Figura 19).



Figura 19: Ensaio de compressão

Inicialmente, foram verificadas as duas maiores dimensões de cada coco catolé com o auxílio de um paquímetro digital marca Pantec[®] de 0-200mm/8”, para que os referidos valores fossem utilizados na configuração da máquina de ensaio. O programa computacional utilizado pela máquina de ensaio para armazenar as informações obtidas durante o teste e gerar os gráficos de Força x Deslocamento foi o Trapezium[®] 2.

3.6 Determinação da velocidade terminal

Os separadores de sementes e grãos são projetados para efetuar separações de materiais baseados em diferenças existentes em alguma característica ou propriedade do produto de interesse em relação ao material indesejável. No que se refere aos processos de separação por ar, ou seja, processos aerodinâmicos, esta propriedade é denominada velocidade terminal (VAUGHAM et al., 1980). Assim, foi montado neste trabalho, um equipamento com o intuito de avaliar a velocidade terminal experimental dos materiais de estudo e propiciar parâmetros para o desenvolvimento de máquinas baseadas nesse princípio para separação de amêndoas e cascas de coco catolé.

3.6.1 Análise experimental

Fazendo uso das classes obtidas após a quebra do coco catolé e de suas propriedades físicas foi realizado um experimento com o intuito de verificar a velocidade terminal teórica e experimental de acordo com cada classe e faixa de tamanho dos diversos materiais obtidos. Para isto foram utilizadas 25 repetições de cada faixa de tamanho, dentro de cada classe, o que resultou na análise teórica e experimental de 750 partículas (amêndoas e cascas) separadamente.

3.6.2 Construção do equipamento

Com base nos trabalhos realizados por Leitão (1983), a velocidade terminal experimental dos cocos-catolé foi avaliada utilizando-se um equipamento de coluna de ar, composto por um ventilador centrífugo conectado a um tubo de acrílico transparente, com diâmetro de 6 cm e comprimento de 49 cm. Na metade do tubo foi instalada uma tela perfurada, para evitar que o produto caísse e a 5 cm do início do tubo foi colocado um reticulador, para homogeneizar o fluxo de ar e uniformizar a distribuição da velocidade na seção transversal do tubo. O ventilador foi acionado por um motor trifásico e o controle da vazão do fluxo de ar foi realizado por meio de um inversor de frequência (Figura 20).

O fluxo de ar foi gradualmente aumentado até o início do processo de flutuação do produto, momento em que foram realizadas leituras da velocidade do ar, por meio de um anemômetro digital, disposto na parte superior e central do cilindro de acrílico.

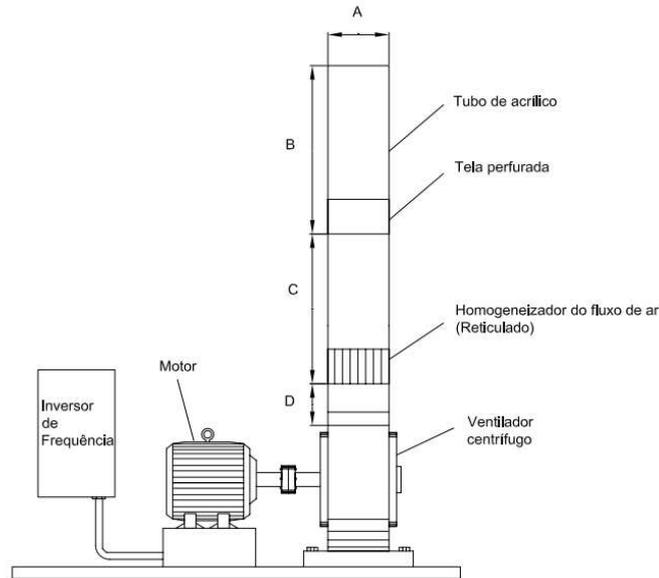


Figura 20: Desenho esquemático do equipamento utilizado para a determinação experimental da velocidade terminal das amêndoas do coco catolé

3.6.3 Procedimento

Como mencionado, para determinação da velocidade terminal experimental foram utilizadas 25 repetições de cada amostra dos 30 tamanhos obtidos da quebra do coco catolé. As partículas de coco catolé foram colocadas individualmente na malha, ligava-se o ventilador e a velocidade foi controlada pelo variômetro, a velocidade terminal era avaliada pelo uso de um anemômetro digital no início da flutuação da amostra, de forma a evitar seu movimento de rotação.

3.6.4 Análise teórica da velocidade terminal

Para obtenção da velocidade terminal teórica foram utilizados quatro métodos de cálculo, partindo do princípio de que a velocidade constante de uma partícula em queda depende das características físicas, do fluido no qual ela está sendo submetida à queda e da aceleração da gravidade.

Método 1

a) Obteve-se o valor de $C(N_R)^2$, em que C é o coeficiente de arrasto e N_R número de Reynolds pela Equação 39.

$$CN_R^2 = \frac{8W\rho_f(\rho_p - \rho_f)}{\pi\eta^2\rho_p} \quad (39)$$

Em que:

W - peso médio dos grãos e é dado por: $W = m \text{ (kg)} \times g \text{ (m/s}^2\text{)} = W \text{ (N)}$;

ρ_p - massa específica da partícula;

ρ_f - massa específica do ar a 27,2 °C (tabelado): $\rho_f = 1,175 \text{ kg/m}^3$;

η - viscosidade dinâmica do ar a 27,2 °C: $\eta = 1,8434 \times 10^{-5} \text{ (N.s/m}^2\text{)}$, ou seja, Pa.s.

b) Cálculo do número de Reynolds.

Para o cálculo do número de Reynolds das amêndoas foi utilizado o gráfico $N_R \times CN_R^2$ (Figura 21) para esferas, em que a partir do valor de CN_R^2 obtido como descrito anteriormente foi encontrado o valor de N_R , o que também foi realizado para as cascas, porém o gráfico utilizado foi o de $N_R \times CN_R^2$ para discos (Figura 22).

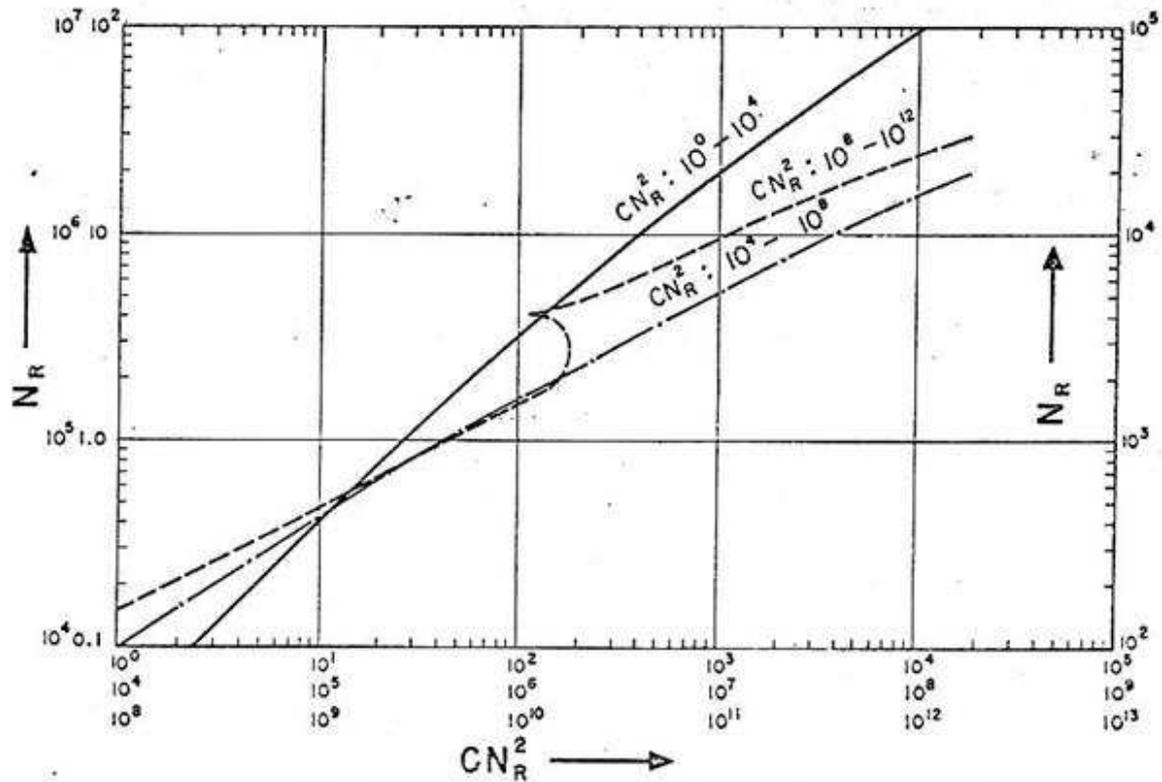


Figura 21: Número de Reynolds, N_R , versus CN_R^2 para esferas

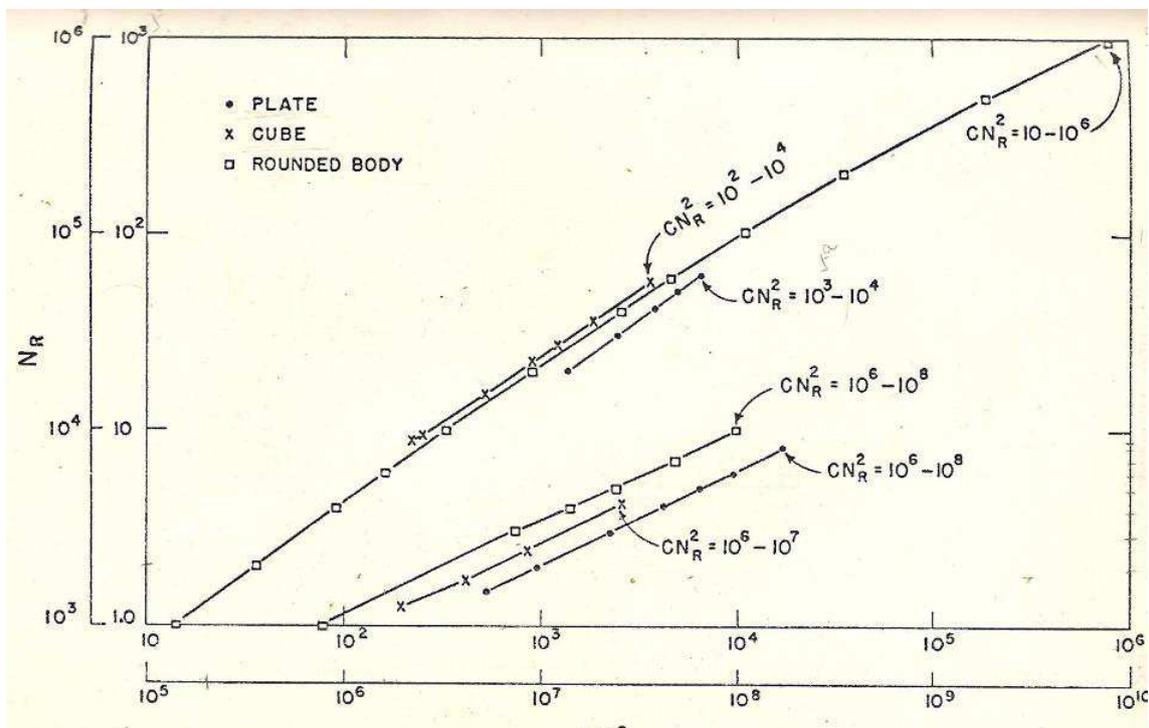


Figura 22: Número de Reynolds, N_R , versus CN_R^2 para discos

c) Por fim, realizou-se o cálculo da velocidade terminal teórica pela Equação 40:

$$V_t = \frac{N_R \eta}{D_e \rho_f} \quad (40)$$

Em que:

D_e - diâmetro da esfera equivalente, dado por: $D_e = (abc)^{1/3}$;

ρ_f - massa específica do ar a 27,2 °C (tabelado): $\rho_f = 1,175 \text{ kg/m}^3$;

η - viscosidade dinâmica do ar a 27,2 °C: $\eta = 1,8434 \times 10^{-5} \text{ (N.s/m}^2\text{)}$, ou seja, Pa.s;

N_R - número de Reynolds, adimensional.

Método 2

Considerou-se que o produto, cascas e amêndoas, possuíam forma esférica, para isto foi calculado o número de Reynolds para constatação do regime de escoamento e para fazer as devidas considerações para o coeficiente de arraste, C_D . Chutava-se um valor para a velocidade terminal (escolheu-se o valor obtido experimentalmente), substituía-se este valor na Equação 40, para o cálculo do número de Reynolds, a partir do momento em que Reynolds foi determinado, buscou-se o valor de C_D no gráfico $C_D \times N_R$ (Figura 23). O valor do coeficiente de arrasto encontrado no gráfico foi substituído na Equação 41 para obtenção de um novo valor de V_t , a partir daí foi analisado se o valor calculado de V_t estava próximo do valor proposto, inicialmente. Quando o valor calculado era próximo do valor proposto aceitava-se o valor da velocidade calculado; caso contrário, prosseguia-se a um novo valor proposto.

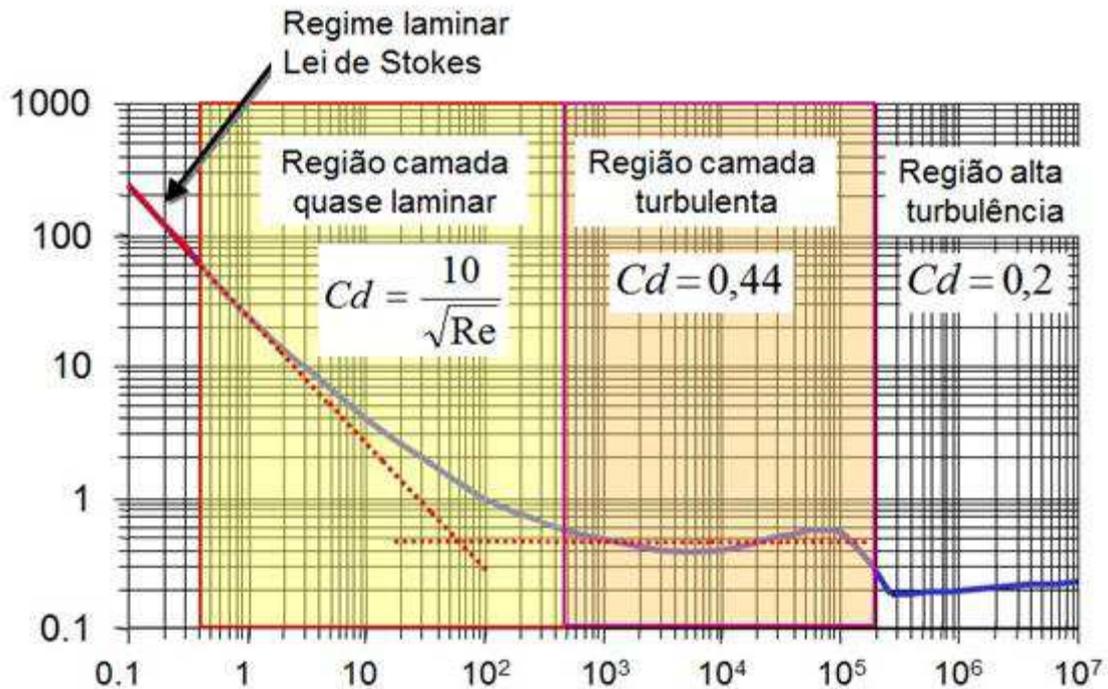


Figura 23: Coeficiente de Arraste x Número de Reynolds

Método 3

Para as condições de corrente turbulenta numa região onde $10^3 < N_R < 2 \times 10^5$ o coeficiente de arraste (C_D) é aproximadamente igual a 0,44 (LAPPLE, 1956), para esferas. Já para cascas de forma semicircular com o fluxo de ar em contato com sua parte externa, o C_D é de 1,1 para o regime turbulento. Para o cálculo da velocidade terminal por este método, foram aplicados esses valores de C_D na equação abaixo (Equação 41):

$$Vt = \left[\frac{4gDp(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_D} \right]^{1/2} \quad (41)$$

Em que:

D_p – diâmetro da partícula, m;

ρ_p – massa específica, kg/m^{-3} ;

ρ_f – massa específica do fluido, kg/m^{-3} ;

g – gravidade, $9,81\text{m/s}^2$;

C_D – para esfera no regime turbulento, 0,44, adimensional.

Método 4

Levando em consideração a esfericidade, φ , de cada partícula, foi utilizada a Equação 42, de Pettyjohn & Christiansen (1948) para correção e em seguida foi utilizada a Equação 41, para o cálculo da velocidade terminal.

$$C_D = 5,31 - 4,88(\varphi) \quad (42)$$

Em que:

φ – esfericidade da partícula, em decimal.

3.7 Simulação da separação e seleção por velocidade terminal

Nesta etapa do trabalho foram avaliados 5 níveis de velocidade do fluxo de ar, 12, 13, 14, 15 e 16 m/s para separação das partículas (amêndoas e cascas) obtidas da quebra do coco catolé. Para isso foram utilizadas misturas totalizando a separação de 20 unidades de cada uma das classes estudadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização física do fruto

4.1.1 Tamanho

Coco Catolé in natura

A caracterização física do coco catolé *in natura* foi realizada utilizando-se 20 unidades (20 repetições). O produto foi comparado a um elipsoide triaxial tendo seus 3 diâmetros determinados com o auxílio de um paquímetro digital. Os dados médios e o desvio padrão obtidos para a caracterização do coco *in natura* quanto ao seu tamanho podem ser observados na Tabela 2, sendo o maior diâmetro de 38,528 mm, o intermediário de 31,307 mm e o menor de 30,749 mm.

Tabela 2: Valores médios e desvios padrão das medidas dos 3 diâmetros mutuamente perpendiculares do coco catolé *in natura*

	a(mm)	b(mm)	c(mm)
Média	38,528	31,307	30,749
Desvio Padrão	2,038	1,613	2,217
Coef. de Variação (%)	5,289	5,154	7,210

Coco Catolé despulpado antes da quebra

Para a caracterização física do coco catolé despulpado e antes da quebra foram utilizadas 20 unidades (20 repetições). O coco catolé antes da quebra foi comparado a um elipsoide biaxial, já que ele só apresentava duas medidas, um diâmetro maior (a) e dois diâmetros iguais (b = c). Os valores médios dos tamanhos encontrados com o uso de um paquímetro digital, tal como os desvios padrão, podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3: Diâmetro maior e menor do coco catolé antes da quebra

	a(mm)	b (mm)
Média	37,507	20,073
Desvio Padrão	2,929	1,158
Coef. de Variação (%)	7,808	5,767

Os valores do diâmetro maior variaram de 32,89 mm a 42,88 mm, enquanto do diâmetro menor a variação foi de 17,95 mm a 21,63 mm, com valores médios de 37,51 mm e 20,07 mm, respectivamente.

Pode-se observar que o valor médio do diâmetro maior se enquadra na faixa de tamanho maior que 35 mm, que é a faixa com maior frequência dentro da classe de 1/2 do tamanho total do coco com quebra no sentido longitudinal, conforme Tabela 4.

Coco Catolé após a quebra

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os dados para o coco catolé, após a quebra, conforme classificação por tamanho, de amêndoas e cascas.

Tabela 4: Classes de comprimento e diâmetro de amêndoas, sementes inteiras e sementes danificadas

Classe (mm)	Comprimento		Classe (mm)	Diâmetro	
	Número de amêndoas	Frequência (%)		Número de amêndoas	Frequência (%)
Amêndoas Inteiras*					
16≤C<19	75	7,576	D<9	73	8,182
19≤C<22	218	38,788	9≤D<11	226	36,970
22≤C<25	139	20,909	11≤D<13	133	22,121
Amêndoas menos um pedaço**					
C= 18,317	17	14,655	D= 11,515	17	14,655
Amêndoa pela metade**					
C= 16,940	37	31,897	D= 10,300	37	31,897
Amêndoa com dano transversal**					
C= 12,669	23	19,828	D= 10,402	23	19,828
Amêndoa tipo miúdo**					
C= 12,225	39	33,621	D= 8,566	39	33,621

Observações: As classes de cascas foram feitas após a quebra de 500 cocos.

*Amostra de 432 sementes inteiras

** Devido às formas irregulares apresentadas por essas classes, o tamanho e o diâmetro foram determinados por média.

Tabela 5: Classes de comprimento e diâmetro de fragmentos de cascas

Classe (mm)	Comprimento		Classe (mm)	Diâmetro	
	Número de cascas	Frequência (%)		Número de cascas	Frequência (%)
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal					
27≤C<32	33	46,479	D<19	15	21,127
32≤C<37	18	25,352	19≤D<21	49	69,014
C≥37	20	28,169	D≥21	7	9,859
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal					
C<30	23	24,468	D<18	8	8,511
30≤C<35	27	28,723	18≤D<20	61	64,894
C≥35	44	46,809	20≤D<21	25	26,596
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal					
20≤C<25	31	31,000	D<17	9	9,000
25≤C<30	44	44,000	17≤D<19	34	34,000
C≥30	25	25,000	19≤D<21	57	57,000
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal					
C<22	21	13,043	D<13	14	8,696
22≤C<27	40	24,845	13≤D<15	40	24,845
27≤C<32	45	27,950	15≤D<17	36	22,360
C≥32	55	34,161	17≤D<19	36	22,360
			D≥19	35	21,739
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal					
15≤C<20	48	29,448	D<14	70	42,945
20≤C<25	67	41,104	14≤D<16	43	26,380
C≥25	48	29,448	16≤D<18	41	25,153
			D≥18	9	5,521
1/2 da Casca com Quebra Transversal					
C<23	11	36,667	D<19	7	23,333
23≤C<28	19	63,333	19≤D<21	21	70,000
			D≥21	2	6,667
3/8 da Casca com Quebra Transversal					
22≤C<27	13	68,421	D<19	9	47,368
C≥27	6	31,579	19≤D<21	10	52,632
1/4 da Casca com Quebra Transversal					
C<22	27	58,696	D<18	12	26,087
22≤C<27	19	41,304	18≤D<20	23	50,000
			20≤D<22	11	23,913
Casca tipo miúdo					
C= 21,733	137	100,000	D= 14,45	137	100,000

Analisando a Tabela 5 pode-se encontrar as faixas de comprimento e diâmetro de cada classe de cascas obtidas da quebra manual de 500 frutos, assim como seus respectivos

números dentro da amostra e a frequência com que cada faixa de tamanho ocorreu dentro de cada classe. Também observa-se que o maior número de fragmentos ocorre para a quebra longitudinal nas classes de 1/8 e 1/4 do tamanho total do coco, 163 e 161 fragmentos respectivamente. Dentro dessas classes os fragmentos com comprimento maior que 32 mm representaram 34,161% da amostra total na classe de 1/4 do tamanho e na classe de 1/8 o intervalo de comprimento de 20 a 25 mm teve uma frequência de 41,104%, sendo as faixas de tamanho de maior frequência dentro destas classes.

Como se previa, os maiores comprimentos ocorreram nas classes de 3/4 e 1/2 com quebra longitudinal, até mesmo quando comparados com a mesma classe com quebra transversal. Isso se deve ao fato do primeiro tipo de quebra preservar o maior eixo do produto, enquanto o segundo rompe a maior dimensão.

No que se refere às amêndoas, a frequência de amêndoas inteiras em relação às amêndoas com algum tipo de dano pode ser observada na Figura 24 e as classes de tamanhos obtidas na Tabela 4. Pela análise da figura pode-se notar que do total de 500 cocos-catolé quebrados, 79% das amêndoas foram removidas com sucesso, ou seja, sem nenhum tipo de dano, porém, este trabalho de quebra manual é penoso e demorado, proporcionando baixas produtividades no que diz respeito à remoção de amêndoas para comercialização.

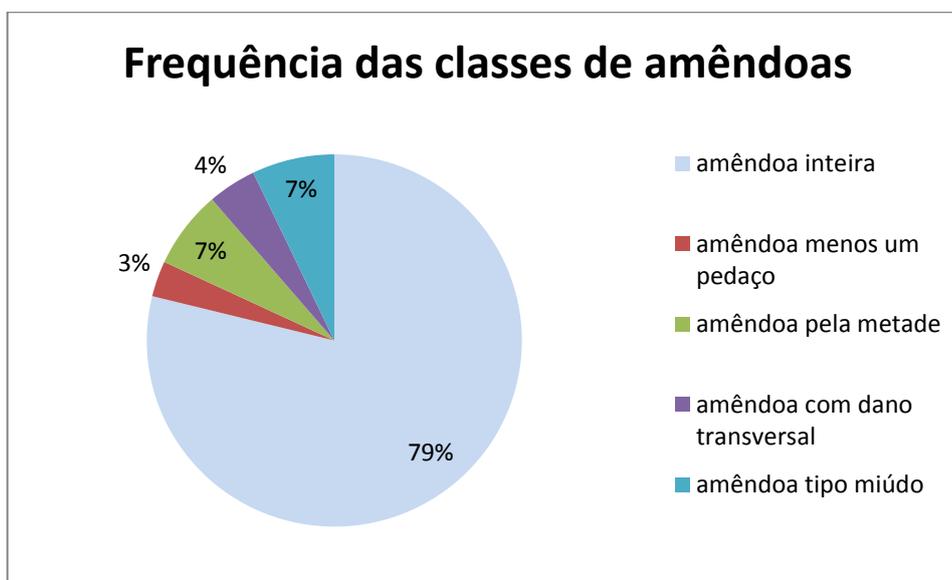


Figura 24: Frequência das classes de amêndoas

Para as amêndoas inteiras foram encontradas três faixas de comprimento, as quais variaram de 16 mm até amêndoas menores que 25 mm, sendo a variação entre faixas de 3

mm. A maior frequência ocorreu na faixa de comprimento de 19 a 22 mm representando 38,79% do total das amêndoas inteiras, ou seja, aquelas sem sinais de dano. Para o diâmetro da amêndoa também foram encontradas três faixas de tamanho, estando a maior frequência na faixa de 9 a 11 mm (36,97%).

No que se refere às classes de amêndoas danificadas, para as “amêndoas menos um pedaço”, o comprimento das partículas variou de 15,74 mm a 19,52 mm ficando a média em 18,317 mm, com desvio padrão de 0,867 mm. Na classe de “amêndoas com dano transversal” o comprimento variou de 10,09 mm a 15,29 mm, sendo o comprimento médio de 12,669 mm e o desvio padrão de 1,782 mm. Para a classe de “amêndoas pela metade”, o menor comprimento encontrado foi de 15,8 mm e o maior foi de 18,84 mm, sendo a média de 16,94 mm e o desvio padrão de 0,695 mm. Para as “amêndoas do tipo miúdo”, o comprimento médio foi de 10,977 mm e o desvio padrão de 2,239 mm.

No que se refere às cascas, obtiveram-se partículas caracterizadas por sua quebra ter ocorrido no sentido transversal ou longitudinal. Os tamanhos médios dos diâmetros a, b e c dentro das faixas de tamanhos de cada sentido de quebra do coco catolé, e os tamanhos médios das amêndoas podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6: Tamanhos médios dos diâmetros a, b e c obtidos com paquímetro digital

Faixas de Tamanhos	a(mm)	b(mm)	c(mm)
Amêndoas Inteiras			
16≤C<19mm	17,771	13,2165	12,617
19≤C<22mm	20,593	13,751	13,143
22≤C<25mm	22,801	14,541	13,642
Amêndoa Danificada - dano transversal	13,406	11,255	9,729
Amêndoa menos um pedaço	18,317	12,562	10,774
Amêndoa pela metade	16,940	10,1667	5,769
Amêndoa tipo miúdo	10,977	8,955	4,698
1/4 Casca- Quebra Transversal			
C ≤ 22	20,430	18,769	9,030
22<C≤27	24,214	18,874	9,703
1/2 Casca- Quebra Transversal			
C≤23mm	21,673	20,557	18,782
23<C≤28	24,348	20,582	20,014
3/8 Casca- Quebra Transversal			
22<C≤27	24,806	19,590	12,630
C≥27mm	28,746	19,810	10,975
1/4 Casca- Quebra Longitudinal			
C<22mm	20,434	17,784	9,383
22≤C<27mm	23,996	18,580	8,790
27≤C<32mm	29,770	17,560	7,480
C≥32mm	35,330	15,219	6,594
1/8 Casca- Quebra Longitudinal			
15≤C<20mm	17,207	16,699	8,107
20≤C<25mm	22,627	15,843	7,017
C≥25mm	30,781	14,458	6,555
1/2 Casca- Quebra Longitudinal			
C<30mm	28,958	19,691	10,3013
30≤C<35mm	32,151	19,838	11,122
C≥35mm	37,282	19,797	11,346
3/8 Casca- Quebra Longitudinal			
20≤C<25mm	23,898	19,501	10,145
25≤C<30mm	27,126	19,425	9,783
C≥30mm	35,200	19,679	11,432
3/4 Casca- Quebra Longitudinal			
27≤C<32	29,436	19,489	17,281
32≤C<37	34,470	19,718	15,885
C≥37	39,271	20,620	14,677
Cascas tipo miúdos	18,808	14,299	6,911

4.1.2 Massa, Volume e Massa Específica

Coco Catolé in natura

A partir da análise das propriedades físicas do coco catolé in natura, os dados obtidos no que se refere à massa, volume e massa específica do produto podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7: Valores médios de massa, volume e massa específica do coco catolé *in natura*

	Massa (g)	Volume (cm ³)	Massa Específica (g/cm ³)
Média	24,814	21,984	1,129
Desvio Padrão	1,969	1,669	0,009
Coef. de Variação (%)	7,935	7,591	0,840

Coco Catolé antes da quebra

Pela análise da Tabela 8 pode-se observar que a média das massas foi de 7,679g, sendo o menor valor encontrado para a massa de 5,497g e o maior valor de 9,461 g. Pelo deslocamento de fluido o volume médio para o produto inteiro foi de 6,345 cm³ e sua massa específica de 1,210 g/cm³.

Tabela 8: Massa, Volume e Massa Específica do coco catolé antes da quebra

	Massa (g)	Volume (cm ³)	ρ real (g/cm ³)
Média	7,679	6,345	1,210
Desvio Padrão	0,764	0,543	0,033
Coef. de Variação (%)	9,949	8,557	2,763

Coco Catolé após a quebra

Na Tabela 9 são mostradas as médias de massa, do volume e da massa específica para as diversas classes de amêndoas e suas faixas de tamanho, obtidas após a quebra manual do coco catolé.

Tabela 9: Valores médios de massa (M) em gramas, volume (V) em cm³ e massa específica (ρ) em g/cm³ para as classes e faixas de comprimento de amêndoas

	M (g)	V (cm ³)	ρ real (g/cm ³)
Amêndoas Inteiras			
16 ≤ C < 19	1,251	1,539	0,817
19 ≤ C < 22	1,520	1,895	0,807
22 ≤ C < 25	1,773	2,222	0,801
Amêndoas menos um pedaço			
	0,959	1,246	0,771
Amêndoa pela metade			
	0,463	0,464	0,998
Amêndoa com dano transversal			
	0,620	0,713	0,889
Amêndoa tipo miúdo			
	0,239	0,239	1,006

A massa das amêndoas inteiras variou de 1,1g a 2,184 g, sendo os valores médios de 1,251g para as amêndoas com tamanho de $16 \leq C < 19$ cm, de 1,520g para aquelas com tamanho de $19 \leq C < 22$ cm e de 1,773g para as com tamanho de $22 \leq C < 25$ cm. As amêndoas danificadas tiveram suas massas variando de 0,239g para amêndoas do tipo miúdo, ou seja, aquelas que apresentavam tamanhos reduzidos e formas indefinidas, a 0,959 g para amêndoas em que faltava um pedaço.

A partir da análise de correlação (Tabela A.1 – Apêndice A) entre as variáveis, confirmou-se haver uma correlação positiva (coeficiente de correlação de Pearson de 0,7685) entre o comprimento e a massa das amêndoas inteiras, ou seja, à medida que o comprimento aumenta sua massa também aumenta, teste realizado ao nível de 1% de probabilidade.

Para as amêndoas inteiras o volume aumentou com o aumento do comprimento das amêndoas, obtendo coeficiente de correlação de Pearson de 0,7364, conforme análise de correlação da Tabela A.2 (Apêndice A), o mesmo não ocorreu para a massa específica, que, por uma análise visual, diminuiu com o aumento do comprimento, porém, quando do teste de correlação entre comprimento e massa específica das amêndoas inteiras, foi verificado que não havia correlação entre estas características (Tabela A.3 – Apêndice A). Os valores médios obtidos variaram de 0,801 a 0,817 g/cm³, ou seja, aproximadamente constantes. Para as amêndoas com danos, a massa específica também não apresentou

correlação com o comprimento da partícula. Os valores de massa específicas das cascas variaram de 1,192 a 1,331g/cm³.

Como a massa específica é dada pela relação massa/volume, isso pode ser justificado pela maior proporção de aumento do volume em relação à massa o que representa um maior espaço vazio dentro da amêndoa.

Na Tabela 10 são mostradas as médias de massa, volume e massa específica para as diversas classes de cascas e suas faixas de tamanho, obtidas após a quebra manual do coco catolé.

Quando comparadas as faixas de comprimento das cascas dentro das classes, as faixas de maiores comprimentos apresentam também maiores valores de massa, exceto as faixas de comprimento de $27 \leq C < 32\text{mm}$ e $C \geq 32\text{mm}$ dentro da classe de 1/4 da Casca com Quebra Longitudinal, que apresentaram massas médias menores que a faixa de $22 \leq C < 27\text{mm}$, porém muito próximas.

O volume dos fragmentos de casca gerados após a quebra manual do coco catolé variou de 0,750 cm³ a 3,767 cm³. Os maiores valores de volume obtidos foram para a classe de 3/4 da Casca com Quebra Longitudinal (3,061 cm³ e 3,767 cm³). Imaginando o coco catolé inteiro, essa classe corresponde a 75% do tamanho total do produto, porém seu volume é cerca de 2 vezes menor que o volume ocupado pelo coco catolé inteiro, isso pode ser devido ao espaço vazio existente no interior do coco catolé inteiro.

Em estudos desenvolvidos por Singh & Heldman (1998), foi relatado que a densidade é um indicativo de como a matéria está organizada no corpo; assim os materiais com estrutura molecular mais compacta têm maior densidade. Isso pode ser observado quando comparamos as densidades obtidas para cascas e amêndoas danificadas com relação às amêndoas inteiras, já que estas possuíam um grande espaço vazio em seu interior.

Tabela 10: Valores médios de massa (M) em gramas, volume (V) em cm³ e massa específica (ρ) em g/cm³ para as classes e faixas de comprimento de fragmentos de cascas.

	M (g)	V (cm ³)	ρ real (g/cm ³)
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal			
27 ≤ C < 32	3,228	2,551	1,266
32 ≤ C < 37	3,875	3,061	1,271
C ≥ 37	4,897	3,767	1,300
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal			
C < 30	2,526	2,002	1,262
30 ≤ C < 35	2,907	2,303	1,262
C ≥ 35	3,854	2,995	1,288
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal			
20 ≤ C < 25	1,857	1,457	1,274
25 ≤ C < 30	2,172	1,718	1,264
C ≥ 30	3,096	2,411	1,284
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal			
C < 22	1,535	1,237	1,242
22 ≤ C < 27	2,095	1,643	1,281
27 ≤ C < 32	1,993	1,586	1,258
C ≥ 32	1,998	1,582	1,263
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal			
15 ≤ C < 20	1,071	0,832	1,293
20 ≤ C < 25	1,199	0,972	1,243
C ≥ 25	1,541	1,263	1,226
1/2 da Casca com Quebra Transversal			
C < 23	2,619	1,609	1,265
23 ≤ C < 28	3,818	2,967	1,285
3/8 da Casca com Quebra Transversal			
22 ≤ C < 27	2,632	2,082	1,276
C ≥ 27	2,813	2,272	1,239
1/4 da Casca com Quebra Transversal			
C < 22	1,640	1,325	1,236
22 ≤ C < 27	2,007	1,595	1,331
Casca tipo miúdo			
	0,893	0,750	1,192

4.1.3 Forma: circularidade e esfericidade

A Tabela 11 contém os dados de área projetada na posição de repouso, circularidade e esfericidade para o coco catolé *in natura*.

Tabela 11: Área Projetada - Ap (mm²), Circularidade – Cr (%) e Esfericidade - φ (%) do coco catolé *in natura*

	Ap (mm ²)	Cr (%)	φ (%)
Média	7,798	77,679	77,446
Desvio Padrão	0,594	3,939	3,240
Coef. de Variação (%)	7,617	5,071	4,183

Pela análise da Tabela 11, observa-se que o fruto do coco catolé apresenta, em suas características originais, valores de circularidade e esfericidade semelhantes, sendo estes de cerca de 77%. Este valor indica o grau de semelhança que o produto apresenta com um círculo e uma esfera, respectivamente.

A Tabela 12 contém os dados de área projetada na posição de repouso, circularidade e esfericidade para o coco catolé sem polpa e fibras.

Tabela 12: Área Projetada - Ap (mm²), Circularidade – Cr (%) e Esfericidade - φ (%) do coco catolé processado em máquina de limpeza e despeliculagem, sem polpa e fibras

	Ap (mm ²)	Cr (%)	φ (%)
Média	5,006	44,588	50,581
Desvio Padrão	0,414	3,234	2,736
Coef. de Variação (%)	8,260	7,254	5,410

Após a remoção da polpa e de suas fibras, o coco catolé apresentou valores de circularidade e esfericidade menores, 44% e 50%, respectivamente, como pode ser observado na Tabela 12 e nas Figuras 25 e 26. Pela análise das Figuras 25 e 26 puderam-se confirmar os dados obtidos, visto que se percebe claramente o formato circular do coco catolé *in natura*, e as extremidades pontiagudas do fruto sem a polpa.

Por outro lado, ao comparar a área projetada do fruto com e sem polpa, pode-se constatar que sua área projetada foi reduzida em cerca de 40% após a remoção da polpa e das fibras.



Figura 25: Coco Catolé in natura



Figura 26: Coco Catolé sem polpa e fibras

No que se refere às propriedades físicas, área projetada na posição de repouso, circularidade e esfericidade do coco catolé após a quebra manual, foram obtidos os valores expressos nas Tabelas 13 e 14, para as amêndoas inteiras e para as amêndoas danificadas e para as diversas classes de fragmentos de cascas, respectivamente.

Os valores de circularidade e esfericidade diminuem com o aumento de tamanho dentro de cada faixa de comprimento, tanto para amêndoas inteiras quanto para as cascas, fato que se deve ao aumento do tamanho no sentido do maior eixo do produto (maior diâmetro), em uma proporção maior que o aumento dos outros dois diâmetros. Já para a área do produto projetada na posição de repouso, como esperado, com o aumento do tamanho dentro de cada classe, a área projetada também aumentou.

A circularidade média para amêndoas inteiras foi de 62,68% enquanto a esfericidade foi de 64,82%.

Tabela 13: Área Projetada - A_p (mm^2), Circularidade – Cr (%) e Esfericidade - ϕ (%) das amêndoas de coco catolé processado em máquina de limpeza e despêliculagem, sem polpa e fibras, após quebra manual

	A_p (mm^2)	Cr (%)	ϕ (%)
Amêndoas Inteiras			
16<C<19	1,498	68,461	69,865
19≤C<22	1,878	60,821	62,163
22≤C<25	2,361	58,776	62,429
Amêndoas menos um pedaço			
	1,526	62,545	63,160
Amêndoa pela metade			
	1,125	55,674	54,979
Amêndoa com dano transversal			
	0,975	64,169	65,952
Amêndoa tipo miúdo			
	0,641	71,908	68,668

Tabela 14: Área Projetada - A_p (mm^2), Circularidade – Cr (%) e Esfericidade - ϕ (%) das faixas de tamanho dos fragmentos de cascas de coco catolé processado em máquina de limpeza e despeliculagem, sem polpa e fibras, após quebra manual

	A_p (mm^2)	Cr (%)	ϕ (%)
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal			
$27 \leq C < 32$	3,581	59,565	65,720
$32 \leq C < 37$	4,172	49,005	55,198
$C \geq 37$	4,181	37,398	49,522
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal			
$C < 30$	4,039	61,940	65,142
$30 \leq C < 35$	4,383	53,447	58,726
$C \geq 35$	5,182	45,780	51,463
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal			
$20 \leq C < 25$	2,920	70,004	73,017
$25 \leq C < 30$	3,238	59,580	65,583
$C \geq 30$	3,988	43,793	50,100
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal			
$C < 22$	2,322	49,510	63,824
$22 \leq C < 27$	2,687	71,339	66,073
$27 \leq C < 32$	3,305	48,854	54,823
$C \geq 32$	3,434	35,025	38,249
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal			
$15 \leq C < 20$	1,902	59,320	61,276
$20 \leq C < 25$	2,213	52,683	56,957
$C \geq 25$	2,778	37,298	41,867
1/2 da Casca com Quebra Transversal			
$C < 23$	2,947	75,869	78,195
$23 \leq C < 28$	2,890	58,142	63,606
3/8 da Casca com Quebra Transversal			
$22 \leq C < 27$	3,207	66,405	70,025
$C \geq 27$	3,919	62,745	66,563
1/4 da Casca com Quebra Transversal			
$C < 22$	2,571	69,400	72,504
$22 \leq C < 27$	2,832	59,390	65,492
Casca tipo miúdo			
	1,568	55,065	58,667

4.2 Projeto do equipamento de limpeza e despeliculagem

O coco catolé se constitui na fonte de renda de várias famílias do interior da Paraíba e Pernambuco, sendo suas amêndoas comercializadas em feiras livres. Para que ocorram melhorias no beneficiamento deste produto, é importante que se realize a remoção da mucilagem, despeliculagem e higienização do fruto antes do processamento, com posterior separação das amêndoas de cascas e/ou de amêndoas danificadas promovendo melhor qualidade ao produto tanto para consumo in natura quanto para produção de óleo.

Atualmente, os pequenos agricultores ao coletarem os frutos que caem ao chão, os colocam para secar ao sol, e posteriormente deixam os frutos de molho por alguns dias, para só então, prosseguir com a quebra manual. Esse trabalho leva algum tempo e é extremamente dependente das condições climáticas, pois a temperatura e a incidência dos raios solares, bem como a umidade relativa do ar irão determinar, por exemplo, o tempo de secagem do produto.

Para o desenvolvimento de uma máquina de limpeza e despeliculagem percebeu-se que seria necessário um equipamento que utilizasse água para lavar os frutos durante a remoção de sua polpa e fibras, visto que esses produtos chegavam das propriedades rurais com muitas sujidades, como lama, restos vegetais, e até mesmo fezes de animais como de bovinos. Percebeu-se com o estudo que esses frutos chegavam sujos devido à má condução da cultura, já que alguns produtores deixavam os cachos cair ao chão para coletá-los, o que não ocorria no momento exato da queda, além disso, muitos não armazenam os frutos em locais arejados e limpos, o que diminuía o seu tempo para utilização.

Neste sentido foi desenvolvido o equipamento para limpeza e despeliculagem do coco catolé. Para esse fim foram realizados estudos com equipamentos utilizados comercialmente para descasque de alho e batatas porém, devido às características do coco catolé, como a grande quantidade de mucilagem e suas fibras resistentes a remoção, bem como a grande quantidade de polpa de alta viscosidade que deveria ser removida, foram realizadas modificações com o intuito de adequar a metodologia para o beneficiamento deste produto.

O equipamento desenvolvido especificamente para este fruto, é constituído por uma unidade motorizada elétrica, equipada com motor elétrico de 1/2 HP, voltagem de 220 V, com consumo de energia de 0.46 kW/h.

O eixo central foi acoplado por um selo mecânico com pista de cerâmica para vedação de líquidos. O sistema de tração do disco era composto de um conjunto correia-polia para obtenção de uma velocidade de 340 RPM.

O gabinete de lavagem foi feito em chapa de aço inoxidável AISI 304, tampa em alumínio fundido com pintura epóxi e media 570 mm de altura, 375 mm de frente, 483 mm de fundo e pesava 45 kg. A estrutura de exaustão era composta de uma porta basculante para saída do produto e uma calha de escoamento de água e resíduos, terminada por um cano de 1,5". O perfil interno do equipamento pode ser observado por seu esquema técnico, apresentado na Figura 27.

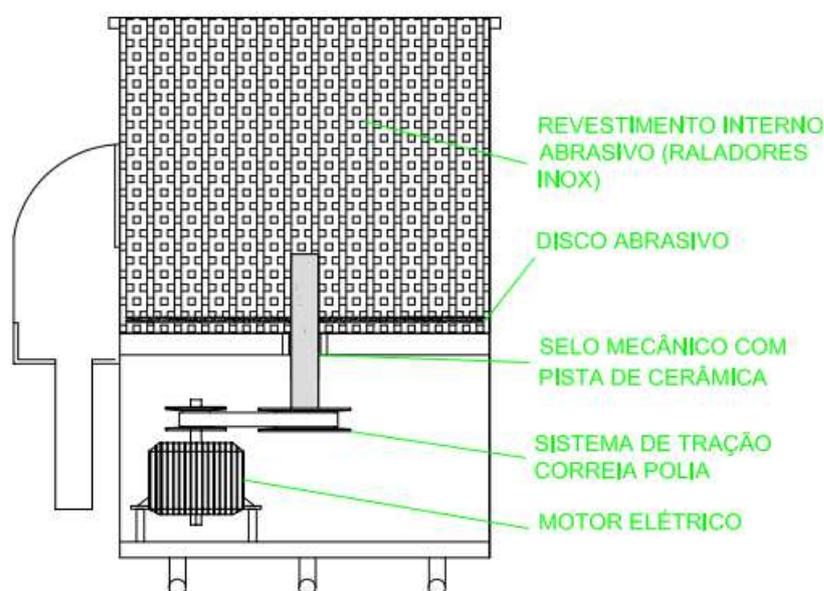


Figura 27: Esquema do equipamento de limpeza e despeliculagem de coco catolé. Vista interna

O disco abrasivo horizontal móvel para remoção da película do coco catolé e sua limpeza por atrito, foi feito em ferro fundido e ainda foram utilizados dois raladores em inox, instalados nas paredes do gabinete, internamente, para uma remoção maior, visto que após a montagem do equipamento e verificação do comportamento dos frutos em seu interior verificou-se que quando o motor era acionado, os frutos passavam em movimentos constantes por essas laterais e deslizavam, logo uma estrutura abrasiva nessa região aumentaria a eficiência do processo. Foi utilizada, ainda, uma estrutura de guia de fluxo, em aço inox, com duas aletas formando um ângulo de 45 graus com o disco horizontal, conforme desenho técnico (Figura 28).

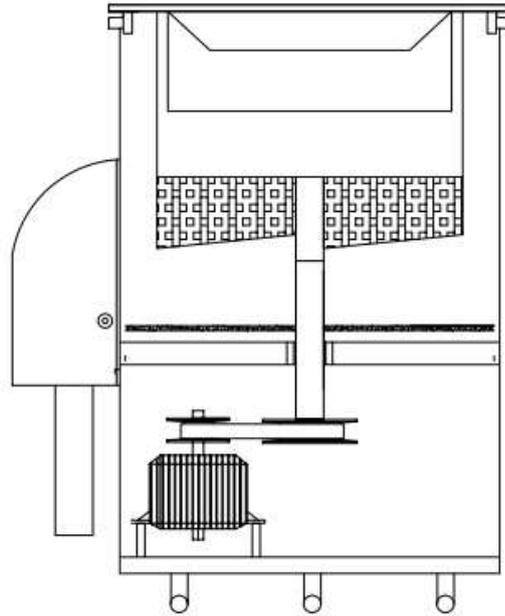


Figura 28: Vista lateral com tampa e aletas para guia de fluxo

Um tubo distribuidor de fluxo de água foi instalado ao redor da tampa, na parte inferior, e possuía bitola de 3/16" com furos de 2 mm em duas linhas ao longo do tubo para direcionamento do fluxo de água de lavagem do produto, sendo a bitola do cano de entrada de água de 0,5".

Para o acionamento do equipamento foi instalada uma chave liga/desliga em sua lateral, bem como uma chave seletora de tensão, conforme desenho técnico (Figura 29).

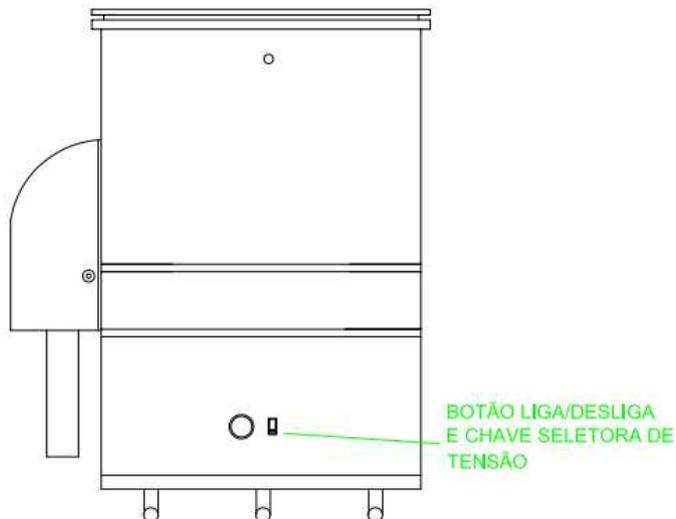


Figura 29: Vista lateral do equipamento de limpeza e despeliculagem de coco catolé

Foram realizados vários testes para a validação da eficiência do equipamento de limpeza e despeliculagem de coco catolé e após os ajustes necessários chegou-se a um equipamento com grande eficiência, sendo possível a limpeza e remoção total de polpas e fibras em tempos que variam de 15 a 25 minutos a depender da quantidade de coco catolé que se deseja processar por vez.

Nas Figuras 30 a 34, pode-se observar o equipamento desenvolvido, enquanto nas Figuras 35 a 37, se observa o resultado visual de higienização do coco catolé obtido com o projeto do equipamento discutido.



Figura 30: Equipamento de limpeza e despeliculagem



Figura 31: Vista lateral do equipamento



Figura 32: Gabinete de exaustão



Figura 33: Ralos e aletas



Figura 34: Disco abrasivo



Figura 35: Coco catolé retirado da planta-mãe, antes da higienização no equipamento



Figura 36: Coco catolé coletado no chão, antes da higienização no equipamento



Figura 37: Coco catolé após higienização no equipamento desenvolvido

No Apêndice B podem ser encontrados todos os desenhos técnicos do equipamento em maior escala (Figuras B.1, B.2, B.3, B.4 e B.5 – Apêndice B).

4.3 Remoção da casca, mucilagem, polpa e fibras

Os frutos maduros de coco catolé, assim como os de licuri, têm polpa amarela, viscosa e adocicada e suas sementes, quando secas, são de cor escura e de tegumento duro que reveste a amêndoa rica em óleo (DRUMOND, 2007). Essas características permitem o surgimento de micro-organismos, que aliados a um mau armazenamento reduzem a viabilidade do fruto e, conseqüentemente, da semente; desta forma, uma remoção adequada das sujidades e polpas permite que as sementes e suas amêndoas permaneçam viáveis por um período maior.

Para determinar qual seria o tempo de lavagem adequado, realizaram-se testes através dos quais foram avaliados os tempos onde, visualmente, ocorria uma grande remoção da polpa e das fibras. Percebeu-se que após 15 minutos de lavagem no equipamento os cocos-catolé já não possuíam mais polpa e grande parte das fibras já havia sido removida.

Após esta observação foi avaliado o grau de limpeza dos frutos quando os mesmos eram processados durante 15, 20 e 25 minutos. Aplicando o teste de Tukey ao nível de significância de 1% percebeu-se que os tempos de 20 e 25 minutos não diferiram significativamente entre si mas foram mais eficientes na remoção das fibras e polpa que o tempo de 15 minutos (Tabela 15 e 16), nas Figuras 38, 39 e 40 pode-se observar o resultado visual dos tempos de remoção das sujidades, polpas e fibras realizada pelo equipamento desenvolvido.

Tabela 15: Análise de variância dos tempos de lavagem de coco catolé em máquina de limpeza e despeliculagem

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tempo de Lavagem	2	2312,91779	1156,45889	15,5632**
Resíduo	12	891,68808	74,30734	
Total	14	3204,60587		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F.

Tabela 16: Média geral, coeficiente de variação e médias dos tratamentos, tempos de lavagem do coco catolé, submetidos ao teste de Tukey

Média de Tratamento	
1	227,8 a
2	204,8742 b
3	199,0258 b

dms = 14,53357

MG = 210.567 **CV% = 4.09**

Ponto Médio = 215,767



Figura 38: Coco catolé após 15 minutos de lavagem



Figura 39: Coco catolé após 20 minutos de lavagem



Figura 40: Coco catolé após 25 minutos de lavagem

Analisando a Tabela 17 percebe-se que após a lavagem a massa das amostras reduz em cerca de 3 vezes, o que mostra que a maior parte da massa do fruto está em sua polpa.

Tabela 17: Massa das amostras antes e após a lavagem na máquina de limpeza e despeliculagem

Repetições	Amostra antes da lavagem (g)			Amostra após lavagem (g)		
	15 min	20 min	25 min	15 min	20 min	25 min
R1	680,233	682,386	680,608	244,534	200,885	199,009
R2	677,685	680,004	682,337	227	207,3	213,07
R3	681,046	680,998	676,785	224,007	211,854	200,98
R4	684,188	683,215	676,776	227,8	201	187
R5	680,774	682,099	674,008	215,659	203,332	195,07
Média	680,7852	681,7404	678,103	227,8	204,8742	199,026
Desvio Padrão	2,3218	1,2536	3,3342	10,5173	4,6878	9,5043

Após o processo de higienização também foi realizada a remoção das fibras que não foram removidas pelo equipamento de limpeza e despeliculagem, a fim de se obter a quantidade de matéria seca remanescente que não tinha sido removida. Para o tempo de lavagem de 15 min 139,5g de fibras não foram removidas, enquanto que para os tempos de 20 e 25 min a quantidade de fibra presente nos frutos foi de 23,279g e 21,531g respectivamente.

4.4 Estudo dos esforços de compressão

A partir do estudo dos esforços de compressão (Figura 41) realizados na Máquina Universal de Ensaio pôde-se obter os resultados apresentados nas Tabelas 18 e 19, para compressão, no sentido do maior eixo do produto e compressão no sentido do menor eixo (perpendicular ao maior eixo do produto), respectivamente.

Tabela 18: Estudo dos esforços de compressão para o coco catolé no sentido longitudinal (sentido do seu maior diâmetro)

Amostra	a (mm)	b (mm)	Máxima Força (kN)	Máxima Tensão (kPa)	Máxima Deformação (%)
A	29,32	19,08	6,525	22821	5,56958
B	27,87	21,61	7,01563	19127,9	4,88698
C	26,33	21,53	1,7875	4909,85	2,38131
D	26,94	20,39	5,11562	15666,6	6,45137
E	21,85	27,2	5,73438	9868,67	5,90847
F	27,86	20,2	5,28438	16489,3	6,49497
G	26,9	18,12	7,00938	27181,5	5,94796
H	27,6	21,46	3,70937	10255,4	4,16304
I	29,56	20,05	5,64063	17865,2	5,02368
K	30,67	19,84	3,92188	12685,9	5,42387
L	30,12	18,81	2,96563	10672,1	5,10956
M	30,2	19,47	2,3625	7935,06	2,88411
N	28	18,9	5,55625	19804,7	5,81071
O	30,12	19,83	4,51563	14621,2	3,98738
P	28,87	21,05	4,0375	11601,6	3,66124
Q	27,18	21,41	6,11875	16995,7	4,77557
R	26,67	19,85	5,20625	16823,4	4,75066
S	19,6	25,63	5,60938	18591,4	5,63012
T	27,09	19,1	2,69688	9412,49	4,20266
U	30,12	19,83	4,51563	14621,2	3,98738
Média	27,51	20,71	4,78	14912,05	4,90
Desvio Padrão	2,7724	2,2660	1,5497	5518,54	1,1316

Tabela 19: Estudo dos esforços de compressão para o coco catolé no sentido transversal (sentido do seu menor diâmetro)

Amostra	a (mm)	b (mm)	Máxima Força (kN)	Máxima Tensão (kPa)	Máxima Deformação (%)
A1	29,29	19,36	3,56875	12123,2	3,91943
B1	26,18	20,09	2,93438	9256,91	5,03438
C1	25,04	19,37	3,3	11198,6	4,89617
D1	26,3	18,36	2,43438	9195,01	3,26996
E1	28,48	18,89	3,04063	10849,5	3,47612
F1	24,6	20,52	3,34375	10110,9	3,74797
G1	25,48	18,33	2,86875	10871,2	4,28571
H1	30,47	19,26	2,7875	9567,81	3,18346
I1	26,22	20,28	3,16875	9809,85	4,22197
K1	28,97	20,45	3,23125	9837,71	4,53573
L1	30,72	19,8	3,1625	10270,9	3,26172
M1	24,02	18,88	2,67188	9543,82	4,26728
N1	30,46	19,16	3,21563	11152,8	3,95272
O1	30,19	19,07	2,31562	8107,31	6,31335
P1	25,15	18,03	2,61562	10244,6	4,54274
Q1	25,63	19,52	2,63125	8792,51	4,04604
R1	29,01	17,97	3,2375	12765,1	3,99517
S1	28,72	18,71	3,16875	11525,3	6,08287
T1	27,86	18,35	1,56875	5931,87	3,24659
U1	29,68	18,83	2,82188	10133,2	3,63881
Média	27,6235	19,1615	2,9044	10064,40	4,1959
Desvio Padrão	2,2284	0,7751	0,4540	1487,750	0,8697

Ao comparar os dois sentidos de compressão, ou seja, longitudinal e transversal ao maior eixo do produto verificou-se que os dois diferiram significativamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade (Tabelas 20 e 21), sendo o sentido transversal ao maior eixo do produto menos resistente à ruptura.

Tabela 20: Análise de variância do sentido de quebra, se longitudinal ou transversal ao maior eixo do produto, de coco catolé em máquina de ensaio

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Sentido de Quebra	1	2335888944171,00	233588894417,00	15,0368**
Resíduo	38	5903119094196,00	155345239321,00	
Total	39	8239008038367,00		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F.

Tabela 21: Média geral, coeficiente de variação e médias dos tratamentos, sentido de quebra do coco catolé, submetidos ao teste de Tukey

Médias de tratamentos	
1	14897,51 a
2	10064,41 b
dms = 2524,75	
MG = 12480,95675	CV% = 31.58
Ponto médio = 16045,675	



Figura 41: Ensaio de compressão de coco catolé

O estudo dos esforços mecânicos se faz importante para caracterizar o material e permitir o dimensionamento de equipamentos que têm o objetivo de, por exemplo, realizar a quebra dos materiais. Além de determinar a força mínima necessária que o equipamento deve fornecer para a quebra do produto, esses dados demonstrarão também o comportamento do produto estudado quando submetido a uma carga.

Pela análise do Gráfico Força x Deslocamento obtido para a compressão do coco catolé (Figura 42) pôde-se verificar que o produto estudado tem o comportamento sugerido por BOURNE (2002), para produtos rígidos, como frutos, vegetais verdes e ovos (Figura 6). Esses produtos obedecem à lei de Hooke, que estabelece que a deformação de um corpo é diretamente proporcional à força nele aplicada (WHITE, 2011). O ponto em que o gráfico cai bruscamente, indica o momento em que o coco catolé rompeu, indicando que sua força de ruptura foi de 3,6 kN.

Quanto ao comportamento mecânico, Persson (1987) levantou a hipótese de que a ruptura de um 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 à fibra.

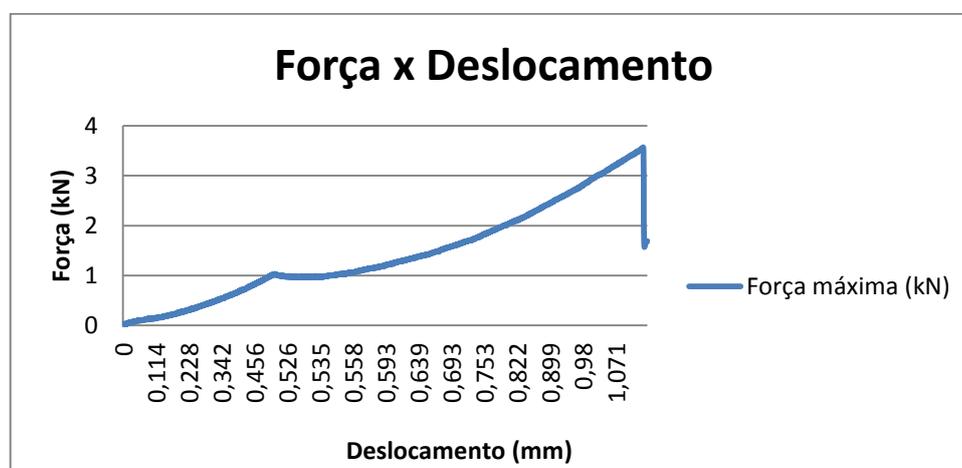


Figura 42: Gráfico Força x Deslocamento para força aplicada no sentido transversal

Em estudos com castanha de caju, Araújo & Ferraz (2008), afirmaram ser fundamental o conhecimento de algumas características no desenvolvimento de processos de decorticação por compressão, como a intensidade da força aplicada, a fragilidade da casca, a rigidez da amêndoa e a deformação total imposta no momento da decorticação, uma vez que o espaço existente entre a “casca” e a amêndoa é, via de regra, muito reduzido.

4.5 Desenvolvimento de equipamento para extração das amêndoas

A partir das observações feitas durante a quebra manual do cococatolé e do seu comportamento no teste de compressão realizado em máquina universal de ensaios construiu-se um protótipo, por acionamento elétrico, para quebra no sentido do menor eixo do produto.

Até o momento, porém, os resultados obtidos não foram satisfatórios no que se refere à obtenção de amêndoas inteiras, e livres de danos, visto que o equipamento está esmagando o coco catolé em sua totalidade.

Serão necessários estudos mais aprofundados e vários testes para identificar se a hipótese levantada de que a distância entre as placas e sua posição quanto ao grau de inclinação deve ser ajustada, e então realizar os ajustes necessários para uma quebra eficiente.

4.6 Dados da velocidade terminal das partículas obtidas com a quebra e classificadas por categorias

Velocidade terminal obtida pelo Método 1

O cálculo da velocidade terminal teórica calculada pelo Método 1, se baseia no número de Reynolds da partícula e no seu coeficiente de arrasto. Os valores de N_R^2 , podem ser obtidos em gráficos de CN_R^2 em função de N_R (MOHSEIN, 1986); desta forma, os cálculos da velocidade terminal são realizados por meio das Equações (39) e (40).

Para amêndoas, tanto inteiras como danificadas, foram realizadas comparações dessas partículas com uma esfera utilizando o gráfico (Figura 21) e para as cascas realizou-se a comparação dos fragmentos com discos (Figura 22), gráficos estes propostos por (MOHSEIN, 1986).

As Tabelas 22 e 23 apresentam os valores obtidos para o número de Reynolds, coeficiente de arrasto e velocidade terminal teórica calculada pelo Método 1 para amêndoas e cascas, respectivamente.

Os valores de velocidade terminal obtidos pelo método 1 para amêndoas foram maiores que os obtidos para cascas, assim como o número de Reynolds.

No que diz respeito ao número de Reynolds, para amêndoas inteiras esse valor variou de 14850 a 18000, enquanto para fragmentos de cascas, que possuem forma, tamanho e massa diversificadas, esta variação foi de 5351 a 11000.

Tabela 22: Número de Reynolds, Coeficiente de Arrasto e Velocidade Terminal Teórica obtida pelo Método 1 para amêndoas

Classe	N_R	C_D	V_t (m/s)
Amêndoa inteira $16 < C < 19$ mm	14850	0,508	16,258
Amêndoa inteira $19 \leq C < 22$ mm	17150	0,444	17,372
Amêndoa inteira $22 \leq C < 25$ mm	18000	0,469	17,108
Amêndoa Danificada - dano transversal	12200	0,357	16,945
Amêndoa menos um pedaço	14666	0,382	17,023
Amêndoa pela metade	10366	0,37	16,34
Amêndoa tipo miúdo	7333	0,377	15,004

Tabela 23: Número de Reynolds, Coeficiente de Arrasto e Velocidade Terminal Teórica obtida pelo Método 1 para cascas

Classe	N_R	C_D	V_1 (m/s)
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal			
$27 \leq C < 32$	9964	2,805	7,289
$32 \leq C < 37$	10750	2,888	7,641
$C \geq 37$	12510	2,711	8,617
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal			
$C < 30$	8860	2,783	7,714
$30 \leq C < 35$	9550	2,748	7,798
$C \geq 35$	11000	2,748	8,511
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal			
$20 \leq C < 25$	7160	3,129	6,719
$25 \leq C < 30$	8240	2,758	7,485
$C \geq 30$	10010	2,665	7,899
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal			
$C < 22$	7140	2,611	7,483
$22 \leq C < 27$	7880	2,886	7,615
$27 \leq C < 32$	7640	2,923	7,846
$C \geq 32$	7750	2,866	7,990
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal			
$15 \leq C < 20$	5830	2,690	6,891
$20 \leq C < 25$	5950	2,903	6,931
$C \geq 25$	6620	3,011	7,291
1/2 da Casca com Quebra Transversal			
$C < 23$	9580	2,781	7,402
$23 \leq C < 28$	10000	2,987	7,282
3/8 da Casca com Quebra Transversal			
$22 \leq C < 27$	9000	2,792	7,772
$C \geq 27$	9375	2,764	7,990
1/4 da Casca com Quebra Transversal			
$C < 22$	7010	2,835	7,281
$22 \leq C < 27$	7640	2,933	7,313
Casca tipo miúdo			
	5351	2,632	6,873

Velocidade terminal obtida pelo Método 2

O cálculo da velocidade terminal teórica calculada pelo Método 2, partiu do princípio de que as amêndoas e cascas avaliadas possuíam forma esférica. Este método é baseado na tentativa e erro, cujo primeiro valor chutado foi o da velocidade obtida experimentalmente; assim, este método levou em consideração o número de Reynolds para

se determinar o regime de escoamento e então se obter, no gráfico apresentado na Figura 23 o valor do coeficiente de arrasto. A partir deste coeficiente de arrasto, obteve-se uma nova velocidade terminal pela Equação 41 e, visualmente, determinou-se se o valor proposto inicialmente era próximo do obtido pela equação. Após a aplicação deste método, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 24 e 25, para amêndoas e cascas, respectivamente.

Tabela 24: Velocidade Terminal teórica obtida pelo Método 2 para amêndoas inteiras e danificadas

Classe	$V_2(\text{m/s})$
Amêndoa inteira $16 < C < 19\text{mm}$	16,140
Amêndoa inteira $19 \leq C < 22\text{mm}$	16,669
Amêndoa inteira $22 \leq C < 25\text{mm}$	17,227
Amêndoa Danificada - dano transversal	16,511
Amêndoa menos um pedaço	15,213
Amêndoa pela metade	14,893
Amêndoa tipo miúdo	13,234

Tabela 25: Velocidade Terminal teórica obtida pelo Método 2 para cascas

Classe	V_2 (m/s)
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal	
$27 \leq C < 32$	22,439
$32 \leq C < 37$	22,802
$C \geq 37$	23,413
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal	
$C < 30$	20,701
$30 \leq C < 35$	21,191
$C \geq 35$	22,004
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal	
$20 \leq C < 25$	21,365
$25 \leq C < 30$	20,452
$C \geq 30$	21,763
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal	
$C < 22$	20,335
$22 \leq C < 27$	20,761
$27 \leq C < 32$	19,294
$C \geq 32$	18,878
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal	
$15 \leq C < 20$	21,26696
$20 \leq C < 25$	21,11275
$C \geq 25$	17,98342
1/2 da Casca com Quebra Transversal	
$C < 23$	23,824
$23 \leq C < 28$	24,225
3/8 da Casca com Quebra Transversal	
$22 \leq C < 27$	22,290
$C \geq 27$	21,091
1/4 da Casca com Quebra Transversal	
$C < 22$	20,365
$22 \leq C < 27$	21,799
Casca tipo miúdo	
	17,993

Velocidade terminal obtida pelo Método 3

O cálculo da velocidade terminal teórica calculada pelo Método 3 leva em consideração que a corrente é turbulenta numa região onde $10^3 < N_R < 2 \times 10^5$ sendo o coeficiente de arraste (C_D) de aproximadamente 0,44 (LAPPLE, 1956), para esferas. Já para cascas de forma semicircular com o fluxo de ar em contato com sua parte externa, o

C_D é de 1,1 para o regime turbulento, os quais foram utilizados na Equação 41, obtendo-se os dados contidos nas Tabelas 26 e 27 para amêndoas e cascas, respectivamente.

Tabela 26: Velocidade Terminal teórica obtida pelo Método 3 para amêndoas inteiras e danificadas

Classe	V_3 (m/s)	$C_{D\text{ esferas}}$
Amêndoa inteira $16 < C < 19$ mm	17,192	0,44
Amêndoa inteira $19 \leq C < 22$ mm	17,745	0,44
Amêndoa inteira $22 \leq C < 25$ mm	18,267	0,44
Amêndoa Danificada - dano transversal	15,844	0,44
Amêndoa menos um pedaço	16,199	0,44
Amêndoa pela metade	15,835	0,44
Amêndoa tipo miúdo	13,922	0,44

Tabela 27: Velocidade Terminal teórica obtida pelo Método 3 para cascas

Classe	V_3 (m/s)	$C_{D\text{ cascas}}$
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal		
$27 \leq C < 32$	16,569	1,1
$32 \leq C < 37$	16,829	1,1
$C \geq 37$	17,284	1,1
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal		
$C < 30$	15,157	1,1
$30 \leq C < 35$	15,647	1,1
$C \geq 35$	16,248	1,1
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal		
$20 \leq C < 25$	14,683	1,1
$25 \leq C < 30$	14,848	1,1
$C \geq 30$	16,068	1,1
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal		
$C < 22$	13,694	1,1
$22 \leq C < 27$	14,248	1,1
$27 \leq C < 32$	14,113	1,1
$C \geq 32$	13,935	1,1
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal		
$15 \leq C < 20$	13,125	1,1
$20 \leq C < 25$	13,032	1,1
$C \geq 25$	13,263	1,1
1/2 da Casca com Quebra Transversal		
$C < 23$	16,221	1,1
$23 \leq C < 28$	16,653	1,1
3/8 da Casca com Quebra Transversal		
$22 \leq C < 27$	15,298	1,1
$C \geq 27$	15,178	1,1
1/4 da Casca com Quebra Transversal		
$C < 22$	13,714	1,1
$22 \leq C < 27$	14,720	1,1
Casca tipo miúdo		
	12,113	1,1

Velocidade terminal obtida pelo Método 4

O cálculo da velocidade terminal teórica calculada pelo Método 4, leva em consideração a esfericidade, φ , de cada partícula; só então foi utilizada a Equação 42, de PETTYJONH e CHRISTIANSEN (1948) para correção do coeficiente de arrasto e em seguida foi utilizada a Equação 41 para o cálculo da velocidade terminal. Os dados obtidos para a velocidade terminal teórica pelo método 4, estão contidos nas Tabelas 28 e 29 para amêndoas e cascas, respectivamente.

Tabela 28: Dados de Coeficiente de Arrasto (C_D), Esfericidade (φ (%)), Coeficiente de Arrasto Corrigido pela esfericidade da partícula e Velocidade Terminal teórica pelo Método 4

Classe	C_D	φ(%)	$C_{D\text{corrigido}}$	V_4(m/s)
Amêndoa inteira $16 < C < 19$ mm	0,508	69,86	1,901	8,319
Amêndoa inteira $19 \leq C < 22$ mm	0,444	62,16	2,276	7,843
Amêndoa inteira $22 \leq C < 25$ mm	0,470	62,43	2,263	8,07718
Amêndoa Danificada - dano transversal	0,357	65,95	2,092	7,319
Amêndoa menos um pedaço	0,382	63,16	2,228	7,238
Amêndoa pela metade	0,370	54,98	2,627	6,518
Amêndoa tipo miúdo	0,377	68,67	1,959	6,641

Tabela 29: Dados de Coeficiente de Arrasto (C_D), Esfericidade (φ (%)), Coeficiente de Arrasto Corrigido pela esfericidade da partícula e Velocidade Terminal teórica pelo Método 4

Classe	C_D	φ (%)	$C_{D\text{corrigido}}$	V_4 (m/s)
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal				
$27 \leq C < 32$	2,805	65,72	2,103	13,6626
$32 \leq C < 37$	2,888	55,2	2,616	13,347
$C \geq 37$	2,711	49,52	2,893	13,7697
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal				
$C < 30$	2,783	65,14	2,131	13,7857
$30 \leq C < 35$	2,748	58,73	2,444	13,6262
$C \geq 35$	2,748	51,46	2,799	13,9405
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal				
$20 \leq C < 25$	3,129	73,02	1,747	13,8018
$25 \leq C < 30$	2,758	65,58	2,110	13,2689
$C \geq 30$	2,665	50,1	2,865	13,0653
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal				
$C < 22$	2,611	63,82	2,195	12,472
$22 \leq C < 27$	2,886	66,07	2,086	12,327
$27 \leq C < 32$	2,923	54,82	2,635	12,544
$C \geq 32$	2,866	38,25	3,443	12,012
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal				
$15 \leq C < 20$	2,690	61,28	2,320	11,365
$20 \leq C < 25$	2,903	56,96	2,531	11,364
$C \geq 25$	3,011	41,87	3,267	11,408
1/2 da Casca com Quebra Transversal				
$C < 23$	2,781	78,2	1,494	14,393
$23 \leq C < 28$	2,987	63,61	2,206	12,081
3/8 da Casca com Quebra Transversal				
$22 \leq C < 27$	2,792	70,02	1,893	11,860
$C \geq 27$	2,764	66,56	2,062	11,1666
1/4 da Casca com Quebra Transversal				
$C < 22$	2,835	72,5	1,772	10,953
$22 \leq C < 27$	2,933	65,49	2,114	10,832
Casca tipo miúdo				
	2,632	58,67	2,447	8,267

Pela análise das Tabelas 28 e 29 pode-se observar que a velocidade terminal pelo método 4 obtida para cascas foi maior que as obtidas para amêndoas; isto se deve às características físicas das partículas, o que faz com que as cascas tenham maior coeficiente de arrasto e maior velocidade terminal.

Velocidade terminal experimental

A Tabela 30 contém os valores da velocidade terminal experimental obtida colocando-se as amêndoas e fragmentos de casca em um fluxo de ar ascendente, esta velocidade foi obtida pelo uso de um anemômetro digital que também fornecia a temperatura do ambiente.

A partir da análise da Tabela 27 pode-se observar que os maiores valores de velocidade terminal são para as amêndoas inteiras, já que estas possuem maiores valores de massa quando comparadas com as amêndoas danificadas, conforme a Tabela 9.

Tabela 30: Dados de velocidade terminal experimental e temperatura ambiente durante a coleta dos dados para amêndoas

Classe	V _{exp} (m/s)	T (°C)
Amêndoa inteira 16<C<19mm	14,275	26,92
Amêndoa inteira 19≤C<22mm	14,53	27,42
Amêndoa inteira 22≤C<25mm	14,545	26,63
Amêndoa Danificada - dano transversal	11	29,64
Amêndoa menos um pedaço	11,3	27,81
Amêndoa pela metade	9,687	28,33
Amêndoa tipo miúdo	8,933	28,59

A Tabela 31 possui os dados de velocidade terminal experimental para os fragmentos de casca do coco catolé.

Tabela 31: Dados de velocidade terminal experimental e temperatura ambiente durante a coleta dos dados para cascas

Classe	V _{exp} (m/s)	T (°C)
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal		
27≤C<32	12,220	28,58
32≤C<37	12,473	28,60
C≥37	12,608	28,98
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal		
C<30	12,14	27,76
30≤C<35	12,74	28,35
C≥35	12,75	28,84
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal		
20≤C<25	11,195	28,92
25≤C<30	11,560	28,50
C≥30	11,787	28,77
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal		
C<22	11,478	28,87
22≤C<27	12,080	29,44
27≤C<32	10,436	29,33
C≥32	10,276	29,05
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal		
15≤C<20	10,736	29,26
20≤C<25	10,268	29,42
C≥25	9,948	29,26
1/2 da Casca com Quebra Transversal		
C<23	12,400	26,43
23≤C<28	12,470	27,11
3/8 da Casca com Quebra Transversal		
22≤C<27	12,030	27,40
C≥27	12,338	27,16
1/4 da Casca com Quebra Transversal		
C<22	11,830	26,94
22≤C<27	11,680	26,86
Casca tipo miúdo		
	10,049	26,89

Ao correlacionar a velocidade terminal experimental com o volume das amêndoas inteiras, obteve-se uma correlação positiva (Coeficiente de correlação de 0,5727), conforme Tabela A.4 (Apêndice A).

Pela análise das Tabelas 30 e 31 pode-se observar que uma velocidade de fluxo de ar de 13,5m/s promoveria a separação dos fragmentos de cascas e amêndoas danificadas,

das amêndoas classificadas como inteiras. Essa separação é possível devido ao fato da maior velocidade terminal experimental obtida para os fragmentos de casca ser de 12,6 m/s, enquanto a velocidade terminal experimental obtida para as amêndoas de interesse (amêndoas sem danos) foi acima de 14,2 m/s.

Com o intuito de representar cada classe de cascas e as sementes inteiras e danificadas em curvas de tempo x deslocamento, e visto que a velocidade terminal experimental, dentro de uma mesma classe não apresentou grandes variações, calculou-se a média destas (Tabelas 30 e 31) e segundo a equação $y = v.t$, sendo y o deslocamento, v a velocidade e t o tempo, montaram-se as curvas apresentadas na Figura 43.

Pela análise da Figura 43 pode-se concluir que a máxima velocidade terminal experimental encontrada, foi para amêndoas inteiras, cerca de 13,2% maior do que a classe com velocidade terminal mais próxima, que foi a de 1/2 de cascas com quebra longitudinal (1/2 longitudinal).

Com esta observação conclui-se que a separação dessa categoria (amêndoas inteiras) das demais é obtida facilmente. Ainda com base na Figura 43 verifica-se que a utilização apenas de fluxo de ar, como método de separação, não torna possível a separação das demais categorias, sobretudo no que diz respeito à separação das amêndoas danificadas dos fragmentos de cascas.

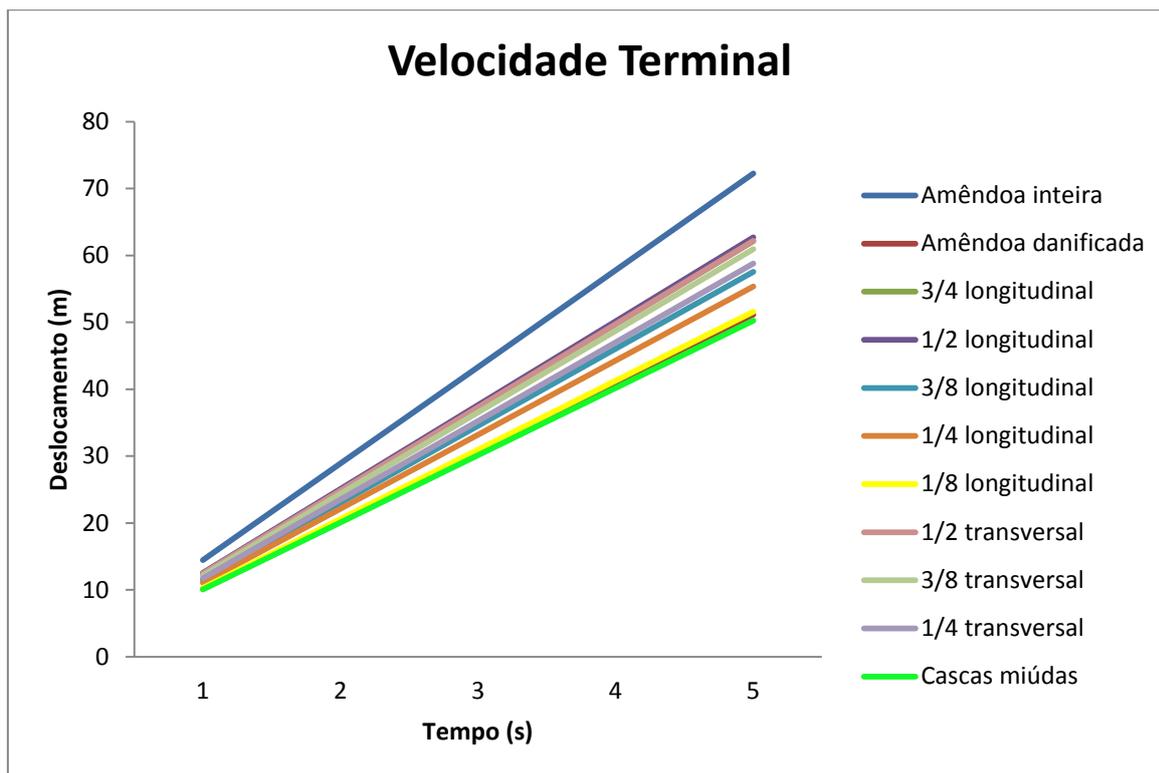


Figura 43: Gráfico tempo x deslocamento para as diversas classes (segundo a parte correspondente do todo) de cascas e amêndoas segundo o sentido de quebra

Comparativo entre as velocidades terminal teóricas e experimental para amêndoas e cascas

As Tabelas 32 e 33 contêm os dados de velocidade terminal teórica, calculadas pelos Métodos 1, 2, 3 e 4, e velocidade terminal experimental para amêndoas e cascas, respectivamente.

Tabela 32: Dados de velocidades terminal experimental (V_{exp}) e teóricas (V_t) das amêndoas inteiras e danificadas

Classe	$V_{exp}(m/s)$	$V_{t1}(m/s)$	$V_{t2}(m/s)$	$V_{t3}(m/s)$	$V_{t4}(m/s)$
Amêndoa inteira $16 < C < 19mm$	14,275	16,258	16,140	17,192	8,319
Amêndoa inteira $19 \leq C < 22mm$	14,530	17,372	16,669	17,745	7,843
Amêndoa inteira $22 \leq C < 25mm$	14,545	17,108	17,227	18,267	8,077
Amêndoa Danificada - dano transversal	11	16,945	16,511	15,844	7,319
Amêndoa menos um pedaço	11,3	17,023	15,213	16,199	7,238
Amêndoa pela metade	9,687	16,34	14,893	15,835	6,518
Amêndoa tipo miúdo	8,933	15,004	13,234	13,922	6,641

Tabela 33: Dados de velocidades terminal experimental (V_{exp}) e teóricas (V_t) das cascas

Classe	V_{exp} (m/s)	V_{t1} (m/s)	V_{t2} (m/s)	V_{t3} (m/s)	V_{t4} (m/s)
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal					
$27 \leq C < 32$	12,220	7,289	22,439	16,569	13,663
$32 \leq C < 37$	12,473	7,641	22,802	16,829	13,347
$C \geq 37$	12,608	8,617	23,413	17,284	13,770
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal					
$C < 30$	12,14	7,714	20,701	15,157	13,786
$30 \leq C < 35$	12,74	7,798	21,191	15,647	13,626
$C \geq 35$	12,75	8,511	22,004	16,248	13,94
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal					
$20 \leq C < 25$	11,195	6,719	21,365	14,683	13,802
$25 \leq C < 30$	11,560	7,485	20,452	14,848	13,269
$C \geq 30$	11,787	7,899	21,763	16,068	13,065
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal					
$C < 22$	11,478	7,483	20,335	13,694	12,472
$22 \leq C < 27$	12,080	7,615	20,761	14,248	12,327
$27 \leq C < 32$	10,436	7,846	19,294	14,113	12,544
$C \geq 32$	10,276	7,990	18,878	13,935	12,012
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal					
$15 \leq C < 20$	10,74	6,891	21,27	13,125	11,365
$20 \leq C < 25$	10,27	6,931	21,11	13,032	11,364
$C \geq 25$	9,948	7,291	17,98	13,263	11,408
1/2 da Casca com Quebra Transversal					
$C < 23$	12,400	7,402	23,824	16,221	14,393
$23 \leq C < 28$	12,470	7,282	24,225	16,653	12,081
3/8 da Casca com Quebra Transversal					
$22 \leq C < 27$	12,030	7,772	22,290	15,298	11,860
$C \geq 27$	12,338	7,990	21,091	15,178	11,167
1/4 da Casca com Quebra Transversal					
$C < 22$	11,830	7,281	20,365	13,714	10,953
$22 \leq C < 27$	11,680	7,313	21,799	14,720	10,832
Casca tipo miúdo					
	10,049	6,873	17,993	12,113	8,267

Analisando a Tabela 32, para amêndoas, verifica-se que o coeficiente de arrasto, após correção utilizando-se o fator de esfericidade, apresentou valor crescente com o aumento do comprimento, ou seja, apresentou influência direta da forma visto que à medida que o comprimento cresce a esfericidade do produto diminui e aumenta o coeficiente de arrasto. Este fato também foi observado por Bogaczynki et al. (1975) e Santana & Braga (1999) para amendoim.

Para as amêndoas danificadas os valores do coeficiente de arrasto variaram de 1,959 a 2,627, porém não foi possível verificar relação deste coeficiente com o tamanho, devido as suas formas serem muito irregulares. Santana & Braga (1999) ao estudarem os parâmetros aerodinâmicos do amendoim também obtiveram resultado semelhante em relação ao coeficiente de arrasto para as sementes danificadas.

Pela análise de variância (Tabela 34) entre as cinco velocidades terminais, ou seja, velocidade experimental, teórica calculada pelo Método 1 (V_{t1}), teórica calculada pelo método 2 (V_{t2}), teórica calculada pelo Método 3 e teórica calculada pelo Método 4 (V_{t4}), para amêndoas inteiras, pode-se avaliar que as velocidades diferiram significativamente, ao nível de 1% de probabilidade, sendo apenas as obtidas pelo método 1 e 2 (V_{t1} e V_{t2}) iguais. Sendo que, as velocidades teóricas 1 e 2 também foram aquelas que se apresentaram mais próximas da velocidade obtida experimentalmente.

Tabela 34: Análise de variância das velocidades experimental e teóricas de amêndoas de coco catolé

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Velocidade	4	3713,29	928,32	1817,7697**
Resíduo	295	150,65	0,51	
Total	299	3863,94		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F.

De um modo geral, no que se refere às amêndoas inteiras de coco catolé, as velocidades teóricas calculadas pelos métodos 1, 2 e 3 apresentaram valores maiores que aqueles obtidos experimentalmente, já o método 4, forneceu valores teóricos de velocidade terminal mais baixos que os valores experimentais. Dados semelhantes foram obtidos por Santana & Braga (1999), para amendoim da variedade L7. Enquanto para fragmentos de casca as velocidades teóricas calculadas pelos métodos 2, 3 e 4 foram as que apresentaram valores mais elevados que os das velocidades obtidas experimentalmente, sendo a calculada pelo método 1 de valor mais baixo.

Para amêndoas danificadas a velocidade terminal teórica calculada pelo método 4 foi a que mais se aproximou da velocidade experimental obtida para esta classe. Esse método leva em consideração a correção do coeficiente de arrasto pela esfericidade da partícula (PETTYJONH & CHRISTIANSEN, 1948).

Pela análise da Tabela 33, pode-se observar que os valores encontrados para a velocidade teórica pelo método 4 foram bastante próximos daqueles obtidos experimentalmente para os fragmentos de cascas. O método 1, que leva em consideração o número de Reynolds apresentou valores muito baixos e os métodos 2 e 3 muito altos quando comparados com a velocidade obtida experimentalmente.

Comparativo entre os coeficientes de arrasto em função de Reynolds, corrigido pela esfericidade da partícula e calculado em função da velocidade terminal experimental para amêndoas e cascas

As Tabelas 35 e 36 contêm os valores para os coeficientes de arrasto obtidos em função do número de Reynolds da partícula, os coeficientes de arrasto corrigidos pela esfericidade de cada partícula e o coeficiente de arrasto calculado a partir da velocidade obtida experimentalmente.

O coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds da partícula foi obtido através do gráfico $N_R \times CN_R^2$ (Figura 21, para amêndoas e Figura 22, para cascas) e das Equações 39 e 40 o coeficiente de arrasto corrigido foi calculado pela Equação 42 e o coeficiente de arrasto calculado em função da velocidade terminal experimental foi determinado pela Equação 41.

Pela análise das Tabelas 35 e 36 pode-se observar que os coeficientes de arrasto diferem entre si, inclusive o coeficiente de arrasto real, em relação aos coeficientes de arrasto em função de Reynolds e da esfericidade da partícula, devido ao fato das fórmulas matemáticas utilizadas serem características para corpos uniformes e não para produtos biológicos, os quais por possuírem elevada diversidade de formas e tamanhos requerem equações de cálculo da velocidade terminal e coeficiente de arrasto mais específicas, necessitando de maiores estudos na área.

Ainda pelo estudo da Tabela 35 tem-se que, tal como o coeficiente de arrasto obtido em função de Reynolds, o calculado em função da velocidade terminal experimental apresentou valores mais baixos para amêndoas em comparação com os coeficientes de arrasto para cascas, o que demonstra que a força de arrasto que atua sobre as cascas é superior àquela que o fluido exerce sobre as amêndoas.

Tabela 35: Coeficientes de arrasto calculados em função do número de Reynolds (C_D), corrigido em função da esfericidade ($C_{D\text{corrigido}}$) e calculado ($C_{D\text{calculado}}$) a partir da velocidade terminal experimental para amêndoas

Classe	C_D	$C_{D\text{corrigido}}$	$C_{D\text{calculado}}$
Amêndoa inteira $16 < C < 19\text{mm}$	0,508	1,901	0,639
Amêndoa inteira $19 \leq C < 22\text{mm}$	0,444	2,276	0,658
Amêndoa inteira $22 \leq C < 25\text{mm}$	0,470	2,263	0,696
Amêndoa Danificada - dano transversal	0,357	2,092	0,924
Amêndoa menos um pedaço	0,382	2,228	0,907
Amêndoa pela metade	0,370	2,627	1,177
Amêndoa tipo miúdo	0,377	1,959	1,076

Tabela 36: Coeficientes de arrasto calculados em função do número de Reynolds (C_D), corrigido em função da esfericidade ($C_{D\text{corrigido}}$) e calculado ($C_{D\text{calculado}}$) a partir da velocidade terminal experimental para cascas

Classe	C_D	$C_{D\text{corrigido}}$	$C_{D\text{calculado}}$
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal			
$27 \leq C < 32$	2,805	2,103	1,729
$32 \leq C < 37$	2,888	2,616	1,719
$C \geq 37$	2,711	2,893	1,777
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal			
$C < 30$	2,783	2,131	1,715
$30 \leq C < 35$	2,748	2,444	1,662
$C \geq 35$	2,748	2,799	1,787
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal			
$20 \leq C < 25$	3,129	1,747	1,894
$25 \leq C < 30$	2,758	2,110	1,816
$C \geq 30$	2,665	2,865	2,046
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal			
$C < 22$	2,611	2,195	1,570
$22 \leq C < 27$	2,886	2,086	1,536
$27 \leq C < 32$	2,923	2,635	2,017
$C \geq 32$	2,866	3,443	2,026
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal			
$15 \leq C < 20$	2,690	2,320	1,649
$20 \leq C < 25$	2,903	2,531	1,776
$C \geq 25$	3,011	3,267	1,961
1/2 da Casca com Quebra Transversal			
$C < 23$	2,781	1,494	1,880
$23 \leq C < 28$	2,987	2,206	1,963
3/8 da Casca com Quebra Transversal			
$22 \leq C < 27$	2,792	1,893	1,786
$C \geq 27$	2,764	2,062	1,666
1/4 da Casca com Quebra Transversal			
$C < 22$	2,835	1,772	1,482
$22 \leq C < 27$	2,933	2,114	1,777
Casca tipo miúdo			
	2,632	2,447	1,604

4.7 Simulação da separação e seleção por velocidade terminal

Existem vários equipamentos destinados à limpeza, classificação e transportes baseados em fluxo de ar, desenvolvendo diferentes níveis de eficiência.

Em geral, a operação de separação se dá com a alimentação do equipamento por uma bica a uma coluna vertical de ar em movimento. Quando a mistura de sementes encontra a corrente de ar, tanto as sementes quanto os materiais contaminantes, cuja velocidade terminal é menor que a velocidade imposta pelo ar, são levantados e ascendem através da coluna, em direção ao seu topo, onde são desviadas para o setor de descarga. Sementes que possuem velocidade terminal superior à velocidade do ar, caem através da coluna de ar até alcançarem uma peneira inclinada, que as desvia para um setor de descarga (VAUGHAM et al., 1980).

Pela análise da Tabela 32, observa-se que a velocidade terminal experimental para amêndoas inteiras variou de 14,275 m/s a 14,545 m/s, enquanto a maior velocidade terminal encontrada para os fragmentos de casca foi de 12,608 m/s na classe de 3/4 da Casca com Quebra Longitudinal (Tabela 33). Ao avaliar o comportamento de cada classe de material obtida da quebra do coco catolé, ou seja, amêndoas inteiras, danificadas e fragmentos de casca de todas as faixas de tamanho quando colocadas em um fluxo de ar ascendente em cinco velocidades de fluxo de ar diferentes, obtiveram-se os resultados contidos nas Tabelas 37 e 38, nas quais, os resultados da avaliação da separação das amêndoas e cascas de coco catolé são mostrados por meio de médias percentuais.

Tabela 37: Percentuais de partículas separadas (arrastadas pelo fluxo de ar), em relação a cinco velocidades de fluxo de ar – fragmentos de cascas

Vt (m/s)	16	15	14	13	12
3/4 da Casca com Quebra Longitudinal					
27≤C<32	100,000	100,000	70,000	25,000	5,000
32≤C<37	100,000	100,000	85,000	15,000	0,000
C≥37	100,000	100,000	75,000	5,000	0,000
Média para a classe	100,000	100,000	76,667	15,000	1,667
1/2 da Casca com Quebra Longitudinal					
C<30	100,000	100,000	100,000	95,000	40,000
30≤C<35	100,000	100,000	100,000	80,000	10,000
C≥35	100,000	100,000	100,000	60,000	20,000
Média para a classe	100,000	100,000	100,000	78,333	23,333
3/8 da Casca com Quebra Longitudinal					
20≤C<25	100,000	100,000	100,000	100,000	80,000
25≤C<30	100,000	100,000	100,000	100,000	65,000
C≥30	100,000	100,000	100,000	100,000	75,000
Média para a classe	100,000	100,000	100,000	100,000	73,333
1/4 da Casca com Quebra Longitudinal					
C<22	100,000	100,000	100,000	95,000	70,000
22≤C<27	100,000	100,000	100,000	85,000	60,000
27≤C<32	100,000	100,000	100,000	100,000	95,000
C≥32	100,000	100,000	100,000	100,000	95,000
Média para a classe	100,000	100,000	100,000	95,000	80,000
1/8 da Casca com Quebra Longitudinal					
15≤C<20	100,000	100,000	100,000	95,000	85,000
20≤C<25	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
C≥25	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Média para a classe	100,000	100,000	100,000	98,333	95,000
1/2 da Casca com Quebra Transversal					
C<23	100,000	100,000	100,000	90,000	20,000
23≤C<28	100,000	100,000	100,000	60,000	45,000
Média para a classe	100,000	100,000	100,000	75,000	32,500
3/8 da Casca com Quebra Transversal					
22≤C<27	100,000	100,000	95,000	90,000	45,000
C≥27	100,000	100,000	100,000	80,000	25,000
Média para a classe	100,000	100,000	97,500	85,000	35,000
1/4 da Casca com Quebra Transversal					
C<22	100,000	100,000	100,000	90,000	60,000
22≤C<27	100,000	100,000	100,000	100,000	80,000
Média para a classe	100,000	100,000	100,000	95,000	70,000
Casca tipo miúdo					
	100,000	100,000	100,000	90,000	85,000

Tabela 38: Percentuais de partículas separadas (arrastadas pelo fluxo de ar), em relação a cinco velocidades de fluxo de ar – amêndoas

Vt (m/s)	16	15	14	13	12
Amêndoas Inteiras					
16≤C<19	100,000	100,000	20,000	0,000	0,000
19≤C<22	100,000	80,000	0,000	0,000	0,000
22≤C<25	100,000	100,000	0,000	0,000	0,000
Média para a classe	100,000	93,33333	6,667	0,000	0,000
Amêndoas menos um pedaço					
	100,000	100,000	100,000	100,000	80,000
Amêndoa pela metade					
	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Amêndoa com dano transversal					
	100,000	100,000	100,000	100,000	0,000
Amêndoa tipo miúdo					
	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

Ao utilizar uma velocidade de fluxo de ar ascendente de 16,0 m/s, todos os fragmentos de cascas foram arrastados visto que esta velocidade é maior que a velocidade terminal desses fragmentos, o mesmo se verificando para as amêndoas inteiras; portanto, esta velocidade não foi interessante para alcançar a separação de amêndoas e cascas, já que toda a mistura foi arrastada pelo fluxo de ar.

Ao aplicar uma velocidade de fluxo de ar de 15m/s todos os fragmentos de cascas e as amêndoas danificadas foram arrastados pela corrente de ar em sua totalidade. No que se refere às amêndoas inteiras, 93,33% também foram deslocados pelo fluxo de ar de 15m/s o que torna esta velocidade ineficiente para a separação de amêndoas e cascas de coco catolé.

As velocidades de 14m/s e 13m/s foram as que promoveram uma separação melhor, sendo que ao utilizar o fluxo de ar de 14m/s, 6,67% das amêndoas inteiras foram deslocados com os fragmentos de casca, o que em 100 kg de amêndoas representaria uma perda de 6,67 kg, mas esta velocidade permitiu que praticamente todos os fragmentos de cascas e amêndoas danificadas fossem removidos, ficando retido junto às amêndoas inteiras apenas 2,5% de cascas classificadas como 3/8 da Casca com Quebra Transversal.

No que diz respeito à velocidade de fluxo de ar de 13 m/s, nesta velocidade não houve perdas de amêndoas inteiras, ou seja, todas as amêndoas de interesse ficaram retidas, não sendo deslocadas pelo fluxo de ar com o restante das partículas (amêndoas danificadas

e fragmentos de cascas). No entanto, ao regular o fluxo de ar a 13 m/s, uma quantidade maior de fragmentos de casca não foi removida, não sendo separados das amêndoas inteiras, necessitando de um maior refino no processo de separação.

Através do conhecimento de velocidade terminal, Tiwari, citado por MOHSENIN (1986), empregou os princípios aerodinâmicos para investigar as possibilidades de separação pneumática de feijões de amostras de debulha que continham materiais indesejáveis, como feijões danificados, pedras, folhas, talos, raízes, etc. Materiais como folhas, talos e raízes foram completamente separados com aplicação de um fluxo de ar com velocidade em torno de 6,4 m/s. Para as separações de feijões bons e pedras, foram necessárias velocidades na faixa de 7,9 a 24,4 m/s. Essa variação foi considerada insatisfatória para a separação, sendo sugerido um separador baseado em uma combinação de princípios pneumáticos e outros mecanismos de separação.

Conforme Bilanski e Fortes, citados por PINHEIRO (1975), as principais fontes de erro na determinação experimental da velocidade terminal são: a rotação da partícula em torno do seu eixo, a forma irregular do corpo, o processo inadequado de medição e leitura da velocidade do fluxo e o escoamento turbulento do ar. De Baerdemaeker e Segerlind (1974), determinando as propriedades aerodinâmicas de morangos (em diferentes estágios de maturidade), mencionaram também que as principais dificuldades observadas durante os testes foram a rotação do morango em torno dele mesmo e a forma irregular deste, que dificultaram a manutenção da flutuação estável.

5 CONCLUSÕES

- O coco catolé *in natura* possui massa média de 24,814 g, massa específica real de 1,129 g/cm³ e circularidade e esfericidade de 77,68% e 77,45%, respectivamente;
- O coco catolé despulpado possui massa média de 7,679 g, massa específica real de 1,210 g/cm³, circularidade de 44,59% e esfericidade de 50,58%;
- As amêndoas de coco catolé possuem massa média de 1,514g com valor máximo de 2,184g, massa específica real média de 0,808 g/cm³, a circularidade média de 62,68% e a esfericidade média de 64,82%;
- A classificação do produto após quebra resultou em: 79% de amêndoas inteiras e 21% de amêndoas danificadas, sendo 7% de amêndoas pela metade, 4% com dano transversal, 7% do tipo miúdo e 3% faltando um pedaço.
- A máquina de limpeza, constituída por uma unidade motorizada elétrica, equipada com motor elétrico de 1/2 HP, voltagem de 220 V, com consumo de energia de 0,46 kW/h, promove excelente limpeza com remoção satisfatória das sujidades, trabalhando numa rotação de 340 RPM e consumo de água 1 litro/min, em tempos que variam de 15 a 25 minutos;
- Os esforços de compressão necessários para romper o fruto no sentido longitudinal foram em média de 4,78 kN e no sentido transversal de 2,9 kN; portanto a quebra no sentido transversal ao maior eixo do produto é mais indicado por requerer menor esforço de compressão até a ruptura;
- O coeficiente de arrasto de amêndoas inteiras após correção utilizando o fator de esfericidade, apresentou valores crescentes com o aumento do comprimento e diminuição da esfericidade, o que demonstra influência direta da forma nos parâmetros de transporte;

- O maior coeficiente de arrasto obtido para as classes estudadas foi de 3,44 para a casca com quebra no sentido longitudinal e que representava $\frac{1}{4}$ do tamanho total do coco catolé;
- Os números de Reynolds variaram de 5351 a 18000 nas diversas classes e tamanhos estudados, revelando um regime turbulento de queda no tubo, ou seja, transporte na Região de Newton;
- Os parâmetros aerodinâmicos experimentais como coeficiente de arraste, velocidade terminal, fator de forma e área projetada, levam a concluir que as equações ora existentes na literatura não se prestam à estimativa de transporte e queda de sistemas particulados de produtos com diâmetros maiores que 5mm (particulado grande);
- As equações e gráficos utilizados para estimativa das velocidades terminais teóricas para amêndoas inteiras, resultaram em valores maiores que aqueles obtidos experimentalmente, exceto o método 4, que forneceu valores teóricos de velocidade terminal mais baixos que os valores experimentais para amêndoas inteiras ($14,275 \text{ m.s}^{-1}$ a $14,545 \text{ m.s}^{-1}$);
- O modelo que melhor estima o valor experimental da velocidade terminal de amêndoas de coco catolé foi pelo Método 1 e 2, com Reynolds estimado pelo gráfico $N_R \times CN_R^2$ (MOHSENIN, 1986);
- Para cascas, os valores encontrados para a velocidade teórica pelo método 4, foram os que mais se aproximaram da velocidade experimental;
- Com os dados de velocidade terminal obtidos, pode-se concluir que é possível a separação pelo princípio da velocidade terminal, visto que a máxima velocidade terminal experimental encontrada foi para amêndoas inteiras, sendo esta 13,2% maior que a classe com velocidade terminal mais próxima, que foi de 1/2 de cascas com quebra longitudinal (1/2 longitudinal);
- Ao realizar a separação de misturas (cascas + amêndoas inteiras e danificadas) com fluxo de ar de 14m/s, houve uma perda de 6,67% das amêndoas inteiras, porém esta velocidade

permitiu que praticamente todos os fragmentos de cascas e amêndoas danificadas fossem removidos, ficando retidos junto às amêndoas inteiras, apenas 2,5% de cascas classificadas como 3/8 da Casca com Quebra Transversal.

6 REFERÊNCIAS

ABREU, N. A. **Cultura da guariroba: uma produção constante e rentável**. 3. ed. Goiânia: AEAGO, 1997.

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; ANDRADE, E.T. Análise da variação das propriedades físicas e contração volumétrica dos grãos de milho durante a dessecção. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 15-21, 2000.

ARANGO, O. **The world cashew economy**, Bologna: 1994, 189 p.

ARAÚJO, M.C. de; FERRAZ, A.C. de O. Características físicas e mecânicas do endocarpo e da amêndoa da castanha de caju ‘CCP 76’ antes e após tratamento térmico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.3, p.565-578, jul./set. 2008.

ARSENIJEVIC, Z.LJ.; GRBAVIC, Z.B.; GARIC-GRULOVIC, R.V.; ZDANSKI, F.K. Determination of non-spherical particle terminal velocity using particulate expansion data. **Powder Technology**, Amsterdam, v.103, n.3, p.265-273. 1999.

BATISTA, C. S.; COUTO, S. M.; CECON, P. R.; Peixoto, A. B. Efeito da temperatura do ar de secagem, do teor de umidade e do estágio de maturação no módulo de deformidade de frutos de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. Especial café, n.6, p.42-53, 2003.

BOGACZYNSKI, K. Some aerodynamic properties of selected samples of wheat, rye and barley seeds. **Acta Alimentaria Polonica**, Poznan, Poland, v.1, n.2, p. 165-175, 1975.

BOURNE, M. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. New York: Academic Press, 2002. 427 p.

CAVALCANTI-MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, p.79-93, 2002.

CHHABRA, R.P.; AGARWAL, L.; SINHA, N.K. Drag on non-spherical particles: an evaluation of available methods. **Powder Technology**. Elsevier, v.101, n.3, p. 288-295. 1999.

COUTO, S. M.; BATISTA, C. S.; PEIXOTO, A. B.; DEVILLA, I. A. Comportamento mecânico de frutos de café: Módulo de deformidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.285-294, 2002.

COUTO, S.M.; BATISTA, C. da S.; DEVILLA, I.A.; PAIM, V.T. Características de frutos de café sob compressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p. 117-122, 2002.

COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C.; QUEIROZ, D. M. de; BASTOS, I. T. Parâmetros relevantes na determinação da velocidade terminal de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.141- 148, 2003.

COUTO, S. M.; SANTOS, A. E. O. dos; VIEIRA, S. M. J.; SILVA, D. J. P. da. Determinação da força de arrasto e da velocidade terminal de frutos de café pela técnica de elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2/3, p. 274-283, 2004.

CURRAY, J.K. **Analysis of sphericity and roundness of quartz grains**, 1951. Dissertação (Mestrado em Mineralogia). The Pennsylvania State, University Park, Pa. 1951.

DE BAERDEMAEKER, S., SEGERLIND, L. J. Aerodynamic properties of strawberreis. In: **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 2, p. 729 - 732, 1974.

DIAS, L.F.L. **Avaliação de algumas propriedades físicas de grãos de café (*Coffea arabica*) orgânico e convencional. Marechal Cândido Rondon**, 2007. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Coordenadoria de Pós-Graduação, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

DINIZ, J. de A.; SA, L.F. de. **A cultura da guariroba**. Goiania: EMATER - GO, 1995. 16p. (EMATER – GO. Boletim técnico, 3).

DONG, Z.; GAU, S.; FRYREAR, D.W. Drag coefficients, roughness length and zero-plane displacement height as disturbed by artificial standing vegetation. **Journal of Arid Environments**, San Diego, v.49, n.3, p.485-505. 2001.

DRUMOND, M.A. Licuri *Syagrus coronata* (Mart.) Becc. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. (Embrapa Semiárido - Documentos, 199).

DUARTE, M. E. M. ; GASPARETTO, C. A. Orientação de laranjas imersas em água e algumas propriedades físicas relacionadas com a seleção da fruta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 1, p. 95-99, 1997.

DURSUN, I.; TUGRUL, K.M.; DURSUN, E. Some physical properties of sugarbeet seed. **Journal of Stored Products Research**, 43, 149–155. 2007.

FERNANDES, F.D; MELO, J.T; GOMES, A.C; GUIMARÃES, D.P. Valor nutricional de folhas de pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth) e guariroba (*Syagrus oleracea* Becc.) em sistemas agroflorestais na 85 região do Cerrado. In: Congresso Brasileiro Sistemas Agroflorestais. **Anais**; 2002; Ilhéus, Brasil. Ilhéus:CEPLAC-CEPEC; 2002. p.1.

FOX, R.W.; PRITCHARD, P.J.; MCDONALD, A.T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

FRANCESCHINI, A.S.; CORRÊA, P.C.; RAMOS, M.G. Determinação de algumas propriedades físicas do milho, híbrido BR-201. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 22-27, 1996.

FRAZÃO, J. M. F. Projeto **Quebra Coco: Alternativas econômicas para agricultura familiar assentadas em áreas de ecossistemas de babaçuais**. São Luís, EMAPA, 2001.

GILES, R.V. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1980. 401p.

GUPTA, R. K.; ARORA, G.; SHARMA, R. Aerodynamic properties of sunflower seed (*Helianthus annuus* L.). **Journal of Food Engineering**, 79, 899–904. 2007.

HENDERSON, A.; GALEANO, G. & BERNAL, R. **Field Guide to the Palms of the Americas**. New Jersey: Princeton University Press, 1995.

HENRY, Z.A.; ZHANG, H.; ONKS, D. **Generalized model of resistance to strain of cellular material**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1996. p.1-26 (Paper N° 96-6023).

JINDAL, V. K., MOHSENIN, N., HUSTED, J. V. Surface area of selected agricultural seeds and grains. In: **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 4, p. 720 - 725, 1974.

LAPPLE, C.E. **Fluid and particle mechanics**. University of Delaware, Newark. 1956.

LEITÃO, A.M. Algumas propriedades físicas e mecânicas da pimenta-do-reino preta, variedade Kalluvally. Campinas, 1983. Dissertação (Mestrado). FEA/UNICAMP.

LIMA, E.D. de. Estudo do despeliculamento da amêndoa da castanha de caju com aplicação de baixas temperaturas e ultra-som. Fortaleza, 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia dos Alimentos). Coordenadoria de Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará.

Apêndice A

Tabela A.1: Correlação simples entre as variáveis massa (g) e tamanho (cm)

Correlação	Coefficiente de Correlação	Significância
Massa x Tamanho	0,7685	**

Foi aplicado o Teste t aos níveis de 5 e 1%, sendo significativo ao nível de 1% de probabilidade, e obtendo-se correlações lineares

Tabela A.2: Correlação simples entre as variáveis volume (cm³) e tamanho (cm)

Correlação	Coefficiente de Correlação	Significância
Volume x Tamanho	0.7364	**

Foi aplicado o Teste t aos níveis de 5 e 1%, sendo significativo ao nível de 1% de probabilidade, e obtendo-se correlações lineares

Tabela A.3: Correlação simples entre as variáveis massa específica (g/cm³) e tamanho (cm)

Correlação	Coefficiente de Correlação	Significância
Massa específica x Tamanho	-0.1901	ns

Foi aplicado o Teste t aos níveis de 5 e 1%, não sendo significativo.

Tabela A.4: Correlação simples entre as variáveis velocidade experimental (m/s²) e volume (cm³) para amêndoas inteiras

Correlação	Coefficiente de Correlação	Significância
Vel. Experimental x Volume	0.5727	**

Apêndice B

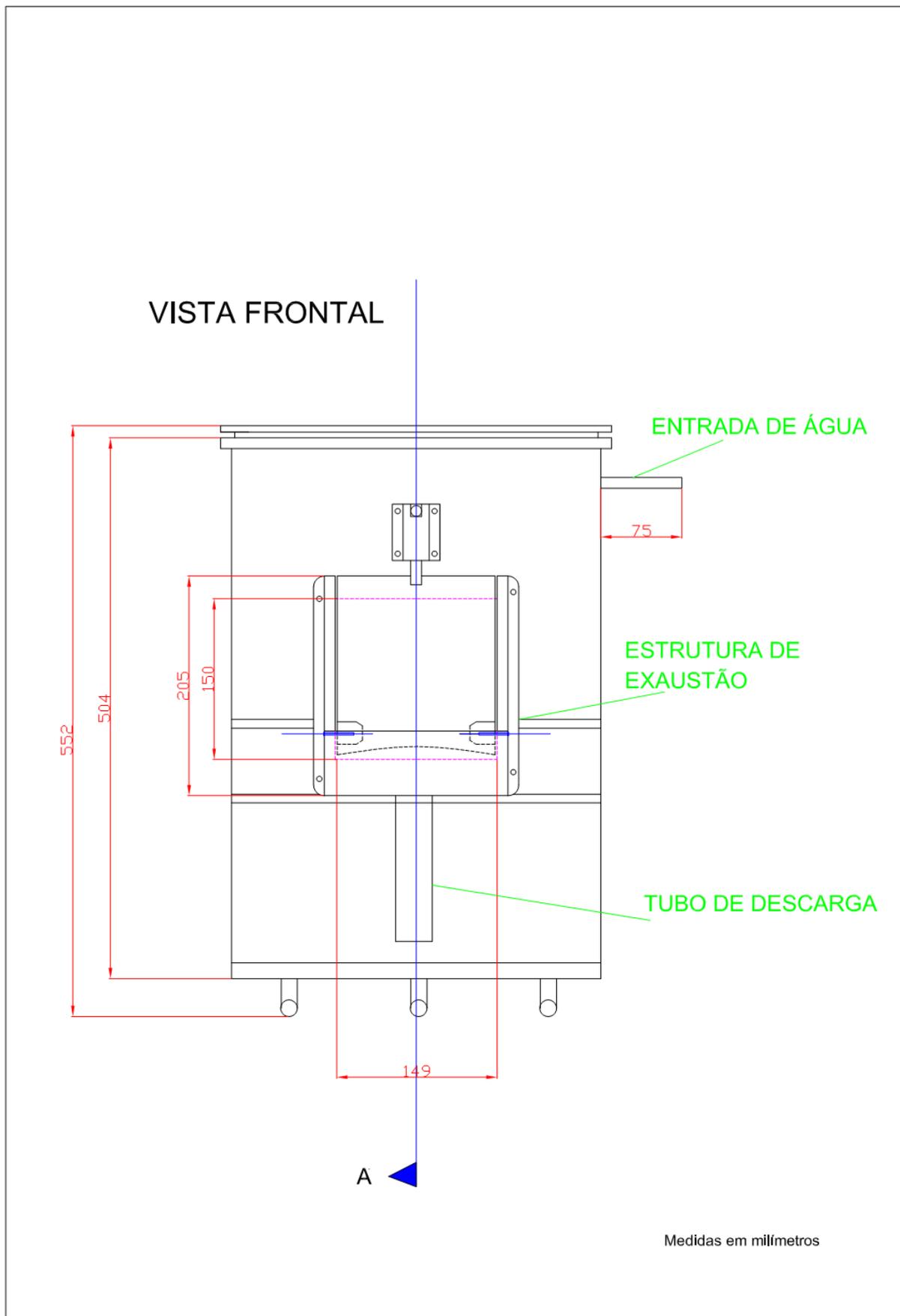


Figura B.1: Vista frontal do equipamento de limpeza e despiculagem

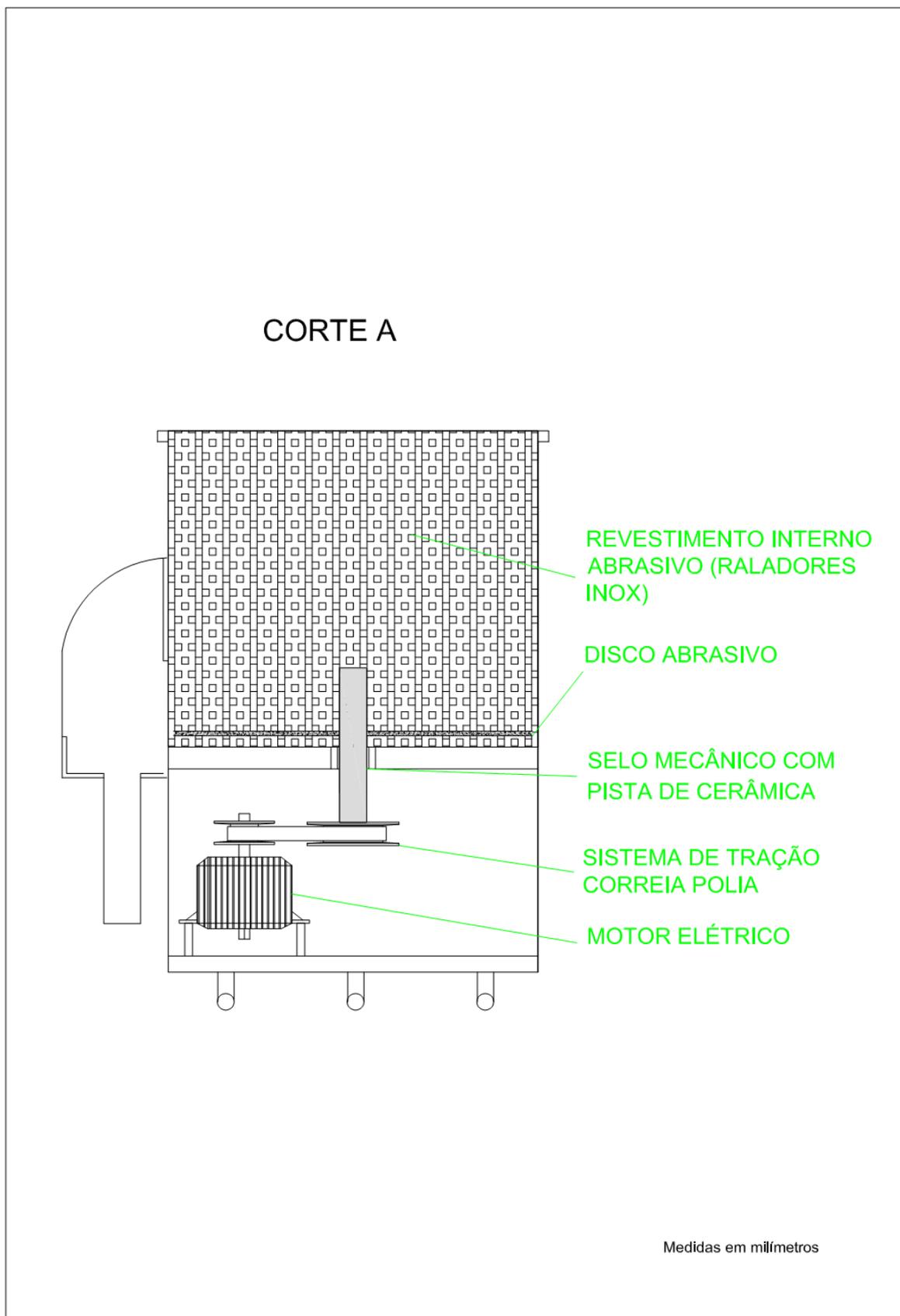


Figura B.2: Vista do corte A, com os constituintes internos do equipamento de limpeza e despiculagem



Figura B.3: Vista lateral externa do equipamento de limpeza e despeliculagem

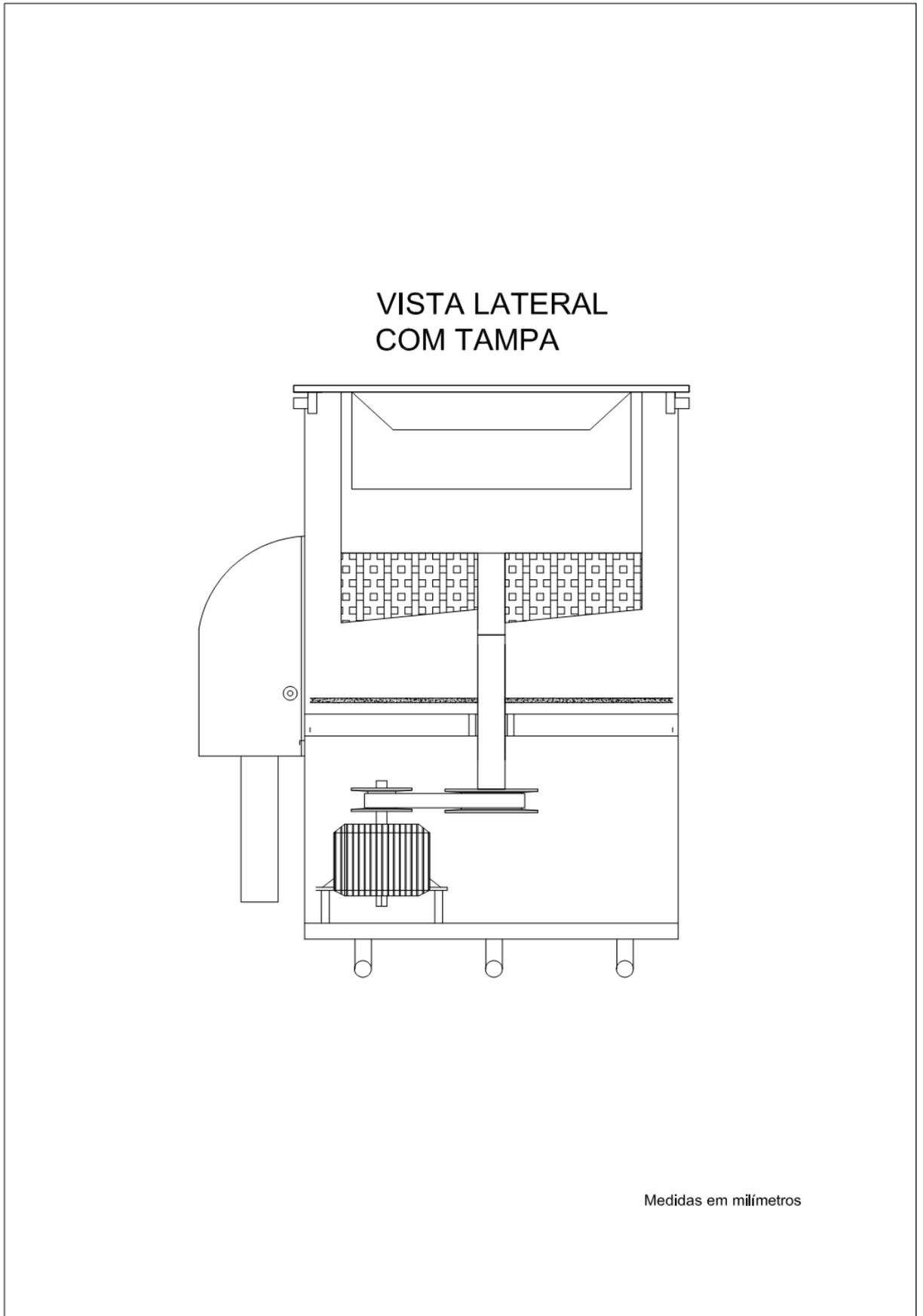
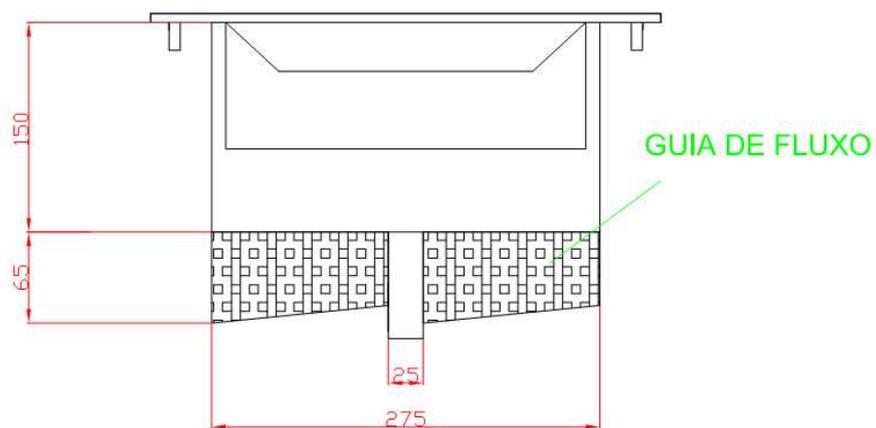
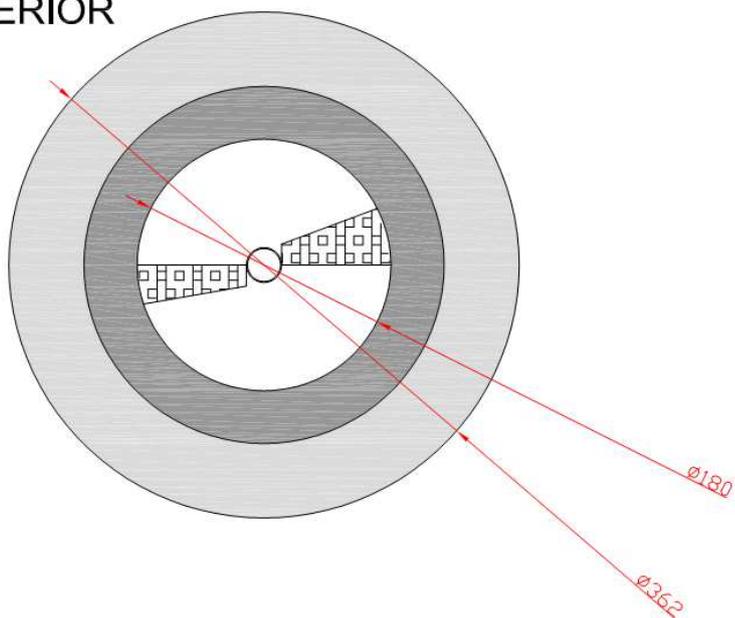


Figura B.4: Vista lateral interna do equipamento de limpeza e despeliculagem

VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR



Medidas em milímetros

Figura B.5: Vista lateral e superior da tampa do equipamento de limpeza e despeliculagem