

ANDERSON CHAGAS MAGALHÃES

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE
PRÉ-LIMPEZA DE CAFÉ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
MAIO - 1999**

ANDERSON CHAGAS MAGALHÃES

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE
PRÉ-LIMPEZA DE CAFÉ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

APROVADA: 5 de fevereiro de 1999.

Prof. Juarez de Sousa e Silva
(Conselheiro)

Prof^a. Sandra Maria Couto
(Conselheira)

Prof. Mauri Martins Teixeira

Prof. Roberto Sinício

Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

À minha mãe Ephigênia Chagas Magalhães.

Ao meu pai Milton Ribeiro de Magalhães.

À minha avó Augusta Petronilha (*in memoriam*).

Ao meu sogro Sebastião Gomes.

À minha sogra Maria Aparecida Gomes (*in memoriam*).

À minha esposa Cláudia S. G. Magalhães.

Ao meu filho Matheus Anderson.

Aos meus irmãos e familiares.

Aos amigos.

AGRADECIMENTO

A Deus, por tudo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso e pelos ensinamentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG), pela bolsa de estudo concedida e pelo auxílio à pesquisa para a concretização deste trabalho.

Ao Professor Daniel Marçal de Queiroz, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos e pela amizade ao longo do curso.

À Professora Sandra Maria Couto, pelas sugestões, pelo apoio e pela amizade no decorrer do trabalho.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em especial a Haroldo Carlos Fernandes, Juarez de Sousa e Silva, Paulo Cesar Corrêa, Mauri Martins Teixeira, Ricardo Capucio e Julião Soares, pelas sugestões, pelo apoio e pela colaboração.

Ao Professor Gutemberg Pereira Dias, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos e pela amizade no período de bolsista de iniciação científica.

Aos colegas de curso Ricardo, Antônio Donizeti, Gerson, Marise, Moisés, Ricardo Fontes, William, Jackson, Milson, Pablo, Afonso Lopes, Dermeval, Roberto Carlos, Luiz Henrique, Edney, José Luis, Paulo César,

Leonardo, Elton, Luciano, Renildo, Denilson, Kalil, Leidy Zulys e aos bolsistas da área de Mecanização Agrícola, em especial a Cristiano, pela colaboração, pelo apoio, pelas sugestões, pela cooperação durante os testes experimentais, pela amizade e pelo bom convívio.

À bolsista de iniciação científica Itaciane Toledo Bastos, pela amizade, pelo apoio e pela valiosa contribuição para a realização deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial a Fernanda, Marcelo do Carmo, Edna, Marcos, Maria José, Lucimar, Daniel Mill, Álvaro, Galinari, Zé Mauro, Evaristo, Juvercino, Jurandir, Silas, Maurílio, Danilo, Geraldo, Wantuil e Geraldão, pela amizade, pela colaboração, pelo apoio e pelo bom convívio.

A Fabiano dos Reis Leite, pelos desenhos, pelas sugestões, pela colaboração e amizade.

A Francisco Carlos A. Neto e José Raimundo Domingos, pelo auxílio, pelo apoio, pelas sugestões, pela amizade e pela dedicação durante a construção do protótipo da máquina de pré-limpeza de café.

Ao meu sogro Sebastião, bem como a meus cunhados Maurício, Marcelo, Cláudio e Cristiano, pelo estímulo, pelas alegrias, pela compreensão e pela amizade nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais, irmãos e familiares, pelo estímulo, pelo apoio, pela compreensão e pela amizade.

À minha esposa Cláudia e ao meu filho Matheus Anderson, pelo apoio, pelo carinho, pela compreensão, pelas alegrias e pelo amor nos momentos de dificuldade.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ANDERSON CHAGAS MAGALHÃES, filho de Milton Ribeiro de Magalhães e Ephigênia Chagas Magalhães, nasceu em Belo Horizonte, Minas Gerais, no dia 16 de fevereiro de 1969.

Cursou o primeiro e o segundo graus em sua cidade natal. Em 1991, ingressou na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, no curso de Engenharia Agrícola, onde se graduou em setembro de 1996, tendo sido monitor da disciplina Equações Diferenciais Ordinárias e Parciais, no Departamento de Matemática, e bolsista de iniciação científica no Departamento de Engenharia Agrícola.

Em outubro de 1996, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, submetendo-se à defesa de tese em 5 de fevereiro de 1999.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
EXTRATO	xvi
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Diagnóstico da cafeicultura na Zona da Mata	5
2.2. Máquinas de limpeza	6
2.2.1. Mecanismo de peneiramento das máquinas de limpeza	6
2.2.2. Sistema de ventilação das máquinas de limpeza	7
2.3. Utilização do computador como ferramenta no projeto de máquinas	8
2.4. Propriedades e características físicas do grão	9
2.4.1. Velocidade terminal	9
2.4.2. Coeficiente de arrasto	11
2.4.3. Esfericidade	12
2.4.4. Área projetada	14
2.4.5. Massa específica	14

2.4.6. Forma e tamanho	15
2.5. Avaliação do desempenho de máquina agrícola	16
3. MATERIAL E MÉTODO	17
3.1. Determinação das características e propriedades físicas dos frutos de café	17
3.1.1. Umidade	18
3.1.2. Massa específica real	18
3.1.3. Massa específica aparente	18
3.1.4. Ângulo de repouso dos frutos	19
3.1.5. Tamanho e forma dos frutos	20
3.1.5.1. Esfericidade	21
3.1.5.2. Área projetada	21
3.1.5.3. Volume do fruto de café	21
3.1.6. Velocidade terminal experimental	21
3.1.7. Coeficiente de arrasto	22
3.1.8. Velocidade terminal calculada	22
3.2. Projeto da máquina	23
3.2.1. Estrutura da máquina	23
3.2.2. Sistema de acionamento	24
3.2.3. Moega de alimentação	26
3.2.4. Sistema de ventilação	27
3.2.5. Curva característica do sistema de ventilação	28
3.2.6. Caixa das peneiras	29
3.2.7. Sistema de vibração	31
3.2.8. Simulação da trajetória dos frutos entre a saída da moega e a peneira	32
3.3. Matéria-prima usada na avaliação do desempenho da máquina	33
3.4. Ensaio preliminares de avaliação da máquina de pré-limpeza ..	34
3.5. Avaliação da máquina de pré-limpeza	34
3.5.1. Caracterização da amostra	34
3.5.2. Desempenho da máquina	34
3.5.2.1. Capacidade de separação	35

3.5.2.2. Índice de perda por deficiência de separação	36
3.5.2.3. Consumo de energia por quilograma de frutos separados	36
3.5.3.4. Eficiência de separação da máquina	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1. Características e propriedades físicas dos frutos de café	38
4.1.1. Dimensões dos frutos de café	38
4.1.2. Volume e massas específicas aparente e real dos frutos de café	40
4.1.3. Características aerodinâmicas do fruto de café	43
4.2. Simulação do comportamento dinâmico do sistema de vibração da máquina	46
4.3. Avaliação da capacidade e eficiência de separação da máquina de pré-limpeza	49
4.3.1. Características técnicas da máquina de pré-limpeza	49
4.3.2. Curva característica do sistema de ventilação	50
4.3.3. Características e propriedades físicas dos frutos de café	51
4.3.4. Determinação do desempenho da máquina de pré-limpeza .	51
5. RESUMO E CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE QUADROS

	Página
1. Comparação entre as propriedades cafeeiras, os parques cafeeiros e as produções, de acordo com o tamanho das áreas de café, nos anos de 1984/85 e 1995/96	5
2. Dimensões dos eixos principais, massa e ângulo de repouso dos grãos de café da variedade Híbrido Timor, como função do teor de umidade	39
3. Dimensões dos eixos principais, massa e ângulo de repouso dos grãos de café da variedade Catuaí vermelho, como função do teor de umidade	39
4. Valores médios e intervalos de confiança para os três eixos principais dos frutos de café	40
5. Massa específica aparente para café em coco de diferentes variedades e teores de umidade	41
6. Massa específica real determinada pelo método do volume deslocado, para café em coco de diferentes variedades e teores de umidade	42
7. Massa específica real determinada com base no volume e na massa de cada grão, para diferentes variedades e teores de umidade	42

8. Valores médios das propriedades aerodinâmicas, utilizando-se amostras contendo um, cinco e dez frutos da variedade Híbrido Timor	44
9. Valores médios das propriedades aerodinâmicas, utilizando-se amostras contendo um, cinco e dez frutos da variedade Catuaí vermelho	45
10. Características técnicas da máquina de pré-limpeza	49
11. Características físicas do café utilizado nos testes de avaliação de desempenho da máquina de pré-limpeza	51
12. Determinação do desempenho da máquina de pré-limpeza, com médias de nove repetições para cada teste	52
13. Teores de impurezas e eficiência de separação da máquina de pré-limpeza, nos três testes realizados	53

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Esquema de um elipsóide triaxial e seus eixos principais	13
2. Esquema do equipamento para determinar massa específica aparente	19
3. Esquema do equipamento utilizado para determinar o ângulo de repouso dos frutos de café	20
4. Esquema do fluxo de produto e dos componentes da máquina projetada de pré-limpeza	23
5. Vista lateral da máquina de pré-limpeza de café projetada	24
6. Vista superior da máquina de pré-limpeza de café projetada	25
7. Corte A - A da máquina de pré-limpeza	26
8. Posições de leituras para o tubo de Pitot em duto circular	28
9. Esquema das forças que atuam no fruto de café Quando este está sobre a peneira da máquina de pré-limpeza	30
10. Esquema do sistema de vibração do eixo excêntrico	32
11. Esquema das forças atuando no fruto de café durante a queda, na máquina de pré-limpeza	32
12. Gráfico da trajetória dos frutos de café em queda na máquina de pré-limpeza	46

13. Esquema utilizado para análise do sistema de vibração das peneiras da máquina de pré-limpeza	47
14. Aceleração (\ddot{x}) da caixa de peneira como função do tempo, obtida com a utilização do programa Working Model	47
15. Aceleração (\ddot{y}) da caixa de peneira como função do tempo, obtida com a utilização do programa Working Model	48
16. Coeficiente do modo de operação da caixa de peneira como função do tempo, obtido com a utilização do programa Working Model	49
17. Curva característica do sistema de ventilação usado na máquina de pré-limpeza	50
18. Composição do produto antes do teste de limpeza	53
19. Composição do produto após o teste de limpeza	54
20. Composição do produto eliminado como impureza pela máquina	54

LISTA DE SÍMBOLOS

a	= eixo maior (m)
A_p	= área projetada da partícula, normal ao seu movimento em direção ao fluido (m ²)
A_{px}	= área projetada da partícula em relação à direção X (m ²)
A_{py}	= área projetada da partícula em relação à direção Y (m ²)
b	= eixo médio (m)
c	= eixo menor (m)
C	= coeficiente de arrasto (adimensional)
C_e	= consumo de energia por quilograma de frutos separados (kW.h/kg)
C_{om}	= coeficiente do modo de operação (adimensional)
C_p	= capacidade de produção da máquina (kg/h)
C_s	= capacidade de separação (kg/h)
C_x	= coeficiente de arrasto na direção X (adimensional)
C_y	= coeficiente de arrasto na direção Y (adimensional)
d	= média geométrica do diâmetro do corpo (m)
d_c	= diâmetro do menor círculo circunscrito
d_e	= diâmetro de uma esfera de mesmo volume do objeto
d_i	= diâmetro do maior círculo inscrito

d_s	= menor diâmetro da esfera circunscrita
E_s	= eficiência de separação da máquina (adimensional)
g	= aceleração gravitacional (m/s^2)
I_c	= intervalo de confiança da dimensão do fruto de café
I_e	= teor de impureza no produto descartado pela máquina
I_f	= teor de impureza final
I_i	= teor de impureza inicial
I_p	= intervalo de previsão da dimensão do fruto de café
I_{pd}	= índice de perda (%)
m_p	= massa da partícula (kg)
n	= número de repetições
N_R	= número de Reynolds (adimensional)
P_d	= pressão dinâmica (mmca)
P_{fns}	= peso dos frutos de café não separados pela máquina (kg)
P_{fs}	= peso dos frutos de café separados (kg)
P_{pt}	= peso do produto trabalhado (kg)
P_{if}	= peso total dos frutos de café (kg)
Q	= vazão do ventilador (m^3/s)
S	= área da seção do duto (m^2)
T	= tempo de trabalho (h)
T_{fs}	= tempo efetivo para pré-limpeza (h)
T_s	= tempo de separação (h)
$t_{0,025}$	= valor crítico para distribuição de Student para α igual 0,025
V	= velocidade do ar (m/s)
V_{ar}	= velocidade do ar no ventilador (m/s)
Vol	= volume do fruto de café (m^3)
V_t	= velocidade terminal (m/s)
V_x	= velocidade do fruto na direção horizontal (m/s)
V_y	= velocidade do fruto na direção vertical (m/s)

W	= potência de acionamento da máquina (W)
W_p	= peso da partícula (N)
\bar{a}	= aceleração da peneira no sentido horizontal (m/s^2)
\bar{X}	= dimensão média de cada eixo
y	= altura dos frutos de café em repouso (cm)
\bar{a}	= aceleração da peneira no sentido vertical (m/s^2)

GREGOS

α	= ângulo de repouso (graus)
s	= desvio-padrão da dimensão de cada eixo
f	= esfericidade (adimensional)
g	= ângulo de inclinação da peneira (graus)
h	= viscosidade absoluta do ar ($N.s/m^2$)
r_f	= massa específica do ar (kg/m^3)
r_p	= massa específica da partícula (kg/m^3)

EXTRATO

MAGALHÃES, Anderson Chagas, M.S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 1999. **Projeto, construção e avaliação de uma máquina de pré-limpeza de café.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Conselheiros: Haroldo Carlos Fernandes, Juarez de Sousa e Silva, Paulo Cesar Corrêa e Sandra Maria Couto.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma máquina para abanação e separação de frutos de café provenientes da colheita, sendo determinados, numa primeira etapa: a) o tamanho, o ângulo de repouso, a massa específica aparente e o volume do fruto de café; e b) as características aerodinâmicas dos frutos de café em diferentes teores de umidade. Com base nesses dados, foram definidos o diâmetro dos furos da peneira superior de 20 mm e o diâmetro dos furos da peneira inferior de 6 mm; o ângulo de inclinação da moega de 60° e a capacidade da moega de $0,17 \text{ m}^3$; e a vazão máxima de ar produzida pelo sistema de ventilação de $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Na segunda etapa do trabalho foram desenvolvidos o projeto e a construção da máquina para pré-limpeza de café, empregando técnicas de CAD (Projeto Auxiliado por Computador), e realizados testes para avaliação do desempenho desta máquina, utilizando café com diferentes teores de impurezas. O princípio de funcionamento da máquina adotado foi o de ar e peneira. O comportamento dinâmico do sistema de vibração da máquina de pré-limpeza foi analisado

utilizando-se o programa computacional Working Model 3D. Após essa análise, ficou estabelecido que o ângulo de inclinação da peneira seria de $3,7^{\circ}$. Um protótipo da máquina foi construído na oficina mecânica da Área de Armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola. Este protótipo foi avaliado usando como matéria-prima uma mistura das colheitas de café das variedades Catuaí, Mundo Novo, Catimor e Híbridos (cruzamentos de Mundo Novo e Catuaí x Híbrido Timor). O produto utilizado nos testes foi colhido por derriça no chão e no pano. Foram realizados três testes para avaliação da máquina e, para cada teste, nove repetições. No teste 1 foram utilizados frutos de café colhidos por derriça no pano; no teste 2, frutos de café colhidos por derriça no chão; e no teste 3, frutos de café colhidos por derriça no pano e no chão. As avaliações da máquina de pré-limpeza consistiram na determinação dos seguintes parâmetros: capacidade de separação (kg/h); eficiência de separação da máquina, obtida com base nos teores de impurezas dos frutos de café antes e após a pré-limpeza (% em peso); índice de perda por deficiência de separação (% em peso); e consumo de energia por quilograma de frutos separados (kWh/kg). Com base nos resultados obtidos nos testes realizados, pode-se concluir que a máquina mostrou desempenho satisfatório, apresentando capacidade de limpeza média de 1.060 kg/h, com eficiência de limpeza em média de 76%, índice de perdas médio de 0,48% e consumo médio de energia de 0,0025 kWh/kg de produto limpo.

ABSTRACT

MAGALHÃES, Anderson Chagas, M.S., Universidade Federal de Viçosa, May 1999. **Project, construction and evaluation of a coffee pre-cleaning machine.** Adviser: Daniel Marçal of Queiroz. Committee members: Haroldo Carlos Fernandes, Juarez de Sousa e Silva, Paulo Cesar Corrêa and Sandra Maria Couto.

The objective of this work was to develop a cleaning machine for harvested coffee cherries. At a first stage, the following properties were determined: a) the size, angle of repose, the apparent specific mass and the volume of coffee berries; and b) the aerodynamic characteristics of coffee berries at different moisture contents. Based on the obtained data the diameter of the upper and lower sieve openings were fixed to 20 mm and 6 mm, respectively. The angle of the hopper base and the hopper capacity was fixed to 60° and 0.17 m³, respectively. The maximum air flow rate produced by the ventilation system was fixed to 0.9 m³/s. At the second stage, the design and construction of the machine for coffee pre-cleaning were developed by using CAD techniques (Computer Aided Design), as well as the tests for evaluating the machine performance were conducted using coffee with different foreign matter contents. The machine cleaning principle was based on air and sieve systems. The dynamic behavior of the vibration system in the pre-cleaning machine was analyzed by using Working Model 3D software. After this analysis,

it was established that the angle of sieve inclination would be 3.7° . A machine prototype was built at the machinery shop on the Storage Area of the Agricultural Engineering Department. This prototype was evaluated by using a mixture of coffee harvested samples from varieties *Catuí*, *Mundo Novo*, *Catimor* and *Híbridos* (*Mundo Novo* and *Catuí* x *Híbrido Timor* crossings) as raw material. The coffee samples were strip-picked on the ground and on cloth. Three tests were conducted to evaluate the machine, with nine replicates for each test. Test 1 used the coffee berries, which were strip-picked on cloth; test 2 used the coffee berries, which were strip-picked on the ground; and test 3 used those coffee berries, which were strip-picked on both ground and cloth. The evaluation of the pre-cleaning machine consisted in determining the following parameters: machine separation capacity (kg/h); machine separation efficiency obtained from the foreign matter contents of coffee berries before and after pre-cleaning (weight %); loss index by separation inefficiency (weight %); and energy consumption by each kilogram of separate coffee berries (kWh/kg). Based on the test results, it may be concluded that the machine showed a satisfactory performance, presenting an average cleaning capacity of 1.060 kg/h with an average cleaning efficiency of 76%, average loss index of 0.48% and average energy consumption of 0.0025 kWh/kg of cleaned coffee berries.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, o Brasil ocupa a posição de maior produtor e exportador de café no mercado internacional (CARVALHO et al., 1997). Tem havido, entretanto, queda no nível das exportações. As produções mundiais cresceram rapidamente, e a concorrência no preço e no fator qualidade fizeram com que a exportação brasileira diminuísse. Um dos fatores determinantes do declínio brasileiro no mercado internacional foi a falta de um padrão de qualidade do produto nacional.

O café é um dos poucos produtos agrícolas cujo preço é baseado em parâmetros qualitativos, variando significativamente seu valor de acordo com sua qualidade. Deve-se considerar que o custo adicional necessário para a produção de café com qualidade superior é significativamente menor do que a diferença de preços, quando comparado com a produção de café de baixa qualidade. O aspecto qualitativo é o principal problema enfrentado pela cafeicultura brasileira; para a sobrevivência da cafeicultura, é preciso que o País tenha de seguir o caminho da qualidade.

O mercado livre, segundo CAIXETA (1998), exige mudança na forma de atuação de todos os setores da economia cafeeira, que têm de sobreviver com os desafios impostos pela concorrência externa e interna. Logo, a conciliação de interesses de todos os setores de produção poderá resultar em competitividade e competência da atividade como um todo.

Segundo à FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO ESTADO DE MINAS GERAIS - FAEMG (1996), Minas Gerais é o estado líder na produção cafeeira no Brasil (cerca de 50% da safra). As regiões produtoras de café têm importância significativa na participação da renda e no emprego nessas regiões. Na Zona da Mata, o café tem uma participação de 72,2% na renda agropecuária, mesmo estando esta cultura presente em apenas 17,6% da área total das propriedades. Por sua vez, as pastagens, que ocupam 61,8% da área, participam com apenas 16,8% da renda, sendo 8,7% com leite e 8,1% com carne.

Nas pequenas e médias propriedades de café onde se faz uso dos mesmos recursos e sob condições de cultivo semelhantes, tem-se observado a obtenção de produtividades e qualidades diferentes. Esse fato revela a necessidade do uso mais adequado dos recursos, tanto técnicos quanto financeiros, além do gerenciamento mais eficiente da propriedade. A melhoria da produtividade e da qualidade do café implica eficiência no uso dos insumos, da mão-de-obra e dos tratamentos culturais, no transporte, na separação e na escolha adequada das técnicas de secagem, armazenamento e beneficiamento dos grãos.

No Brasil, a colheita do café é feita predominantemente pelo processo denominado derriça no chão. Neste caso, o café é derrubado no chão, rastelado, levantado, abanado e posto a secar em terreiros ou secadores mecânicos. Do tempo gasto nas operações de colheita manual, 60 a 70% é utilizado na derriça, 20 a 30% na rastelação e 10 a 15% na abanação (RIGITANO, 1975).

Outro processo de colheita é denominado derriça no pano, que impede o contato dos frutos com a terra. Com este tipo de colheita evitam-se impurezas como pedras e torrões e também o contato com grãos de café caídos anteriormente. Uma terceira forma de colher o café é a colheita dos frutos a dedo ou em cestos. Por este processo são colhidos apenas os frutos maduros, e a qualidade final do café colhido é muito melhor.

Durante todo o processo de colheita por derriça, seja no pano ou no chão, ou mesmo por colheita mecânica, a separação do café da impureza é indispensável para obtenção de um produto de melhor qualidade. É nessa separação que são eliminadas as impurezas que normalmente acompanham o

café após a colheita, como: terra, torrões, pedras, galhos e folhas. A limpeza evitará também transtornos nas operações seguintes de secagem mecânica e beneficiamento, diminuindo o desgaste dos equipamentos.

A separação dos grãos das impurezas pode ser feita por meio de lavadores sem dispositivos mecânicos que separem de um lado o "cereja" (mais denso) e de outro o "bóia" (menos denso), ou através de lavadores mecânicos. A limpeza do café pode ser feita, também, por máquinas que utilizam peneiras ou seletores (constituídos de peneiras e ventiladores).

A utilização de lavadores de tanques de água para separação dos frutos mais leves (bóia) dos frutos mais pesados (cerejas e verdes) e das impurezas requer elevado consumo de água, atingindo em média 5 a 10 litros de água para cada litro de café lavado. Seu rendimento varia de acordo com o tamanho da bica e o volume de água consumido, chegando a atingir até 10.000 litros de café por hora (SILVA et al., 1995).

Os lavadores mecânicos têm sido desenvolvidos para operar com baixo consumo de água e maior eficiência de separação que os lavadores de tanques. O café, antes de ser lavado, passa por uma abanação, em que são eliminadas todas as impurezas maiores e menores do que o fruto do café. O restante das impurezas é separado na bica e eliminado por meio de um dispositivo próprio de cada lavador. A abanação normal, de acordo com COAN (1981), é uma etapa da colheita que constitui um trabalho penoso para o operador, pois requer resistência física e habilidade para a sua execução, além de ser prejudicial à saúde, devido à contaminação do ar gerada no processo. A abanação é uma operação de baixo rendimento, pois nem sempre existe uma corrente de ar adequada que auxilie na eliminação de folhas, cascas, ramos e frutos chochos.

As máquinas que são utilizadas para separar o produto de impurezas ainda no campo podem facilitar muito o trabalho de colheita manual. A passagem do café colhido por máquinas de ar e peneira antes do sistema de lavagem pode resultar numa sensível redução no consumo de água pelos lavadores e no aumento da eficiência de separação desses equipamentos, devido à diminuição das impurezas provenientes do campo. A tendência, de acordo com SILVA et al. (1997), é uma expansão do sistema semimecanizado, com o emprego equilibrado de mão-de-obra e máquinas, principalmente nas

regiões Sul e Zona da Mata de Minas Gerais, em que a topografia, o tamanho ou espaçamento das lavouras são fatores limitantes para a colheita mecanizada.

Segundo PINHEIRO (1975), as máquinas agrícolas utilizadas no processamento de produtos agrícolas no Brasil, muitas vezes, são dimensionadas com base em informações de produtos estrangeiros, que nem sempre possuem as mesmas características dos produtos brasileiros. De acordo com TEIXEIRA (1988), a construção de máquinas de limpeza de produtos agrícolas no Brasil é baseada, na sua maioria, em tentativas. Isto faz com que haja grande diferença de um fabricante para outro, nas especificações técnicas e no desempenho, o que gera a necessidade de se estabelecerem normas tanto para a construção quanto para os ensaios de desempenho.

Tendo em vista a necessidade de desenvolver máquinas para abanação e separação de frutos de café, este trabalho teve os seguintes objetivos:

- Determinar o tamanho, o ângulo de repouso, a massa específica aparente e o volume do fruto de café.
- Determinar as características aerodinâmicas dos frutos de café em diferentes teores de umidade.
- Projetar e construir uma máquina para pré-limpeza de café utilizando técnicas de CAD (Projeto Auxiliado por Computador).
- Avaliar o desempenho da máquina, utilizando café com diferentes teores de impurezas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Diagnóstico da cafeicultura na Zona da Mata

Na Zona da Mata, segundo a FAEMG (1996), as pequenas propriedades representam cerca de 42% da safra e 48% do parque cafeeiro e da área plantada. A produtividade das médias e grandes propriedades é superior em 20% à produtividade das pequenas propriedades (Quadro 1).

Quadro 1 - Comparação entre as propriedades cafeeiras, os parques cafeeiros e as produções, de acordo com o tamanho das áreas de café, nos anos de 1984/85 e 1995/96

Tamanho de propriedades (área de café)	Nº de propriedades cafeeiras		Parque cafeeiro				Safrá média (94/95/96) (mil sacas beneficiadas)	Produtividade (sacas por hectares)
	84/85	95/96	Cafeeiros (milhões)		Área (mil ha)			
			84/85	95/96	84/85	95/96		
Até 10 ha	23.600	20.100	151,2	240,0	90,8	115,6	1.200	10,4
10 - 50 ha	7.000	6.400	184,0	192,9	112,7	104,0	1.300	12,5
Mais 50 ha	500	400	46,7	46,1	36,6	25,0	300	12,0
Total	31.100	26.900	381,9	479,0	240,1	244,6	2.800	11,4

Fonte: FAEMG (1996).

Quanto às variedades, de acordo com a FAEMG (1996), predomina a Catuaí, com 59%; o Mundo Novo, com 38%; e o restante das variedades, com 3%. O Catuaí prevalece em todas as regiões do estado de Minas Gerais, com exceção do sul e do oeste, onde o Mundo Novo é mais cultivado.

2.2. Máquinas de limpeza

CARVALHO e NAKAGAWA (1983) descrevem essa operação de pré-limpeza como feita normalmente por uma máquina denominada peneirão, desfolhador ou pré-limpeza, que tem uma ou duas peneiras planas vibratórias, podendo, em alguns modelos, ter um ventilador. No caso de duas peneiras, uma realiza a desfolha e a outra a peneiração, enquanto o ventilador, quando presente, introduz uma corrente de ar no fundo do alimentador e remove a poeira e a palha mais leve antes de a massa de grãos atingir a primeira peneira.

Uma das grandes preocupações no projeto de uma máquina de limpeza é a eficiência de peneiramento. Basicamente, a eficiência é a qualidade de separação que a peneira fornece. Uma peneira trabalhando com eficiência inadequada poderá causar sérios problemas, como sobrecarga do circuito, baixa eficiência na limpeza do produto e aumento crescente do índice de perda do produto pela máquina.

2.2.1. Mecanismo de peneiramento das máquinas de limpeza

Segundo GREGG e FAGUNDES (1975), um fluxo uniforme e contínuo de sementes na peneiras é muito importante para se obter uma máxima eficiência. A eficiência depende fundamentalmente da taxa de alimentação, uma vez que ela decresce rapidamente em função do aumento desta taxa. No peneiramento, é preciso encontrar um ponto ótimo entre a eficiência e a taxa de alimentação do produto.

Em muitos casos em que não há possibilidade de aumentar a inclinação da peneira, adapta-se a ela um sistema de vibração. A vibração facilita o fluxo do material, porque diminui o ângulo de repouso e o atrito. Por vibração, a camada de material tende a desenvolver um estado fluido.

Conforme Welck, citado por COAN (1981), a vibração de uma caixa de peneiras é provocada por um mancal descentrado, excêntrico, o qual pode ser regulado para controlar a movimentação e separação das impurezas.

Para uma separação de qualidade, é necessário ter-se uma relação certa entre a amplitude e a frequência de vibração. É desejável que o produto, ao deslocar-se sobre a superfície de peneiramento, tenha o tempo mínimo necessário para que ocorra a sua estratificação sem sobrecarregar a peneira.

Nas peneiras inclinadas, o movimento de vibração é circular num plano vertical. A vibração levanta o material, produzindo a estratificação. As partículas deslocam-se sobre a superfície de peneiramento, devido ao impulso do movimento de vibração e à inclinação. De acordo com GREGG e FAGUNDES (1975), os lotes de sementes com ligeira diferença de peso específico exigem inclinação relativamente pequena, a fim de permitir que as sementes permaneçam maior tempo sobre a mesa, obtendo-se, conseqüentemente, melhor estratificação.

2.2.2. Sistema de ventilação das máquinas de limpeza

Segundo MESQUITA et al. (1977), a função básica de um ventilador é mover uma dada quantidade de ar por um sistema de ventilação a ele conectado. Ao ser acionado, o ar nele contido é centrifugado, recebendo incremento de energia, sendo o vazão criado no ventilador preenchido com novo ar, pela ação da pressão atmosférica, a uma velocidade suficiente para repor a quantidade que foi descarregada. Quando em movimento a uma dada rotação, o volume específico da massa de ar do ventilador é induzido e descarregado continuamente, sendo evidente que o volume total depende da rotação do ventilador.

A finalidade do ventilador em um processo de limpeza, conforme COAN (1981), é produzir uma corrente de ar que remova impurezas leves, palha, pó e sementes de peso específico inferior ao das normais. Essa separação, de acordo com TEIXEIRA (1995), é realizada tomando por base a diferença de velocidade terminal entre as impurezas e os grãos agrícolas.

2.3. Utilização do computador como ferramenta no projeto de máquinas

Além da determinação das características físicas dos produtos, a modelagem matemática pode ser ferramenta importante no desenvolvimento de uma máquina de separação. De acordo com Haghghi, citado por GARCIA (1998), o uso de computadores tem proporcionado o desenvolvimento de "protótipos virtuais", isto é, uma determinada máquina, ou sistema, é modelada, usando-se um programa computacional, e o seu comportamento é simulado sob diferentes condições de funcionamento, antes que ela entre em linha de produção. Isso tem diminuído os custos e o tempo necessário para projetar máquinas, pois reduz-se o número de protótipos a serem construídos e de testes experimentais a serem realizados.

A simulação de sistemas mecânicos (AMIROUCHE, 1992; HUAG, 1989; HUSTON, 1990; JALON e BAYO, 1993; KANE e LEVINSON, 1985; MURRAY et al., 1993; NIKRAVESH, 1987; ROBERSON e SCHWERTASSEK, 1988; SHABANA, 1989), a análise por elementos finitos (LOGAN, 1992; KNIGHT, 1993; HUEBNER et al., 1995; BICKFORD, 1994; SEGERLIND, 1984; COOK, 1995; REDDY, 1993) e a modelagem de sólidos são técnicas que vêm sendo cada vez mais utilizadas no desenvolvimento e na análise de máquinas agrícolas. O aumento da velocidade e capacidade de processamento dos computadores e a necessidade de estudos de máquinas sofisticadas são os principais fatores que contribuíram para o desenvolvimento dessas técnicas de análise e projeto de máquinas.

A simulação de sistemas mecânicos consiste em dividir a máquina em corpos rígidos, que podem estar ou não interligados, usando juntas mecânicas que restringem os graus de liberdade do sistema. As equações de movimento são automaticamente geradas e resolvidas a partir de uma análise cinemática ou dinâmica do sistema. A simulação de sistemas mecânicos pode se transformar, então, em importante ferramenta para o desenvolvimento dos mecanismos que compõem uma máquina de separação (NORTON, 1992).

A análise por elementos finitos consiste na divisão de um corpo utilizando uma malha de elementos e usando funções aproximadas para descrever o comportamento das variáveis envolvidas no problema. Segundo SEGERLIND (1984), essa técnica é utilizada para análise de tensões e para

problemas envolvendo transferência de calor, mecânica dos fluidos e outras aplicações. No desenvolvimento de máquinas de separação, a análise por elementos finitos pode ser aplicada na realização de análise de tensão, para o projeto dos componentes, e na análise de mecânica dos fluidos, para o projeto do sistema de separação por ar.

2.4. Propriedades e características físicas do grão

Para o desenvolvimento de máquinas de separação, é importante conhecer as propriedades e características físicas dos produtos a serem separados. A forma irregular dos grãos agrícolas dificulta as determinações das propriedades físicas, como dimensões, volume, peso específico e área frontal, o que, na opinião de Mohsenin, citado por PINHEIRO (1975), muitas vezes pode ser contornado associando-se ao produto uma forma conhecida. O conhecimento das características físicas do grão, segundo SILVA e LUCENA (1995), é essencial no projeto, na construção e na operação dos equipamentos de limpeza, secagem e armazenagem dos produtos agrícolas.

2.4.1. Velocidade terminal

Segundo SRIVASTAVA et al. (1993), o tamanho e a massa do grão são os parâmetros mais importantes na limpeza, sendo o fluxo de ar intimamente influenciado pela massa. Para o desenvolvimento adequado das máquinas de limpeza, é importante conhecer as características aerodinâmicas, como velocidade terminal e coeficiente de arrasto, dos produtos a serem separados.

Na separação dos grãos dos materiais estranhos contidos em um lote, é fundamental o conhecimento da velocidade terminal de cada um dos constituintes da mistura. De acordo com MOHSENIN (1970), uma partícula em queda livre, em um fluxo de ar ascendente, atingirá a velocidade terminal quando a força gravitacional (F_g), sendo $F_g = \text{peso} - \text{força de empuxo}$, se igualar à força de resistência de arraste (F_r). A velocidade terminal pode ser, então, calculada por meio da expressão:

$$m_p \cdot g \cdot \left[\frac{(r_p - r_f)}{r_p} \right] = \frac{1}{2} \cdot C \cdot A_p \cdot r_f \cdot V_t^2 \quad \text{eq. (1)}$$

ou

$$V_t = \sqrt{\frac{2W_p \cdot (r_p - r_f)}{r_p \cdot r_f \cdot A_p \cdot C}} \quad \text{eq. (2)}$$

em que

V_t = velocidade terminal (m/s);

m_p = massa da partícula (kg);

g = aceleração gravitacional (m/s²);

W_p = peso da partícula (N);

r_p = massa específica da partícula (kg/m³);

r_f = massa específica do ar (kg/m³);

C = coeficiente de arrasto (adimensional); e

A_p = área projetada da partícula, normal ao seu movimento em direção ao fluido (m²).

Através do conhecimento de velocidade terminal, Tiwari, citado por MOHSENIN (1970), empregou os princípios aerodinâmicos para investigar as possibilidades de separação pneumática de feijões de amostras de debulhas 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.

De acordo com DE BAERDEMAEKER e SEGERLIND (1974), a velocidade terminal de um produto pode ser determinada experimentalmente, colocando os materiais (grãos ou impurezas) para flutuar em uma corrente ascendente de ar. A velocidade necessária para o equilíbrio do material no

fluxo de ar constante é igual à da velocidade terminal do produto. Os fatores que afetam a velocidade terminal são a massa da partícula e o coeficiente de arrasto, sendo este uma função da forma da partícula.

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.

2.4.2. Coeficiente de arrasto

Segundo HENDERSON e PERRY (1976), uma partícula em queda livre alcançará uma velocidade constante, ou velocidade terminal, a qual depende das características físicas da partícula, do fluido no qual ela está se deslocando e da força de aceleração. Esta característica de partícula é útil em separação pneumática.

Estudos com esferas, discos e cilindros mostraram uma relação distinta entre o coeficiente de arrasto C da eq. (2) e o número de Reynolds, que variam com as formas geométricas das partículas.

$$N_R = \frac{V_t \cdot d \cdot \rho_f}{\mathbf{h}} \quad \text{eq. (3)}$$

em que

N_R = número de Reynolds (adimensional);

d = média geométrica do diâmetro do corpo (m); e

\mathbf{h} = viscosidade absoluta do ar (N.s/m²).

Para um corpo arredondado, essa combinação entre o coeficiente de arrasto e o número de Reynolds ($C \cdot N_R^2$) pode ser determinada pela equação (4).

$$C \cdot N_R^2 = \frac{8W \cdot r_f \cdot (r_p - r_f)}{p \cdot h^2 \cdot r_p} \quad \text{eq. (4)}$$

Tennes, citado por MOHSENIN (1970), determinou várias propriedades físicas, inclusive velocidades terminais, para duas variedades de cerejas. Foram observadas diferenças consideráveis entre os valores experimentais e os valores teóricos das velocidades terminais das cerejas testadas. Uma razão para esta diferença foi a suposição da esfericidade das frutas. Ao considerar o valor corrigido da esfericidade da fruta, a relação dada por Pettyjohn e Christiansen em 1948, em função da esfericidade, foi usada para determinar o coeficiente de arrasto.

$$C = 5,31 - 4,88f \quad \text{eq. (5)}$$

em que

f = esfericidade (adimensional).

2.4.3. Esfericidade

O cálculo da esfericidade definida por Curray, citado por MOHSENIN (1970), é fundado no conceito geométrico da propriedade isoperimétrica de uma esfera de mesma forma e volume do sólido. A esfericidade de um objeto pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$f = \frac{d_e}{d_s} \quad \text{eq. (6)}$$

em que

d_e = diâmetro de uma esfera de mesmo volume do objeto; e

d_s = menor diâmetro da esfera circunscrita.

Assumindo que o volume do sólido é equivalente ao volume de um elipsóide triaxial e que o diâmetro da esfera circunscrita é igual ao maior eixo

do elipsóide (Figura 1), MOHSENIN (1970) determinou o grau de esfericidade através da média geométrica dos três eixos mutuamente perpendiculares do sólido pelo maior eixo, como segue:

$$f = \frac{\sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}}{a} \quad \text{eq. (7)}$$

em que

a = eixo maior (m);

b = eixo médio (m); e

c = eixo menor (m).

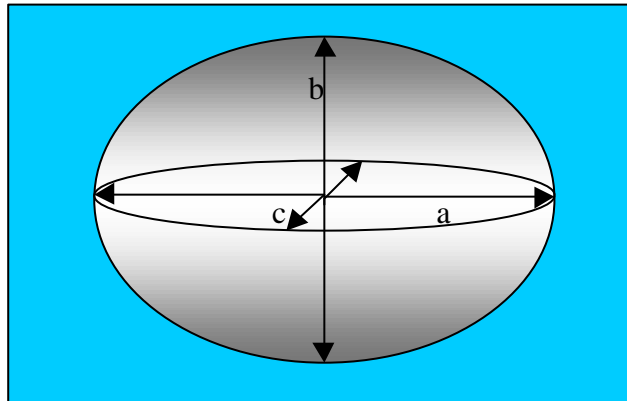


Figura 1 - Esquema de um elipsóide triaxial e seus eixos principais.

A esfericidade, segundo MOHSENIN (1970), pode também ser determinada por

$$f = \frac{d_i}{d_c} \quad \text{eq. (8)}$$

em que

d_i = diâmetro do maior círculo inscrito; e

d_c = diâmetro do menor círculo circunscrito.

2.4.4. Área projetada

Segundo JINDAL et al. (1974), há necessidade freqüente de informações sobre área superficial de vários produtos agrícolas, em fases diferentes de maturação em relação ao crescimento, para manipulação e processamento do produto. O valor superficial da área dos grãos é de aplicação direta na determinação da velocidade terminal do grão, em projeto de máquinas de limpeza, na simulação de taxas de secagens, etc.

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 classificar 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 1), Agrawal, citado por SOARES (1986), estimou o valor da área projetada pela seguinte equação:

$$A_p = \frac{P}{4} \cdot (a \cdot c) \quad \text{eq. (9)}$$

2.4.5. Massa específica

A massa específica aparente, segundo SILVA e LUCENA (1995), é usada tanto na comercialização de grãos quanto na solução de problemas referentes a aerodinâmica, dimensionamento de silos, secadores, depósitos e

sistemas de transporte. A massa específica aparente é também utilizada como parâmetro na avaliação da qualidade de alguns produtos e na estimativa dos danos causados por pragas aos grãos armazenados.

A razão entre a massa de uma amostra de grãos e o volume por ela ocupada é denominada massa específica aparente, enquanto a real é definida como a razão entre a massa de um grão e o seu volume. O volume aparente compreende o volume ocupado pelo produto mais o volume ocupado pelo ar. O volume real é constituído apenas pelo volume ocupado pelos frutos.

Os métodos mais conhecidos para a determinação da massa específica real envolvem o deslocamento do líquido ou do ar entre os frutos. De acordo com MOREIRA et al. (1985), a metodologia de complementação de volume (ou deslocamento do líquido) tem a vantagem de requerer equipamentos comuns de laboratório (balão volumétrico, balança, etc.), enquanto os que envolvem deslocamento de ar requerem equipamentos especiais, como os picnômetros (MOHSENIN, 1970).

2.4.6. Forma e tamanho

O beneficiamento dos grãos é feito baseando-se nas diferenças entre características e propriedades físicas existentes entre os grãos e as impurezas. Essas diferenças entre os grãos e as impurezas têm que ser significativas para separar os grãos satisfatoriamente. A separação por peneira (peneiras e ventiladores) só é possível entre materiais que apresentem diferenças que possam ser detectadas pelos equipamentos (CARVALHO e NAKAGAWA, 1983). As máquinas de beneficiamento são construídas para trabalharem com base em uma (ou mais) destas diferenças.

As diferenças de tamanhos e de formas são uma das características mais usadas para a separação entre grãos, e entre grãos e impurezas. O tamanho do grão é definido pelas três dimensões (comprimento, largura e espessura) e, conforme a espécie, a caracterização é feita com maior ou menor segurança (PIZA e CURI, 1986).

A determinação da forma do grão através da comparação visual entre a sua forma e as formas-padrões é considerada uma técnica muito simples, mas bastante questionada, em razão de sua subjetividade (MOHSENIN, 1970).

2.5. Avaliação do desempenho de máquina agrícola

MIALHE (1974) descreve que o desempenho operacional é um conjunto de informações que abrange termos qualitativos e quantitativos do trabalho desenvolvido pela máquina. O desempenho operacional é caracterizado pela potência requerida para acionamento, velocidade de trabalho e aspectos relacionados com regulagens, reparos, manutenção e estabilidade da máquina agrícola, quando executa operações sob determinadas condições de trabalho.

A capacidade de produção da máquina, ou seja, seu trabalho produtivo ou "produção", é medida em termos de peso ou volume de produto em um determinado tempo.

$$C_p = \frac{P_{pt}}{T} \quad \text{eq. (10)}$$

em que

C_p = capacidade de produção da máquina (kg/h);

P_{pt} = peso do produto trabalhado (kg); e

T = tempo de trabalho (h).

O peso ou volume de produto trabalhado refere-se ao peso ou volume de produto que sai da máquina.

A habilidade que as máquinas têm em executar operações agrícolas segundo certos padrões qualitativos é avaliada através de parâmetros de eficácia operacional. O desempenho operacional da maquinaria agrícola abrange, além dos aspectos quantitativos expressos pela capacidade de produção, os aspectos qualitativos do trabalho executado e o índice de perda do produto.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado na Universidade Federal de Viçosa, nos Laboratórios de Armazenamento e de Mecanização Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA).

3.1. Determinação das características e propriedades físicas dos frutos de café

Foram conduzidos testes experimentais para avaliação dos frutos de café, no sentido de caracterizar as propriedades físicas e aerodinâmicas do produto. Utilizaram-se frutos de café da espécie *Coffea arabica L.*, da variedade Catuaí vermelho e Híbrido Timor do cruzamento da espécie *Coffea arabica L.* e *Coffea canephora L.* O Catuaí vermelho e o Híbrido Timor eram provenientes da área experimental do Departamento de Fitopatologia da UFV. Foram feitos dois testes, sendo o primeiro com o Híbrido Timor e o segundo com o Catuaí vermelho. Para cada teste experimental, os frutos de café foram colhidos de derriça no pano, sendo submetidos a um processo de classificação e separados na categoria cereja. As seguintes características dos frutos de café cereja foram determinadas: umidade, massa específica real, massa específica aparente, ângulo de repouso, forma e tamanho, peso, esfericidade, coeficiente de arrasto, área projetada, volume e velocidade terminal.

3.1.1. Umidade

As características e propriedades físicas dos frutos de café foram determinadas, para cada teste, em função do teor de umidade. Foi utilizado o método de estufa (BRASIL, 1992) para determinar a umidade, através de uma estufa da marca FANEM, modelo 315 SE, à temperatura de 105 °C, até peso constante. Após a caracterização das propriedades físicas e aerodinâmicas, os frutos de café eram postos em terreiro de cimento e secados, para a obtenção de uma nova umidade. Foram determinadas para cada teste as características e propriedades físicas dos frutos de café para cinco teores de umidade diferentes. Os valores dos teores de umidade dos frutos de café cereja variaram de 70,4 a 11,1%.

3.1.2. Massa específica real

A massa específica real do fruto de café foi determinada pelo método de complementação de volume, desenvolvido por MOREIRA et al. (1985), usando como líquido, nas determinações, o tolueno (massa específica igual a 852 kg/m³).

Uma amostra de 20 frutos de café escolhidos aleatoriamente era pesada. A seguir, utilizava-se uma proveta de 100,0 ± 0,5 ml de capacidade, onde eram adicionados 50 ml de tolueno. Após, colocavam-se os 20 frutos de café e fazia-se a leitura do volume final na proveta. Os volumes dos grãos eram obtidos pela diferença entre o volume final e o volume inicial.

A massa específica real dos frutos foi, então, determinada pela relação entre a massa dos frutos de café e o volume. Foram feitas três repetições para cada teste.

3.1.3. Massa específica aparente

A determinação da massa específica aparente dos frutos de café foi realizada utilizando-se um equipamento da marca Dallemole, esquematizado na Figura 2. A capacidade do cilindro inferior era de 1 litro. Foram utilizadas três repetições para cada teste.

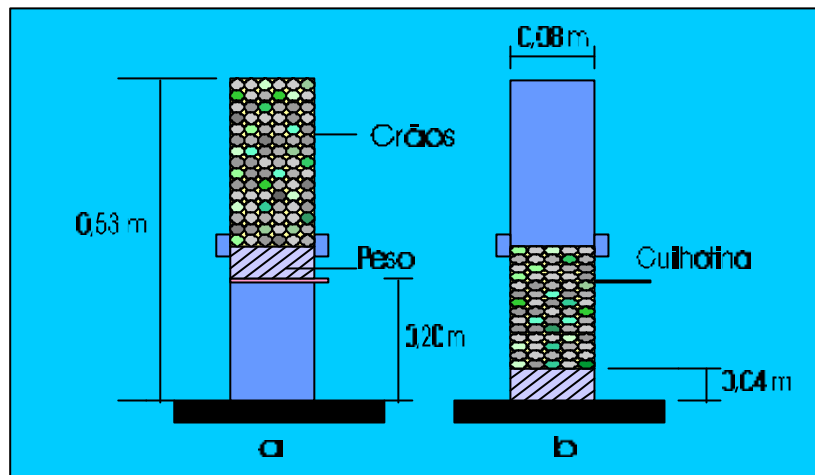


Figura 2 - Esquema do equipamento para determinar massa específica aparente.

3.1.4. Ângulo de repouso dos frutos

A determinação do ângulo de repouso dos frutos de café foi feita com três repetições, utilizando-se um protótipo que simula o estado natural de repouso de uma massa de frutos de café. O aparelho, cujo esquema é mostrado na Figura 3, constituiu-se de um recipiente de madeira, na forma de um paralelepípedo, com uma abertura na parte superior, por onde eram colocados os frutos de café, e uma porta lateral deslizante. Após o recipiente ser preenchido com os frutos de café até uma altura h , a porta lateral era aberta e o ângulo de repouso a era determinado pela equação

$$a = \arctg \left(\frac{y}{26,5} \right) \quad \text{eq. (11)}$$

em que

a = ângulo de repouso (graus); e

y = altura dos frutos de café em repouso (cm).

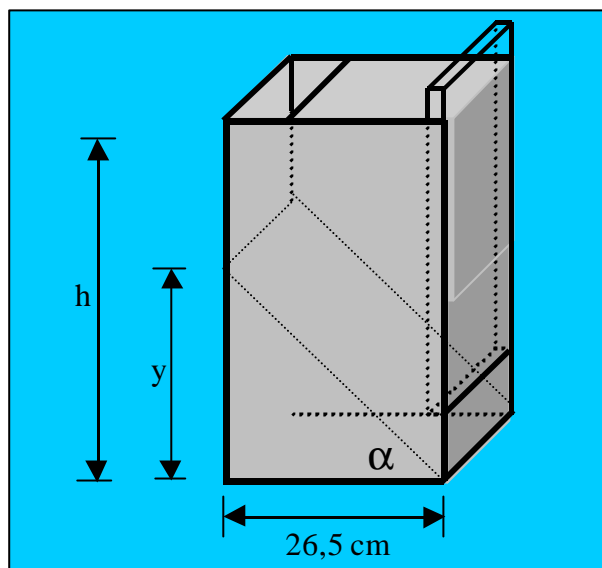


Figura 3 - Esquema do equipamento utilizado para determinar o ângulo de repouso dos frutos de café.

3.1.5. Tamanho e forma dos frutos

O tamanho e a forma dos frutos foram determinados a partir das dimensões dos três eixos principais do fruto de café, conforme esquema mostrado na Figura 1. Para determinar as dimensões dos eixos principais dos frutos de café, foi utilizado um paquímetro com capacidade de leitura de 140 mm e escala subdividida com precisão de 0,05 mm.

Para cada teste, dez frutos de café, escolhidos aleatoriamente, após terem as dimensões dos três eixos principais determinadas, eram individualmente pesados numa balança com precisão de 0,01g.

Os valores das dimensões de cada um dos três eixos principais dos frutos, obtidos experimentalmente, foram usados para o cálculo do intervalo de confiança, conforme descrito por MENDENHALL e SINCICH (1992):

$$I_c = \bar{X} \pm t_{0,025} \cdot \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad \text{eq. (12)}$$

em que

I_c = intervalo de confiança da dimensão do fruto de café;

$t_{0,025}$ = valor crítico para distribuição de Student para α igual 0,025;

\bar{X} = dimensão média de cada eixo;

s = desvio-padrão da dimensão de cada eixo; e

n = número de repetições.

3.1.5.1. Esfericidade

A esfericidade foi determinada utilizando-se as dimensões dos três eixos principais, determinadas experimentalmente, e a equação (7).

3.1.5.2. Área projetada

Considerando as dimensões dos frutos caracterizadas na Figura 1, o valor da área projetada foi determinado pela equação (9).

3.1.5.3. Volume do fruto de café

O volume dos frutos de café foi calculado em função dos três eixos principais e pela equação do volume de um elipsóide descrito por SPIEGEL (1973):

$$Vol = \frac{\pi}{6} \cdot (a \cdot b \cdot c) \quad \text{eq. (13)}$$

em que

Vol = volume do fruto de café (m^3).

3.1.6. Velocidade terminal experimental

Para a determinação da velocidade terminal, utilizou-se um dispositivo constituído de um ventilador centrífugo que fornecia um fluxo de ar ascendente, cuja vazão de ar era regulável. Este dispositivo foi acoplado a um tubo de

acrílico transparente de 93 mm de diâmetro e 2,0 m de comprimento. A amostra do fruto de café era disposta em um compartimento telado, posicionado a 1,0 m da extremidade superior do tubo de acrílico. A amostra foi submetida a um fluxo de ar, que era aumentado até a flutuação e o equilíbrio dos frutos de café na corrente de ar. A seguir, a velocidade do ar era determinada utilizando-se um anemômetro de fio quente, analógico, da marca KURZ, modelo série 440.

As determinações experimentais das velocidades terminais dos frutos de café das variedades Catuaí e Híbrido Timor foram efetuadas utilizando-se amostras contendo 1, 5 e 10 frutos de café. Para cada amostra foram realizadas três repetições.

3.1.7. Coeficiente de arrasto

O coeficiente de arrasto foi determinado utilizando-se a equação (1) e os valores de velocidade terminal determinados experimentalmente.

3.1.8. Velocidade terminal calculada

Para calcular a velocidade terminal de um grão, é necessário conhecer a relação entre o número de Reynolds e o produto do coeficiente de arrasto pelo quadrado do número de Reynolds. Essa relação foi obtida realizando-se uma análise de regressão dos dados apresentados por MOHSENIN (1970) para corpos arredondados, tendo sido obtida a seguinte equação:

$$N_R = 0,3127 \cdot (C \cdot N_R^2)^{0,5863} \quad R^2 = 0,9934 \quad \text{eq. (14)}$$

Para calcular a velocidade terminal, determinou-se primeiro o valor do produto do coeficiente de arrasto pelo quadrado do número de Reynolds, usando-se a eq. (4); depois, determinou-se o valor do número de Reynolds, usando-se a eq. (14); e, finalmente, determinou-se a velocidade terminal, usando-se a eq. (3).

3.2. Projeto da máquina

O projeto da máquina de pré-limpeza do café foi realizado com base nas características do produto determinadas experimentalmente. Para determinar o comportamento dinâmico da máquina, foi utilizado o programa computacional Working Model 3D, versão 4.0. O projeto e a construção da máquina foram baseados na utilização de fluxo de ar e peneiras, de acordo com o fluxograma de pré-limpeza mostrado na Figura 4.

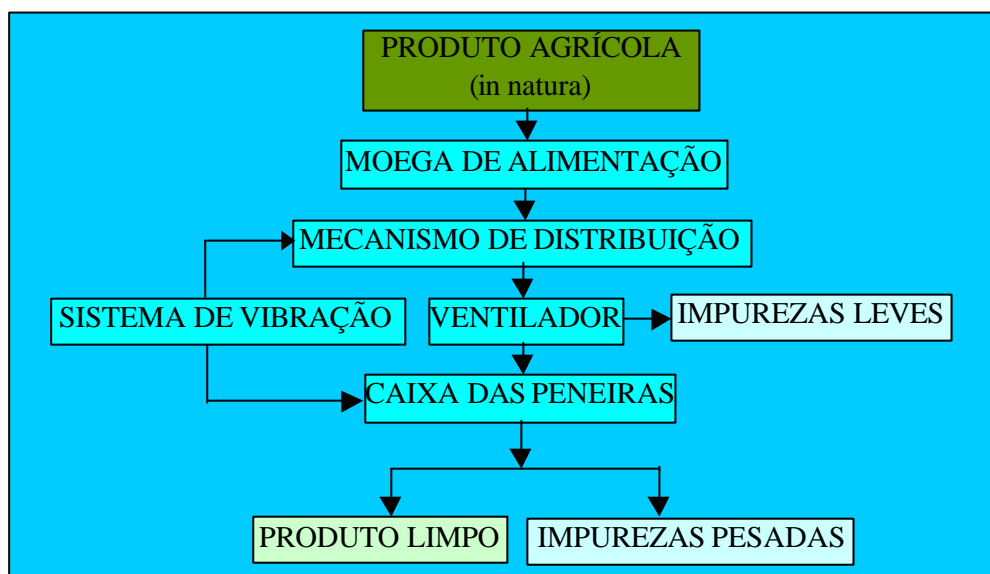


Figura 4 - Esquema do fluxo de produto e dos componentes da máquina projetada de pré-limpeza.

Nas Figuras 5, 6 e 7 são apresentados os esquemas do projeto da máquina de pré-limpeza de café. Esta máquina é constituída basicamente de um ventilador e de uma caixa com duas peneiras conectada a um sistema de vibração acionado por um eixo excêntrico.

3.2.1. Estrutura da máquina

A estrutura da máquina foi constituída de armação de perfis de aço carbono tipo cantoneira, de abas iguais de 50 mm. A altura da estrutura foi de

88,0 cm e a largura, de 70,0 cm. A armação da estrutura foi unida por solda elétrica.

3.2.2. Sistema de acionamento

Foi utilizado para o acionamento da máquina um motor de indução monofásico de 2 cv a 1.700 rpm, trabalhando com tensão de 220 V. O movimento do motor era transmitido ao eixo do rotor do ventilador. A relação de transmissão do motor ao eixo do ventilador foi de aproximadamente 1:1, e a relação de transmissão do eixo do ventilador ao eixo excêntrico foi de aproximadamente 1:0,24.

O motor foi fixado à estrutura da máquina por cantoneiras de abas iguais de 25 mm e parafusos de M10 x 1,5 com 38 mm de comprimento (Figura 5).

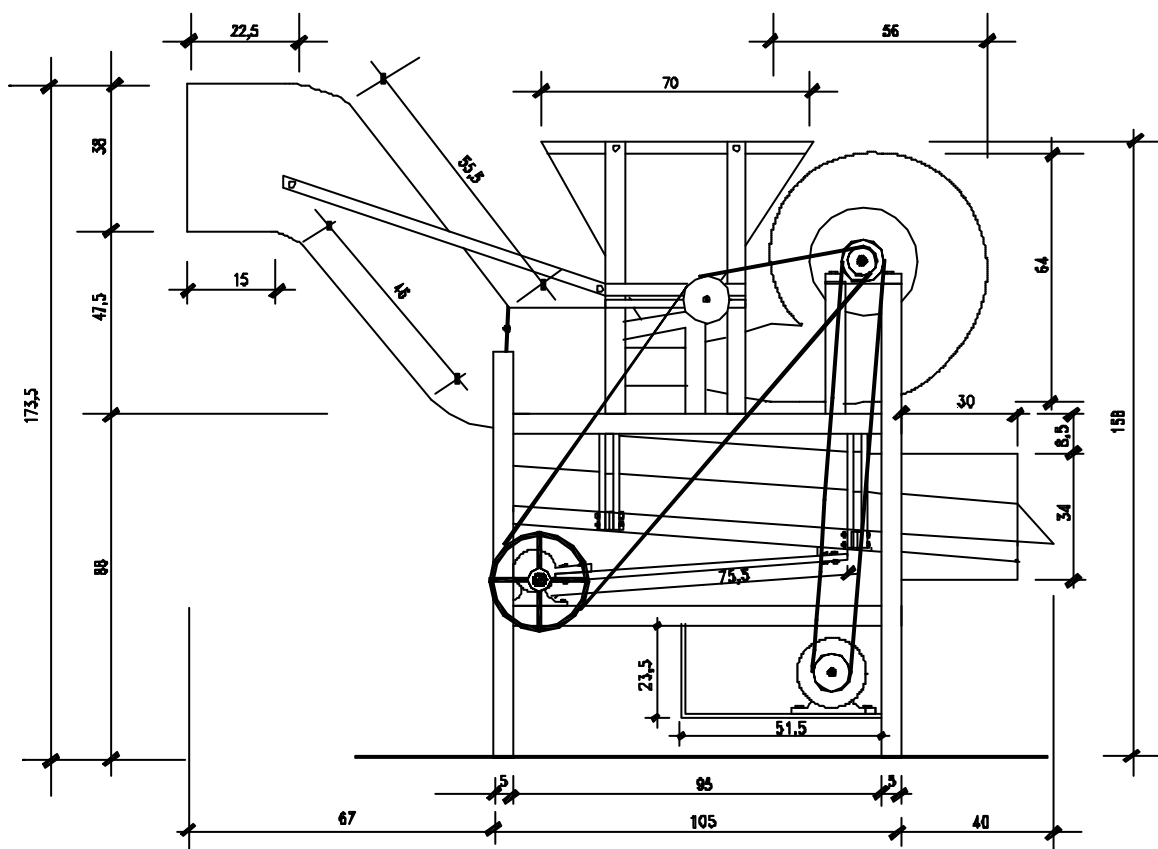


Figura 5 - Vista lateral da máquina de pré-limpeza de café projetada.

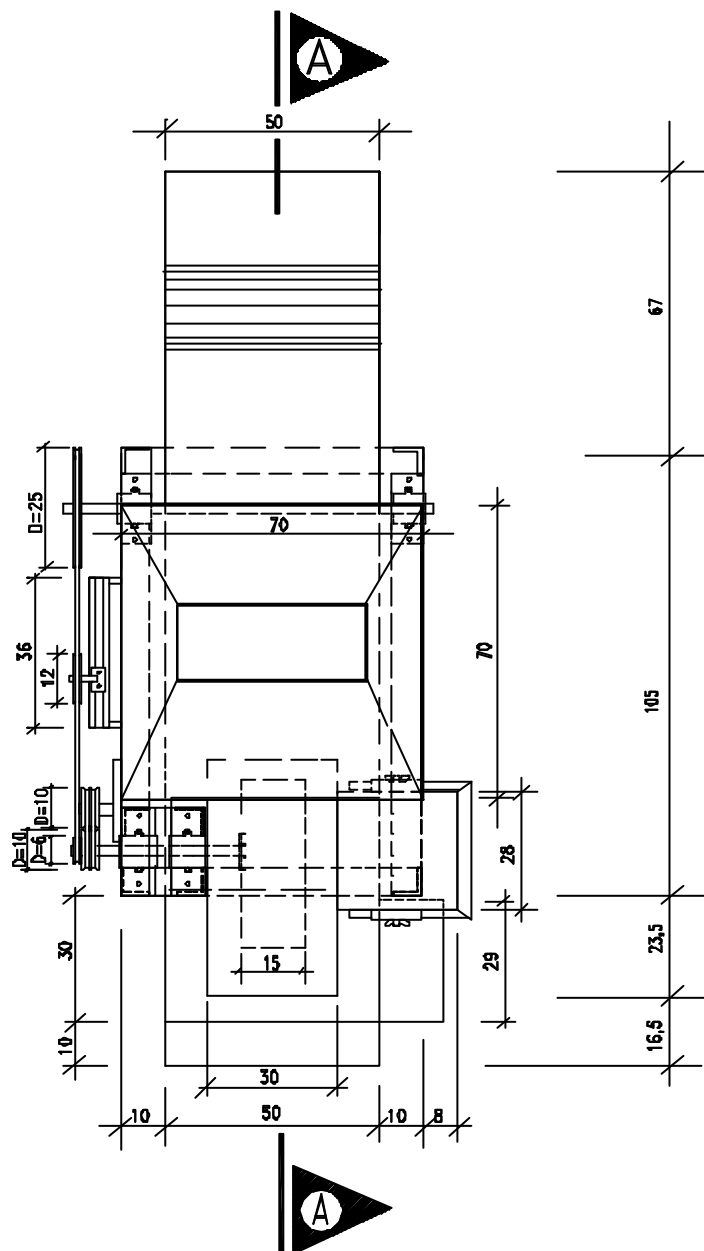


Figura 6 - Vista superior da máquina de pré-limpeza de café projetada.

3.2.4. Sistema de ventilação

O sistema de ventilação da máquina é dotado de um ventilador centrífugo. A vazão de ar do ventilador foi calculada com base nas propriedades aerodinâmicas do fruto de café. As paredes laterais do ventilador foram construídas de chapa nº 14, e o envoltório, de chapa nº 16. O ventilador foi fixado por perfis de aço carbono, tipo cantoneira, de abas iguais de 50 mm e parafusos de M10 x 1,5 com 38 mm de comprimento, conforme mostrado nas Figuras 6 e 7.

A entrada do fluxo de ar, cujo comprimento é de 280 mm, foi construída de chapa nº 16. Um dispositivo na forma de um cone foi usado para regular o fluxo de ar na entrada do ventilador.

Um duto de saída de ar do ventilador foi construído de chapa nº 16, com 500 mm de comprimento. A abertura inicial do duto foi construída com 300 mm de largura e 200 mm de altura, tendo no final a largura de 440 mm e altura de 100 mm. O duto tem a função de direcionar o fluxo de ar por baixo da plataforma (Figura 7). A finalidade do direcionamento do fluxo de ar, por baixo da plataforma de queda do café, é a de separar os frutos de café das impurezas leves. Estas impurezas são expurgadas através de um duto de chapa nº 16 e comprimento de 715 mm. A abertura inicial do duto foi construída com altura de 270 mm e largura de 500 mm, tendo no final a altura de 380 mm e a mesma largura (Figuras 6 e 7). O duto foi fixado na estrutura da máquina por barras chatas de 50 mm e parafusos de M8 x 1,25 com 25 mm de comprimento.

O rotor do ventilador (400 mm de diâmetro e 150 mm de largura) é dotado de 10 pás e foi fixado à estrutura da máquina por um eixo de aço carbono maciço de 400 mm de comprimento e 25,4 mm de diâmetro. Esse eixo foi fixado por dois mancais de rolamento, da marca NSK, modelo SN 506, fixados por parafusos (M12 x 1,75, com 65 mm de comprimento) à estrutura da máquina, conforme esquema da Figura 6.

3.2.5. Curva característica do sistema de ventilação

A curva característica do sistema de ventilação foi determinada utilizando-se um duto construído em chapa de aço galvanizada e conectado à entrada de ar do ventilador. Esse duto tinha um diâmetro de 280 mm e comprimento de 2.800 mm. No interior deste duto foi colocado um homogeneizador de fluxo de ar, construído de chapa de aço galvanizada, no formato de uma colméia. O homogeneizador foi posicionado a uma distância de 84,0 cm da entrada de ar. Uma válvula cônica, tipo gaveta, de chapa de aço galvanizada, acionada manualmente, foi instalada na entrada de ar do duto, com a função de variar o fluxo de ar.

As leituras das pressões totais e dinâmicas foram feitas com um tubo de Pitot, acoplado a dois manômetros diferenciais de tubo inclinados, da marca Dwyer, com precisão de 0,5 mmca. As leituras foram feitas a uma distância de 196,0 cm da entrada de ar do duto, com cinco variações do fluxo de ar. A primeira leitura foi feita com a válvula cônica do duto totalmente fechada. Depois foram feitas três variações do fluxo de ar e, na última leitura, com a válvula totalmente aberta. Em um manômetro eram feitas as leituras das pressões totais e, no outro, as de pressões dinâmicas. As posições do tubo de Pitot para as leituras das pressões totais e dinâmicas no interior do duto, conforme a metodologia descrita por MACINTYRE (1988), encontram-se esquematizadas na Figura 8.

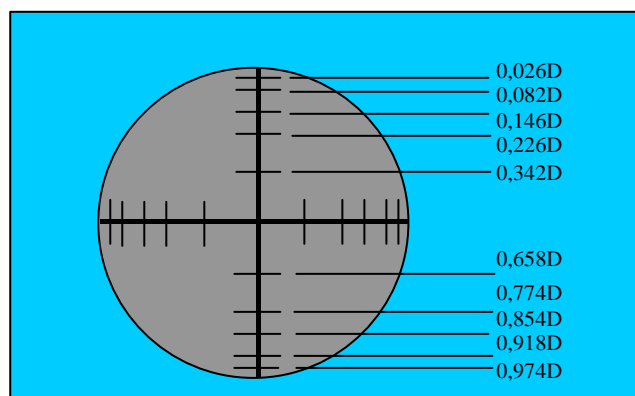


Figura 8 - Posições de leituras para o tubo de Pitot em duto circular.

Após as leituras das pressões totais e dinâmicas, a velocidade do ar foi determinada através da equação

$$V = 4,043 \cdot \sqrt{P_d} \quad \text{eq. (15)}$$

em que

V = velocidade do ar (m/s); e

P_d = pressão dinâmica (mmca).

E a vazão de ar do ventilador foi calculada, usando-se a seguinte equação:

$$Q = V \cdot S \quad \text{eq. (16)}$$

em que

Q = vazão do ventilador (m³/s); e

S = área da seção do duto (m²).

3.2.6. Caixa das peneiras

A caixa das peneiras, posicionada no interior da estrutura da máquina, foi construída usando-se chapa nº 16. Esta caixa possui uma inclinação de 3,7 graus, conforme pode ser observado nas Figuras 5 e 7. O comprimento, a largura e a altura da caixa das peneiras são de 1.000, 500 e 270 mm, respectivamente. A caixa foi fixada à estrutura da máquina por lonas de borrachas flexíveis, com comprimento de 340 mm e largura de 80 mm (Figuras 5 e 7). A caixa das peneiras foi acoplada a um sistema de vibração acionado por um eixo excêntrico.

Foram realizadas simulações do movimento vibratório da caixa das peneiras, através do programa computacional Working Model 3D. Para as simulações, foram usadas as seguintes informações: posições iniciais da caixa das peneiras e do eixo excêntrico; dimensões da caixa das peneiras e do eixo excêntrico; velocidade angular do eixo excêntrico; e ângulos de inclinações da caixa das peneiras e do eixo excêntrico. Com base nesses dados, foram

determinadas as acelerações a que os frutos estariam sendo submetidos durante a passagem pela máquina (Figura 9).

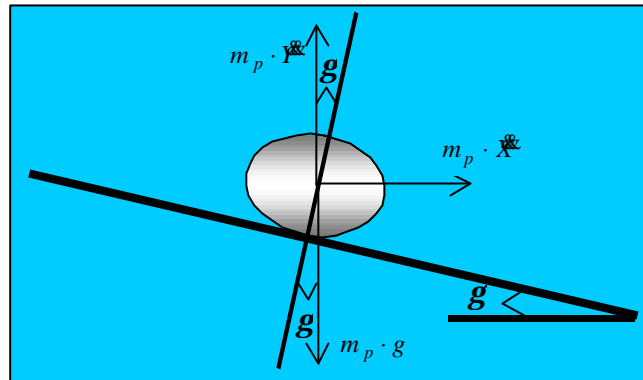


Figura 9 - Esquema das forças que atuam no fruto de café quando este está sobre a peneira da máquina de pré-limpeza.

Determinou-se também o coeficiente do modo de operação, definido por SPIVAKOVSKY e DYACHKOV (1985) pela equação

$$C_{om} = \frac{X \cdot \sin g + Y \cdot \cos g}{g \cdot \cos g} \quad \text{eq. (17)}$$

em que

C_{om} = coeficiente do modo de operação (adimensional);

Y = aceleração da peneira no sentido vertical (m/s^2);

X = aceleração da peneira no sentido horizontal (m/s^2); e

g = ângulo de inclinação da peneira (graus).

O coeficiente do modo de operação determina o comportamento do fluxo de frutos sobre a peneira. Para que o fruto deixe a peneira, é necessário que o coeficiente do modo de operação seja maior que 1. Quanto maior o valor de C_{om} , maior é a capacidade de transporte do sistema de vibração.

No interior da caixa foram posicionadas duas peneiras, dispostas uma sobre a outra em posições paralelas ao fundo da caixa. As peneiras foram constituídas de chapas de aço carbono perfuradas, no formato retangular, com

dimensões de 1.000 por 500 mm. Os furos circulares foram de 20 mm para a peneira superior e 6 mm para a peneira inferior. As peneiras foram fixadas nas paredes da caixa por cantoneiras de abas iguais de 25 mm e parafusos M5 x 0,8 com 16 mm de comprimento. As funções das peneiras foram de transportar os frutos de café através do movimento de vibração e da inclinação da caixa, enquanto ocorria, simultaneamente, a separação dos frutos de café das impurezas.

Na extremidade lateral inferior da caixa, foi posicionada uma bica de ensaque dos frutos de café (Figura 7), construída de chapa nº 14, com duas saídas, uma para os frutos de café e a outra para as impurezas retidas na peneira superior e no fundo da caixa. A bica de ensaque foi conectada à caixa das peneiras por cantoneiras de abas iguais de 25 mm e parafusos M8 x 1,25 com 25 mm de comprimento.

3.2.7. Sistema de vibração

Um sistema de vibração constituído de um eixo excêntrico foi instalado abaixo da caixa das peneiras, posicionado na parte inferior da estrutura da máquina (Figuras 5 e 7). Foi composto de um eixo de aço carbono maciço de 30 mm de diâmetro e 850 mm de comprimento. O eixo excêntrico foi conectado à caixa das peneiras por uma haste de madeira com 755 mm de comprimento, 50 mm de largura e 25 mm de espessura. O sistema de vibração foi fixado por dois mancais de rolamento da marca NSK, modelo SN 507. Os mancais foram fixados à estrutura da máquina por parafusos M12 x 1,75 com 65 mm de comprimento (Figuras 6 e 7).

O movimento de vibração é acionado através de uma polia simples (60 mm) acoplada ao eixo do ventilador. A transmissão do eixo do ventilador para uma polia simples (250 mm), acoplada ao eixo excêntrico, foi feita através de uma correia de perfil A (Figuras 5 e 6). Essa configuração fazia com que o eixo excêntrico girasse a 408 rpm. O acionamento do movimento de rotação do eixo excêntrico ocasionou, na caixa das peneiras, um movimento no sentido horizontal, com um percurso de 13 mm. Na Figura 10 são mostrados os ângulos de inclinações do eixo excêntrico e da caixa das peneiras e as dimensões do sistema de vibração do eixo excêntrico.

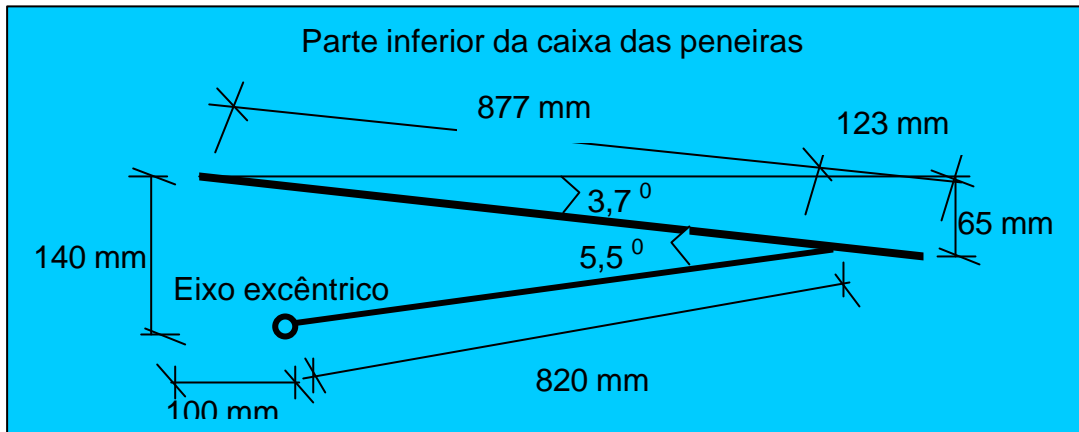


Figura 10 - Esquema do sistema de vibração do eixo excêntrico.

3.2.8. Simulação da trajetória dos frutos entre a saída da moega e a peneira

A trajetória dos frutos de café entre a saída da moega e a superfície da peneira superior foi simulada de forma a verificar se os frutos não seriam lançados para fora da máquina no momento da queda. Para isso, fez-se um balanço das forças que atuam no fruto no momento da queda e foram consideradas a força peso e empuxo agindo verticalmente e a força de arrasto produzida pelo fluxo de ar do ventilador agindo horizontalmente, conforme esquematizado na Figura 11.

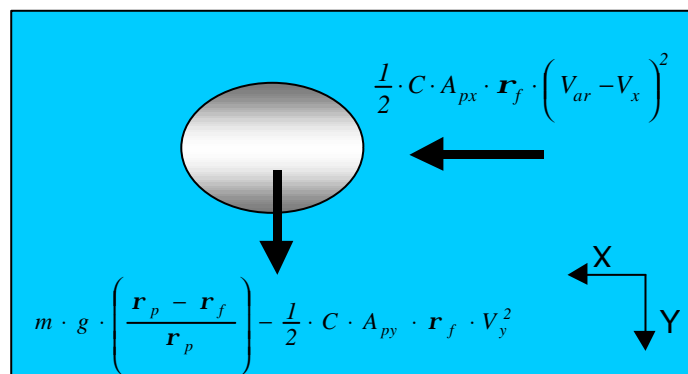


Figura 11 - Esquema das forças atuando no fruto de café durante a queda, na máquina de pré-limpeza.

Com base nesse balanço de forças, foram obtidas as equações para o cálculo da aceleração nas direções horizontal e vertical.

$$\ddot{Y} = g \cdot \left(\frac{r_p - r_f}{r_p} \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{C \cdot A_{py} \cdot r_f \cdot V_Y^2}{m_p} \quad \text{eq. (18)}$$

em que

V_Y = velocidade do fruto na direção vertical (m/s); e

A_{py} = área projetada da partícula em relação à direção Y (m²).

$$\ddot{X} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot A_{px} \cdot r_f \cdot \frac{(V_{ar} - V_X)^2}{m_p} \quad \text{eq. (19)}$$

em que

V_X = velocidade do fruto na direção horizontal (m/s);

V_{ar} = velocidade do ar no ventilador (m/s); e

A_{px} = área projetada da partícula em relação à direção X (m²).

Para obter a trajetória do fruto, integraram-se as equações 18 e 19, considerando-se que o fruto estava em repouso no início da queda.

3.3. Matéria-prima usada na avaliação do desempenho da máquina

A matéria-prima utilizada nos dois primeiros testes experimentais constituiu-se de uma mistura das colheitas de café das variedades Catuaí, Mundo Novo, Catimor e Híbridos (cruzamentos de Mundo Novo e Catuaí x Híbrido Timor). Essa mistura foi proveniente da área experimental do Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Viçosa. Para o terceiro teste, utilizou-se unicamente a variedade Catuaí proveniente da Fazenda Mundial, no Município de Araponga/MG. As matérias-primas utilizadas nos testes foram colhidas por derriça no chão e no pano, uma vez que esses processos de colheitas apresentam maiores problemas quanto à separação.

3.4. Ensaio preliminares de avaliação da máquina de pré-limpeza

Foram realizados ensaios preliminares com a finalidade de estabelecer as condições de trabalho da máquina em função da vazão de ar e do fluxo de descarga dos frutos de café. Foram avaliados o desempenho de separação das peneiras e o índice de perda dos frutos de café. A vazão de ar foi determinada utilizando-se um anemômetro de fio quente analógico da marca KURZ, modelo série 440. Após os ensaios preliminares, definiu-se que a vazão de ar e o fluxo de descarga dos frutos seriam os mesmos para todos os testes.

3.5. Avaliação da máquina de pré-limpeza

3.5.1. Caracterização da amostra

A matéria-prima, obtida na área experimental do Departamento de Fitopatologia, foi dividida em dois lotes, sendo um colhido de derriça no pano e o outro de derriça no chão. O terceiro lote foi colhido da Fazenda Mundial, através de uma mistura de derriça no pano e no chão.

Os lotes colhidos foram homogeneizados manualmente. Foram retiradas, aleatoriamente, nove amostras de cada lote e acondicionadas em sacas com capacidade de 60 kg. Cada lote foi utilizado em um teste com nove repetições e, de cada uma destas, foram retiradas quatro amostras para determinação da umidade.

Foram retiradas amostras para determinar e caracterizar o teor de impurezas dos lotes antes de passar pela pré-limpeza. Em seguida, essas amostras foram acondicionadas em embalagens plásticas de 2 kg e armazenadas em temperatura controlada, a 4 °C.

3.5.2. Desempenho da máquina

As sacas com capacidade de 60 kg foram pesadas antes da pré-limpeza numa balança da marca Filizola, modelo 160, com carga máxima de 500 kg e precisão de 200 gramas.

Os testes para a determinação do desempenho da máquina consistiram em abastecer a moega de alimentação com uma saca do produto; em seguida, abria-se a válvula de descarga dos frutos de café e regulava-se a vazão de ar do ventilador (ambos já definidos no ensaio preliminar). Somente depois ligava-se a máquina. Sempre que a máquina era ligada, dava-se o início da avaliação do seu desempenho. Conseqüentemente, o término da avaliação do desempenho da máquina ficou definido com o fim das quedas dos frutos na bica de ensaque. Durante a operação era cronometrado o tempo, utilizando-se um cronômetro da marca Hanhart com precisão de 0,10 segundo.

Durante o funcionamento da máquina, procedeu-se às aferições das rotações do eixo excêntrico, do motor e do ventilador. Foi utilizado nessa operação um tacômetro digital da marca MICROTEST, modelo L 20, com capacidade de leitura de até 20.000 rpm e com precisão de 1 rpm.

Após a pré-limpeza do produto, as sacas eram novamente pesadas; as amostras eram retiradas e acondicionadas em embalagens plásticas de 2 kg. Estas amostras foram utilizadas para determinar a eficiência de separação da máquina em função dos teores de impurezas no café, antes e após a pré-limpeza.

3.5.2.1. Capacidade de separação

A capacidade de separação foi obtida dividindo-se o peso dos frutos de café depois da pré-limpeza pelo tempo de funcionamento da máquina, usando-se a seguinte equação:

$$C_s = \left(\frac{P_{fs}}{T_s} \right) \quad \text{eq. (20)}$$

em que

C_s = capacidade de separação (kg/h);

P_{fs} = peso dos frutos de café separados (kg); e

T_s = tempo de separação (h).

3.5.2.2. Índice de perda por deficiência de separação

Após a homogeneização do material eliminado como impureza em cada teste, retirava-se uma amostra de aproximadamente 2 kg para ser submetida a uma avaliação de deficiência de separação. Posteriormente, foram retirados os frutos de café contidos nessa amostra e foi determinada a porcentagem dos frutos. Dessa porcentagem dos frutos de café contidos na amostra, determinou-se o peso dos frutos não separados pela máquina no total de impureza; e o índice de perda por deficiência de separação foi determinado pela equação (21).

$$I_{pd} = \left(\frac{P_{fns}}{P_{tf}} \right) \cdot 100 \quad \text{eq. (21)}$$

em que

I_{pd} = índice de perda (%);

P_{fns} = peso dos frutos de café não separados pela máquina (kg); e

P_{tf} = peso total dos frutos de café (kg).

3.5.2.3. Consumo de energia por quilograma de frutos separados

A tensão do motor em funcionamento foi determinada utilizando-se um multímetro digital da marca Minipa, modelo ET2002. A intensidade da corrente elétrica de trabalho do motor foi determinada utilizando-se um alicate amperímetro analógico da marca Kyoritsu, modelo KEW SNAP 9, na escala de 0 a 15A. A potência multiplicada pelo tempo efetivo de trabalho forneceu o consumo de energia. Este, dividido pelo peso dos frutos de café após a pré-limpeza, resultou no consumo bruto de energia elétrica por quilograma de frutos de café. Foi desconsiderada a eficiência eletromecânica do motor. O consumo de energia foi determinado usando a seguinte equação:

$$C_e = \left(\frac{W \cdot T_e}{P_{fs}} \right) \quad \text{eq. (22)}$$

em que

C_e = consumo de energia por quilograma de frutos separados (kWh/kg);

W = potência de acionamento da máquina (W); e

T_{fs} = tempo efetivo para pré-limpeza (h).

3.5.2.4. Eficiência de separação da máquina

Foram utilizadas as amostras recolhidas durante os testes em embalagens plásticas de 2 kg, para a determinação do teor de impureza. As impurezas das amostras foram separadas manualmente, com auxílio de um agitador de peneiras da marca Ro-tap. As impurezas foram classificadas em terras, folhas e galhos. Após a separação e classificação das impurezas, estas eram pesadas em uma balança de precisão 0,01g. A eficiência de separação da máquina foi determinada em função do teor de impureza inicial (antes da pré-limpeza) e do teor de impureza final do produto (após a pré-limpeza), utilizando-se a equação (McCABE e SMITH, 1976):

$$E_s = \frac{(I_i - I_f) \cdot (I_e - I_i) \cdot I_e \cdot (1 - I_f)}{(I_e - I_f)^2 \cdot (1 - I_i) \cdot I_i} \quad \text{eq. (23)}$$

em que

E_s = eficiência de separação da máquina (adimensional);

I_e = teor de impureza no produto descartado pela máquina;

I_i = teor de impureza inicial; e

I_f = teor de impureza final.

Durante os testes de avaliação do desempenho da máquina de pré-limpeza, foram retiradas amostras antes e após a passagem pela máquina e determinadas as características e propriedades físicas dos frutos de café.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características e propriedades físicas dos frutos de café

4.1.1. Dimensões dos frutos de café

Nos Quadros 2 e 3 são apresentados os valores das dimensões dos três eixos principais dos frutos de café, com suas respectivas massas e o ângulo de repouso para os frutos com teores de umidade na faixa de 11,1% a 70,4%. Esses resultados foram determinados para as variedades de café Catuaí vermelho e Híbrido Timor.

Analisando os dados apresentados no Quadro 2, pode-se verificar que os frutos de café da variedade Timor tiveram redução média de 9,2% nas dimensões dos eixos principais quando o teor de umidade dos frutos foi reduzido de 62,6% para 11,1%. Para os frutos da variedade Catuaí vermelho, a redução média das dimensões dos três eixos principais foi de 20,7% quando o teor de umidade dos frutos foi reduzido de 70,4% para 13,3% (Quadro 3). Dentre os três eixos principais, o que sofreu menor redução de sua dimensão foi o maior eixo, e o que sofreu maior redução, o menor eixo.

Quadro 2 - Dimensões dos eixos principais, massa e ângulo de repouso dos grãos de café da variedade Híbrido Timor, como função do teor de umidade

Umidade (% b.u.)	Dimensões dos eixos principais (mm)						Massa (g)		Ângulo de repouso (graus)	
	a		b		c		Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão				
62,6	13,8	1,1	11,4	1,1	10,2	0,1	1,14	0,04	41,3	1,8
53,0	14,0	0,8	10,7	0,6	9,3	0,7	0,94	0,02	43,9	0,6
40,0	14,3	0,7	10,9	0,6	9,2	0,7	0,65	0,03	44,8	0,3
22,9	13,9	0,9	10,4	0,5	9,0	0,5	0,58	0,01	39,9	0,4
11,1	13,8	0,7	10,1	0,3	8,6	0,4	0,50	0,02	37,3	0,4

Quadro 3 - Dimensões dos eixos principais, massa e ângulo de repouso dos grãos de café da variedade Catuaí vermelho, como função do teor de umidade

Umidade (% b.u.)	Dimensões dos eixos principais (mm)						Massa (g)		Ângulo de repouso (graus)	
	a		b		c		Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão				
70,4	15,3	1,2	13,9	1,09	13,3	0,89	1,69	0,05	41,6	0,70
57,8	14,7	1,1	12,4	0,52	11,1	0,85	1,14	0,13	51,7	0,48
40,4	13,9	1,0	10,7	0,67	9,9	0,93	0,78	0,10	39,4	0,99
28,8	13,5	1,3	10,9	1,48	9,6	0,78	0,73	0,02	38,9	0,65
13,3	13,5	0,9	10,9	0,74	9,5	0,58	0,56	0,05	36,7	0,79

Analisando os dados relativos ao ângulo de repouso dos frutos de café apresentados nos Quadros 2 e 3, pode-se verificar que, à medida que o teor de umidade do café foi reduzido, o produto apresentou dois comportamentos distintos. Inicialmente, a redução do teor de umidade causou aumento do ângulo de repouso; depois que o produto teve sua umidade reduzida abaixo de um determinado valor, o ângulo de repouso decresceu com a redução do teor de umidade. O maior ângulo de repouso encontrado foi de 51,7°, obtido com a variedade Catuaí vermelho. Diante disso, a moega de alimentação da máquina

foi projetada com ângulo de inclinação de 60°, que é superior ao máximo ângulo de repouso obtido experimentalmente.

A partir dos dados apresentados nos Quadros 2 e 3, foram determinados intervalos de confiança para os valores críticos das dimensões dos três eixos principais, para um nível de probabilidade de 95%, os quais são apresentados no Quadro 4. Os dados relativos aos intervalos de confiança foram utilizados para determinar os diâmetros dos furos das peneiras superior e inferior da máquina de separação de impurezas. Verificou-se que o diâmetro dos furos da peneira superior deveria ser no mínimo de 16,2 mm e que o da peneira inferior deveria ter um diâmetro máximo de 8,3 mm. De acordo com esses resultados, existe a probabilidade de 95% de o produto passar pela peneira superior, e a mesma probabilidade de o produto ficar retido na peneira inferior. Foram adotados os diâmetros de 20,0 mm para a peneira superior e 6,0 mm para a peneira inferior, por serem os diâmetros comercialmente disponíveis que mais se aproximaram dos valores ideais.

Quadro 4 - Valores médios e intervalos de confiança para os três eixos principais dos frutos de café

Umidade (% b.u.)	Dimensão do fruto	Média da amostra (mm)	Desvio- padrão	IC (95%) (mm)
70,4	a	15,3	1,2	14,4 - 16,2
	b	13,9	1,1	13,1 - 14,7
	c	13,3	0,9	12,7 - 13,9
11,1	a	13,8	0,7	13,3 - 14,3
	b	10,1	0,3	9,9 - 10,3
	c	8,6	0,4	8,3 - 8,9

4.1.2. Volume e massas específicas aparente e real dos frutos de café

Nos Quadros 5 e 6 são apresentados os valores médios das massas específicas aparente e real obtidas, utilizando-se três amostras para cada variedade de café, com diferentes teores de umidade. Os resultados de massa

específica aparente foram utilizados para a determinação do volume da moega de recepção de produto da máquina. Optou-se por uma moega com capacidade para 100 kg, uma vez que esta é a capacidade máxima dos recipientes utilizados na colheita de café. Essa massa de café correspondeu a um volume de 0,17 m³ de café cereja.

Os valores de massa específica real, determinados experimentalmente pelo método do volume de líquido deslocado, são apresentados no Quadro 6. No Quadro 7 são apresentados os valores dos volumes determinados através da eq. (13), com base nos valores médios dos eixos principais de dez frutos de café, e a massa específica real, determinada com base na massa e no volume de cada fruto, para cada variedade, com diferentes teores de umidade. Pode-se verificar que os valores obtidos pelas duas metodologias são praticamente os mesmos. Com relação ao volume dos frutos, observou-se redução média de 46,7%, desde o maior até o menor teor de umidade.

Quadro 5 - Massa específica aparente para café em coco de diferentes variedades e teores de umidade

Variedade	Umidade (% b.u.)	Massa específica aparente (kg/m ³)	
		Média	Desvio-padrão
Catuaí	70,4	587,0	0,8
	57,8	524,5	3,5
	40,4	478,7	2,7
	28,8	414,4	1,2
	13,3	393,6	4,5
Híbrido Timor	62,6	555,3	9,4
	53,0	515,4	1,2
	40,0	473,3	7,1
	22,9	406,8	3,2
	11,1	400,2	6,3

Quadro 6 - Massa específica real determinada pelo método do volume deslocado, para café em coco de diferentes variedades e teores de umidade

Variedade	Umidade (% b.u.)	Massa específica real (g/cm ³)	
		Média	Desvio-padrão
Catuaí	70,4	1,12	0,02
	57,8	1,00	0,04
	40,4	0,91	0,03
	28,8	0,83	0,03
	13,3	0,73	0,02
Híbrido Timor	62,6	1,02	0,01
	53,0	0,94	0,01
	40,0	0,90	0,02
	22,9	0,81	0,07
	11,1	0,70	0,05

Quadro 7 - Massa específica real determinada com base no volume e na massa de cada grão, para diferentes variedades e teores de umidade

Variedade	Umidade (% b.u.)	Volume (cm ³)		Massa (g)		Massa específica real (g/cm ³)	
		Valor Médio	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
Catuaí	70,4	1,50	0,05	1,69	0,05	1,13	0,2
	57,8	1,15	0,08	1,14	0,13	0,99	0,2
	40,4	0,85	0,09	0,78	0,10	0,92	0,2
	28,8	0,88	0,02	0,73	0,02	0,83	0,4
	13,3	0,76	0,05	0,56	0,05	0,74	0,1
Híbrido Timor	62,6	1,02	0,03	1,14	0,04	1,12	0,3
	53,0	0,90	0,04	0,94	0,02	1,04	0,2
	40,0	0,61	0,04	0,65	0,03	1,07	0,1
	22,9	0,59	0,03	0,58	0,01	0,98	0,2
	11,1	0,57	0,06	0,50	0,02	0,88	0,1

4.1.3. Características aerodinâmicas do fruto de café

Nos Quadros 8 e 9 são apresentados os valores estimados para a velocidade terminal, usando-se a eq. (3), assim como os valores obtidos experimentalmente, utilizando-se amostras com um, cinco e dez frutos de café, com diferentes teores de umidade. São apresentados também os valores de coeficiente de arrasto, determinados a partir da velocidade terminal obtida experimentalmente com amostras contendo um fruto.

Analisando os dados apresentados nos Quadros 8 e 9, pode-se verificar que a velocidade terminal decresce com o teor de umidade do fruto. Os resultados obtidos para a velocidade terminal de amostras com diferentes números de grãos mostram uma tendência de redução dessa grandeza com o aumento do número de frutos. Na região com frutos em suspensão, deve ter ocorrido maior turbulência do ar, e a velocidade deste certamente era superior ao valor determinado experimentalmente, porque a presença dos frutos causa redução da área de passagem do ar.

Comparando os resultados de velocidade terminal calculados e os obtidos experimentalmente, pode-se verificar que os resultados calculados estiveram mais próximos dos valores experimentais obtidos com amostras de um fruto. Outro ponto observado é que o valor calculado foi sempre superior ao valor obtido experimentalmente. A explicação do fato deve estar associada às simplificações feitas para obtenção da equação para determinação da velocidade terminal, como por exemplo a suposição de que os frutos não giram durante o processo.

A vazão de ar do ventilador foi estabelecida de forma que a velocidade terminal do produto não fosse ultrapassada e que a trajetória do produto não caísse fora da área de peneira após receber a corrente de ar produzida pelo ventilador. Dessa forma, a vazão de ar adotada foi de $0,37 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalendo a uma velocidade da corrente de ar de $8,4 \text{ m/s}$. Para essa velocidade, a trajetória calculada, integrando-se as equações 18 e 19, para frutos com umidade de $11,1\%$, seria igual à esquematizada na Figura 12, o que garante que o produto não será arrastado para fora da área das peneiras, uma vez que entre o ponto de queda dos frutos e a extremidade existe uma distância livre de $0,08 \text{ m}$.

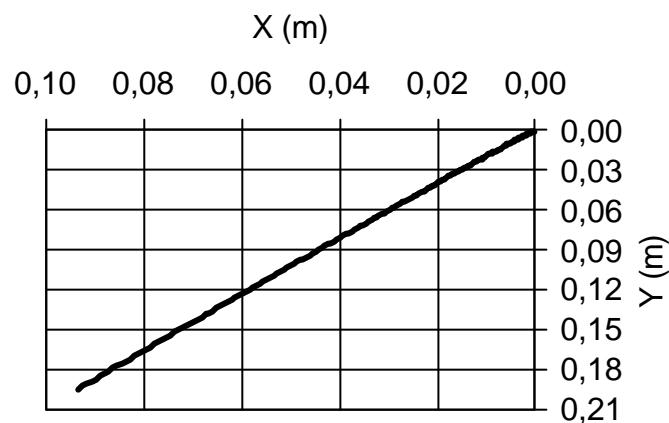


Figura 12 - Gráfico da trajetória dos frutos de café em queda na máquina de pré-limpeza.

4.2. Simulação do comportamento dinâmico do sistema de vibração da máquina

O sistema de vibração da máquina de limpeza foi simulado utilizando-se o programa computacional Working Model 3D. A máquina simulada foi constituída de sete corpos rígidos: a caixa das peneiras; quatro barras para conexão entre a caixa das peneiras e a estrutura da máquina; um sistema excêntrico; e um eixo que unia o excêntrico à caixa das peneiras. A rotação do eixo excêntrico foi de 408 rpm , e o ângulo de inclinação da caixa das peneiras foi de $3,7^\circ$ (Figura 13).

Na Figura 14 são apresentados os resultados simulados da aceleração das peneiras na direção horizontal. A aceleração variou entre $-11,10$ e $+10,90$ m/s^2 . O período de oscilação foi de $0,147$ segundos.

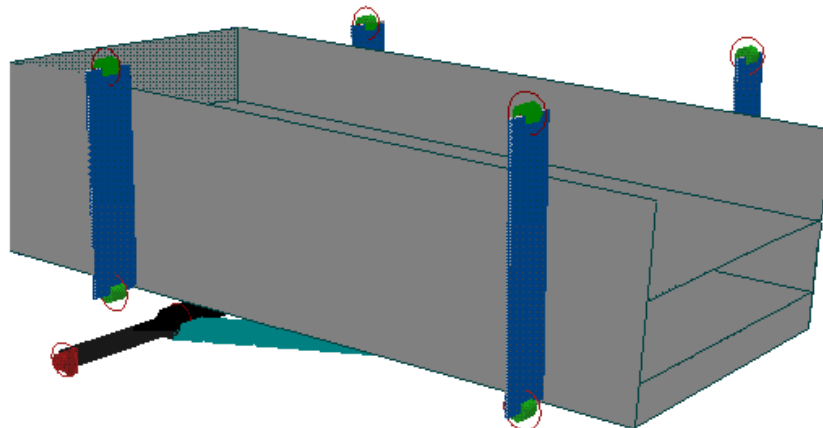


Figura 13 - Esquema utilizado para análise do sistema de vibração das peneiras da máquina de pré-limpeza.

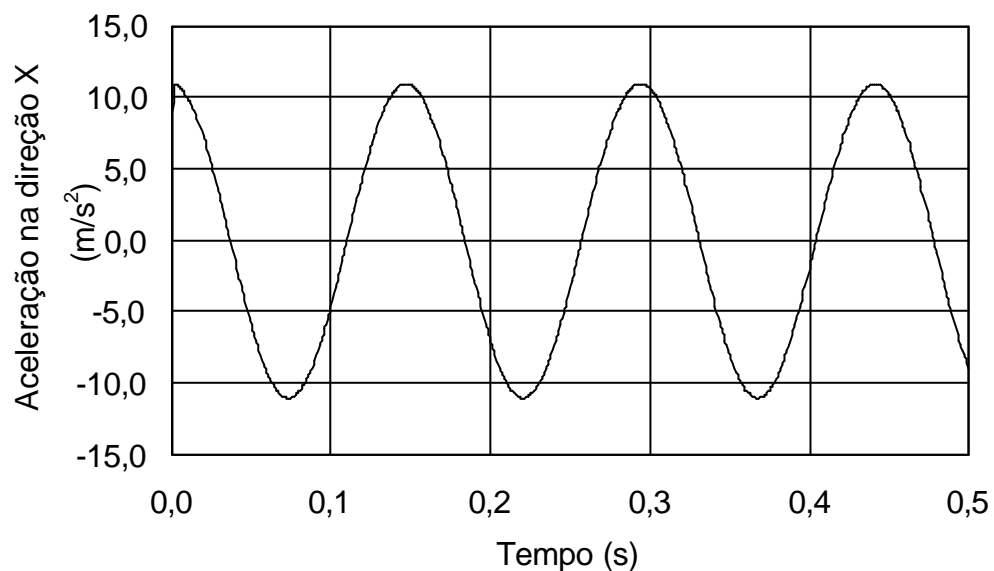


Figura 14 - Aceleração (\ddot{x}) da caixa de peneira como função do tempo, obtida com a utilização do programa Working Model.

Na Figura 15 são apresentados os resultados simulados da aceleração das peneiras na direção vertical. A aceleração nessa direção variou entre $-0,423$ e $+0,237$ m/s^2 . Em nenhum momento a aceleração vertical superou a aceleração da gravidade.

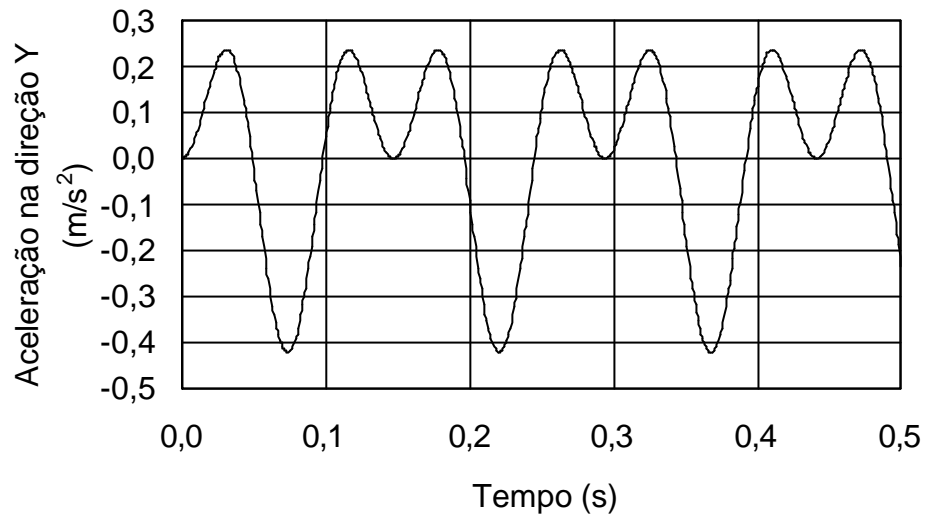


Figura 15 - Aceleração (~~Y~~) da caixa de peneira como função do tempo, obtida com a utilização do programa Working Model.

Na Figura 16 são apresentados os resultados simulados do coeficiente do modo de operação da peneira. Este coeficiente variou entre $-0,117$ e $+0,073$, o que significa que os frutos se mantêm em contato com a peneira durante todo o trajeto sobre a peneira. Um coeficiente do modo de operação menor que 1 significa que o produto terá maior tempo de residência dentro da máquina de pré-limpeza, o que contribui para melhor eficiência de limpeza. Como o café é um produto que apresenta elevados teores de impurezas no momento da colheita, este maior tempo de residência pode facilitar o processo de limpeza do produto.

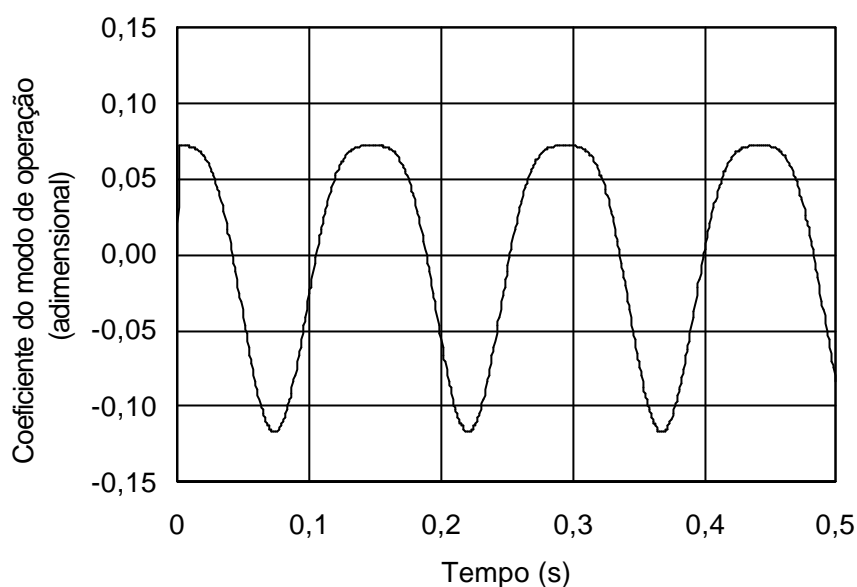


Figura 16 - Coeficiente do modo de operação da caixa de peneira como função do tempo, obtido com a utilização do programa Working Model.

4.3. Avaliação da capacidade e eficiência de separação da máquina de pré-limpeza

4.3.1. Características técnicas da máquina de pré-limpeza

No Quadro 10 são apresentadas as características técnicas da máquina de pré-limpeza.

Quadro 10 - Características técnicas da máquina de pré-limpeza

Característica	Valor
Peso total da máquina vazia	264 kg
Comprimento	2,12 m
Altura	1,74 m
Largura	0,88 m
Vazão de ar	0,9 m ³ /s
Área da peneira	0,50 m ²
Potência do motor elétrico	1,47 kW

4.3.2. Curva característica do sistema de ventilação

O levantamento da curva característica do sistema de ventilação foi feito com a finalidade de verificar se ele era adequado para a realização do processo de separação na máquina. Na Figura 17 encontra-se o gráfico da curva característica do ventilador de pressão total (P_t) versus a vazão do fluxo de ar para a rotação de 1.700 rpm, no eixo do ventilador.

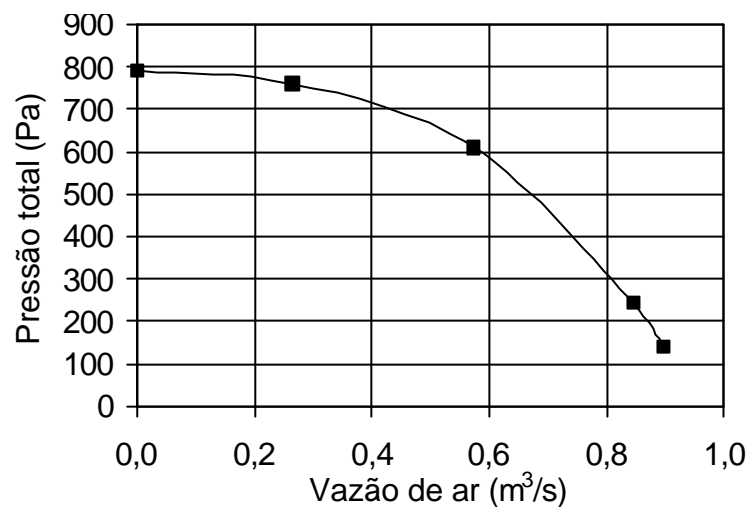


Figura 17 - Curva característica do sistema de ventilação usado na máquina de pré-limpeza.

A coluna pneumática do ventilador possui uma área de seção transversal retangular de $0,0440 \text{ m}^2$. A máxima vazão de ar do ventilador foi de $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalendo a uma velocidade de saída do ar de $20,45 \text{ m/s}$, que é superior à máxima velocidade terminal do produto. Portanto, o ventilador apresentou uma vazão de ar suficiente para o processo de separação da máquina.

4.3.3. Características e propriedades físicas dos frutos de café

No Quadro 11 são apresentadas as características físicas do produto utilizado nos testes de avaliação da máquina de pré-limpeza.

Quadro 11 - Características físicas do café utilizado nos testes de avaliação de desempenho da máquina de pré-limpeza

Características físicas dos frutos de café	Café de derrça no pano		Café de derrça no chão		Café de derrça no pano e no chão	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
Umidade (% b.u.)	36,9	1,1	29,5	1,6	39,6	1,6
Ângulo de repouso (grau)	42,0	1,0	41,1	0,8	43,2	1,0
Massa específica real (g/cm ³)	0,82	0,02	0,71	0,02	0,92	0,02
Massa específica aparente (kg/m ³)	422,0	0,8	353,0	2,3	460,0	2,7
Massa (g)	0,55	0,20	0,43	0,18	0,63	0,19

4.3.4. Determinação do desempenho da máquina de pré-limpeza

Os resultados de capacidade de separação, índice de perda por deficiência de separação e consumo de energia por quilograma de frutos separados são apresentados no Quadro 12. Foram realizados três testes: no teste 1 utilizou-se café colhido manualmente por derrça no pano; no teste 2, café colhido manualmente por derrça no chão; e no teste 3, o produto foi resultado de uma mistura de café colhido por derrça no pano e derrça no chão. A vazão de ar do ventilador durante toda a avaliação da máquina foi regulada para 0,37 m³/s.

Nos testes realizados, a máquina apresentou capacidade de separação média de 1.060 kg por hora, ou seja, 2,57 m³ de café por hora. Considerando-se uma jornada diária de oito horas, a máquina desenvolvida tem capacidade de limpeza de 20,6 m³/dia; portanto, essa máquina tem capacidade para

atender pequenos e médios produtores de café. O consumo de energia médio da máquina foi de 0,0025 kWh por kg de café processado, o que equivale a um consumo de 1,04 kWh por m³ de café processado.

Quadro 12 - Determinação do desempenho da máquina de pré-limpeza, com médias de nove repetições para cada teste

Parâmetros de avaliação	Café de derriza no pano		Café de derriza no chão		Café de derriza no pano e no chão	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
Umidade (% b.u.)	40,8	1,7	33,7	2,4	42,3	2,0
Capacidade de separação (kg/h)	905,0	17,8	1001,0	15,3	1273,0	16,3
Índice de perda (%)	0,55	0,22	0,43	0,22	0,45	0,18
Consumo de energia (kWh/kg)	$2,9 \times 10^{-3}$	$0,2 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$0,2 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$

No Quadro 13 são apresentados os valores dos teores de impurezas iniciais e finais e os teores de impurezas dos materiais descartados pela máquina na pré-limpeza, bem como os valores das eficiências de separação da máquina de pré-limpeza. Os resultados apresentados mostram que o produto tinha elevado teor de impureza inicial, chegando a atingir 71% no teste 2. Esse tipo de produto, geralmente, só é encontrado em final de safra e necessitaria ser repassado na máquina para se obter um teor de impureza final menor.

Quadro 13 - Teores de impurezas e eficiência de separação da máquina de pré-limpeza, nos três testes realizados

	Café de derricha no pano		Café de derricha no chão		Café de derricha no pano e no chão	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
Teor de impureza inicial (%)	15,2	2,7	71,0	4,0	37,4	4,4
Teor de impureza final (%)	2,2	0,6	39,3	1,5	15,9	3,9
Teor de impureza no material descartado pela máquina (%)	96,2	1,3	99,1	0,5	98,3	0,5
Eficiência de separação (adimensional)	0,87	0,03	0,73	0,05	0,68	0,05

Nas Figuras 18 e 19 são apresentadas as porcentagens em peso de galhos, folhas, terra e frutos de café, presentes no produto antes e após a limpeza. Na Figura 20 são apresentadas as porcentagens em peso de galhos, folhas, terra e frutos de café, presentes no produto eliminado como impureza pela máquina de pré-limpeza.

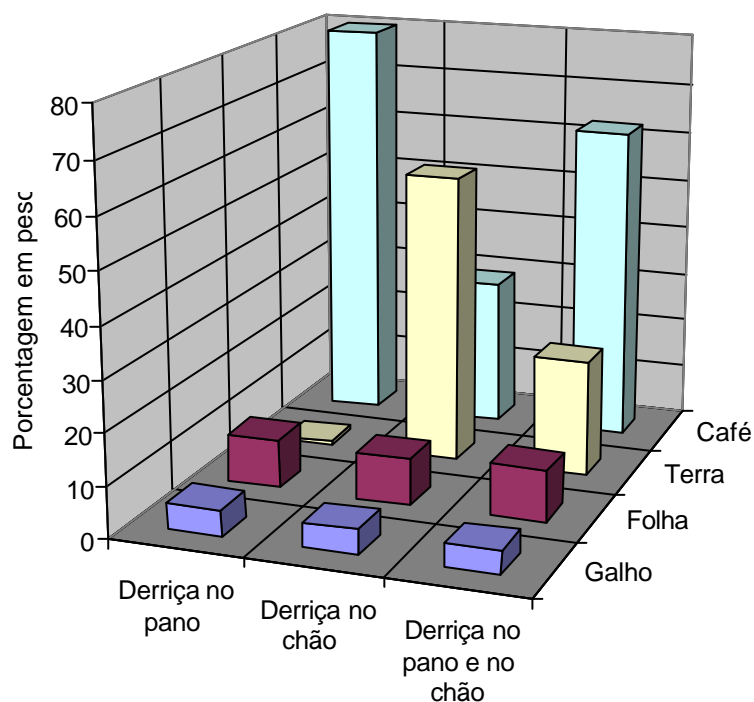


Figura 18 - Composição do produto antes do teste de limpeza.

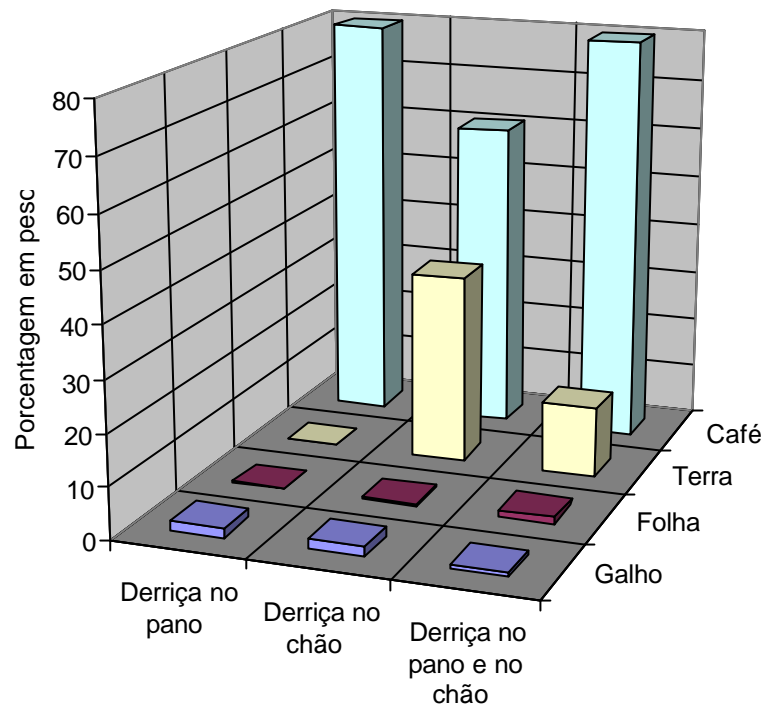


Figura 19 - Composição do produto após o teste de limpeza.

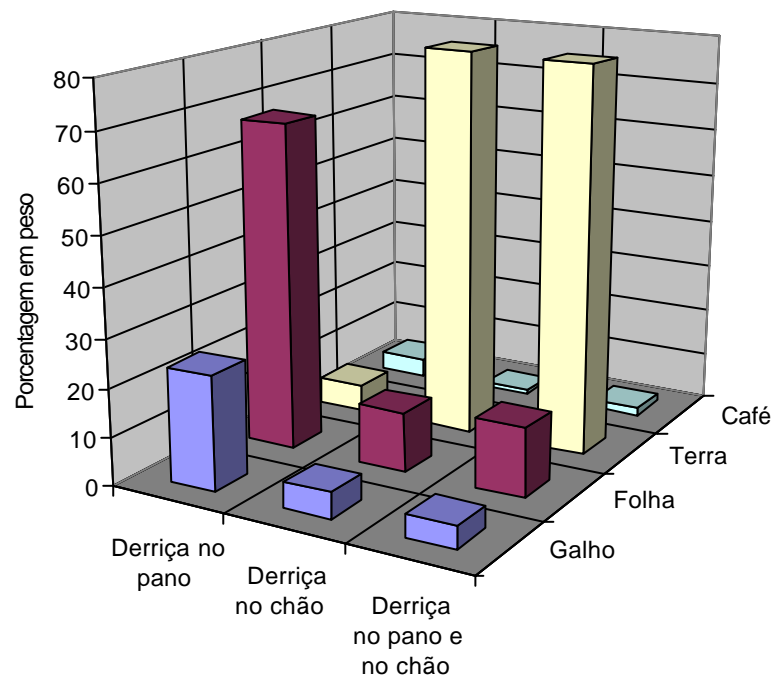


Figura 20 - Composição do produto eliminado como impureza pela máquina.

A eficiência de separação média da máquina nos testes 1, 2 e 3 foi de 76%, com um índice de perda médio do fruto de café de 0,48% (Quadros 12 e 13). TEIXEIRA (1988) desenvolveu uma máquina de limpeza de grãos utilizando o princípio de funcionamento de separação com ar e peneira cilíndrica. A máquina foi testada utilizando-se milho (*Zea mays, L.*) com teor de umidade de 9,07% (b.u.) e teor de impureza inicial de 4,71%. Nos testes realizados, foi obtida uma eficiência de separação máxima de 73,7%, com um índice de perdas de grãos de 1,7%. Fazendo uma comparação dos resultados obtidos por TEIXEIRA (1988) com os apresentados nos Quadros 12 e 13, verifica-se que a máquina desenvolvida no presente trabalho apresentou eficiência de separação ligeiramente superior e índice de perdas inferior ao obtido por aquele autor. Não se pode tirar uma conclusão sobre qual máquina é mais eficiente, pois as máquinas foram testadas com produtos diferentes e com teores de impurezas iniciais e umidades diferentes.

Analisando os resultados apresentados no Quadro 13 e nas Figuras 18, 19 e 20, pode-se constatar que a composição e o teor de impurezas tiveram influência na eficiência de separação, principalmente quanto ao teor de terra (torrões). No teste com produto proveniente de derriça no chão, observou-se que os torrões com diâmetro próximo ao dos frutos de café dificultaram a separação nas peneiras. Verifica-se, pela Figura 19, que a máquina apresentou comportamento uniforme na separação dos galhos e das folhas, em todos os testes.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma máquina para abanação e separação de frutos de café provenientes da colheita, incluindo: a) determinar o tamanho, o ângulo de repouso, a massa específica aparente e o volume do fruto de café; b) determinar as características aerodinâmicas dos frutos de café em diferentes teores de umidade; c) projetar e construir uma máquina para pré-limpeza de café utilizando técnicas de CAD (Projeto Auxiliado por Computador); e d) avaliar o desempenho da máquina utilizando café com diferentes teores de impurezas.

O projeto da máquina de pré-limpeza do café foi realizado com base nas características do produto, determinadas experimentalmente. O princípio de funcionamento da máquina adotado foi o de ar e peneira. O comportamento dinâmico do sistema de vibração da máquina de pré-limpeza foi analisado utilizando-se o programa computacional Working Model 3D. Um protótipo da máquina foi construído na oficina mecânica da Área de Armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola. A matéria-prima utilizada nos testes para avaliação da máquina foi uma mistura das colheitas de café das variedades Catuaí, Mundo Novo, Catimor e Híbridos (cruzamentos de Mundo Novo e Catuaí x Híbrido Timor), da área experimental do Departamento de Fitopatologia da UFV, e da variedade Catuaí, proveniente da Fazenda Mundial, no Município de Araponga/MG. O produto utilizado nos testes foi colhido por derriça no chão e no pano.

Foram realizados três testes para avaliação da máquina e, para cada teste, nove repetições. No teste 1 foram utilizados frutos de café colhidos por derriça no pano; no teste 2, frutos de café colhidos por derriça no chão; e no teste 3, frutos de café colhidos por derriça no pano e no chão. As avaliações da máquina de pré-limpeza consistiram na determinação dos seguintes parâmetros: capacidade de separação (kg/h); eficiência de separação da máquina, obtida com base nos teores de impurezas dos frutos de café antes e após a pré-limpeza (% em peso); índice de perda por deficiência de separação (% em peso); e consumo de energia por quilograma de frutos separados (kWh/kg). Além disso, determinaram-se a curva característica do sistema de ventilação e as propriedades físicas dos frutos de café dos testes.

Com base nos resultados obtidos na determinação das características físicas e das propriedades aerodinâmicas dos frutos de café, pode-se concluir que:

- os ângulos de repouso máximo e mínimo dos frutos de café foram de $51,7^\circ$ e de $36,7^\circ$, respectivamente;
- o comprimento, a largura e a espessura máxima para o fruto de café foram, respectivamente, de 15,3, 13,9 e 13,3 mm, na umidade de 70,4%;
- o comprimento, a largura e a espessura mínima para o fruto de café foram, respectivamente, de 13,8, 10,1 e 8,6 mm, na umidade de 11,1%;
- o volume máximo para o fruto de café foi de $1,5 \text{ cm}^3$ e o mínimo, de $0,57 \text{ cm}^3$, nas umidades de 70,4% e 11,1%, respectivamente;
- o valor máximo da velocidade terminal experimental para um fruto de café cereja foi de 16,8 m/s, na umidade de 70,4%;
- o valor mínimo da velocidade terminal experimental para um fruto de café em coco foi de 11,1 m/s, na umidade de 13,3%;
- a área projetada máxima para o fruto de café na umidade de 70,4% foi de $1,58 \text{ cm}^2$, com o coeficiente de arrasto de 0,66;
- a área projetada mínima para o fruto de café na umidade de 11,1% foi de $0,88 \text{ cm}^2$, com o coeficiente de arrasto de 0,60; e
- a massa específica aparente máxima foi de 587 kg/m^3 e a mínima, de $393,6 \text{ kg/m}^3$, nas umidades de 70,4% e 13,3%, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos nos testes de avaliação da máquina de pré-limpeza de café, pode-se concluir que:

- os valores máximos de aceleração da caixa das peneiras, obtidos por simulação, foram de 10,90 e 0,237 m/s² para as direções X e Y, respectivamente;
- a capacidade de separação média da máquina foi de 1.060 kg/h;
- a eficiência de separação média da máquina de pré-limpeza foi de 76%;
- o índice de perda médio por deficiência de separação foi de 0,48%; e
- o consumo de energia médio por quilograma de frutos de café separado foi de 0,0025 kWh/kg.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIROUCHE, F. M. L. **Computational methods in multibody dynamics**. New Jersey, EUA: Prentice Hall, 1992. 478p.
- BICKFORD, W.B. **A first course in the finite element method**. Illinois, EUA: Irwin, 1994. 652p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Departamento Nacional de Defesa Vegetal e Coordenação de Laboratório Vegetal. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF: MARA, 1992. 365p.
- CAIXETA, G. Z. T. Comportamento atual do mercado de café. **Informe Agropecuário**, v. 19, n. 193, p. 09 - 13, 1998.
- CARVALHO, V. D., CHAGAS, S. J. R., SOUZA, S. M. C. Fatores que afetam a qualidade do café. **Informe Agropecuário**, v. 18, n. 187, p. 05 - 20, 1997.
- CARVALHO, N. M., NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1983. 429p.
- COAN, O. **Desenvolvimento e análise do desempenho de uma abanadora mecânica de café**. São Carlos, SP: USP, 1981. 87p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, 1981.

- COOK, R. D. **Finite element modeling for stress analysis**. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1995. 320p.
- DE BAERDEMAEKER, S., SEGERLIND, L. J. Aerodynamic properties of strawberreis. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 2, p. 729 - 732, 1974.
- FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO ESTADO DE MINAS GERAIS - FAEMG. **Diagnóstico da cafeicultura em Minas Gerais**. Belo Horizonte, MG. 1996. 52p.
- GARCIA, R. F. **Otimização do projeto de componentes de uma colhedora de forragem**. . Viçosa, MG: UFV, 1998. 78p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- GREGG, B. R., FAGUNDES, S. R. F. **Manual de operações da mesa de gravidade**. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Banco Interamericano de Desenvolvimento, 1975. 78p.
- HENDERSON, S. M., PERRY, R. L. **Agricultural process engineering**. Westport, EUA: AVI, 1976. 441p.
- HUAG, E. J. **Computer-aided kinematics and dynamics of mechanical systems**. Boston, EUA: Allyn and Bacon, 1989. v. 1, 498p.
- HUEBNER, K. H., THORNTON, E. A., BYROM, T. G. **The finite element method for engineers**. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1995. 627p.
- HUSTON, R. L. **Multibody dynamics**. Boston, EUA: Butterworth-Heinemann, 1990. 416p.
- JALON, J. G., BAYO, E. **Kinematic and dynamic simulation of multibody systems - The real time challenge**. New York, EUA: Springer-Verlag, 1993. 440p.
- JINDAL, V. K., MOHSENIN, N., HUSTED, J. V. Surface area of selected agricultural seeds and grains. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 4, p. 720 - 725, 1974.

- KANE, T. R., LEVINSON, D. A. **Dynamics: theory and applications**. New York, EUA: McGraw Hill, 1985. 379p.
- KNIGHT, C. E. **The finite element method in mechanical design**. Boston, EUA: PWS-KENT, 1993. 326p.
- LOGAN, D. L. **A first course in the finite element method**. Boston, EUA: PWS-KENT, 1992. 662p.
- MACINTYRE, A. J. **Ventilação industrial e controle da poluição**. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara, 1988. 403p.
- McCABE, W. L., SMITH, J. C. **Unit operations of chemical engineering**. 3. ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogajusha, 1976. 1028p.
- MENDENHALL, W., SINCICH, T. **Statistics for engineering and the sciences**. 3. ed. New York, EUA: Macmillan, 1992. 963p.
- MESQUITA, A. L. S., GUIMARÃES, F. A., NEFUSSI, N. **Engenharia de ventilação industrial**. São Paulo, SP: Edgard Blücher, CETESB, 1977. 442p.
- MIALHE, L. G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo, SP: Agronômica Ceres, 1974. 301p. (Ceres, 11).
- MOREIRA, S. M. C., CHAVES, M.A., OLIVEIRA, L. M. Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. **Revista Brasileira de Armazenamento**. v. 9/10, n. 1/2, p. 22 - 24, 1985.
- MOHSEENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York, EUA: Gordon and Breach Science Publishers, 1970. 742p.
- MURRAY, R. M., LI, Z., SATRY, S. S. **A mathematical introduction to robotic manipulation**. Boca Raton, EUA: CRC, 1993. 456p.
- NIKRAVESH, P. E. **Computer-aided analysis of mechanical systems**. New York, EUA: Prentice Hall, 1987. 370p.

- NORTON, R. L. **Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines.** New York, EUA: McGraw-Hill, 1992. 714p.
- PINHEIRO, M. da C. **Propriedades físicas de grãos de soja UFV-1.** Viçosa, MG: UFV, 1975. 29p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1975.
- PIZA, J. T., CURI, P. R. Relação entre as formas de café (*Coffea arábica*) em coco e beneficiado. **Engenharia Agrícola.** v. 10, n. 1, p. 03 - 13, 1986.
- REDDY, J. N. **An introduction to the finite element method.** New York, EUA: McGraw-Hill, 1993. 684p.
- RIGITANO, A. Colheita mecânica, um método eficiente de aproveitamento. **A Granja.** v. 3, n. 30, p. 37 - 41, 1975.
- ROBERSON, R., SCHWERTASSEK, R. **Dynamics of multibody systems.** Berlin, Alemanha: Spring Verlag, 1988. 460p.
- SEGERLIND, L. J. **Applied finite element analysis.** New York, EUA: John Wiley & Sons, 1984. 427p.
- SHABANA, A. A. **Dynamics of multibody systems.** New York, EUA: John Wiley & Sons, 1989. 470p.
- SILVA, F. M., CARVALHO, G. R., SALVADOR N. Mecanização da colheita do café. **Informe Agropecuário,** v. 18, n. 187, p. 43 - 54, 1997.
- SILVA, J. S., LUCENA, E. M. P. Estrutura, composição e propriedades das sementes. In: SILVA, J. S. (Ed.). **Pré-processamento de produtos agrícolas.** Juiz de Fora, MG: Instituto Maria, 1995. p. 23 - 32.
- SILVA, J. S., AFONSO, A. D. L., FILHO, A. F. L. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. In: SILVA, J. S. (Ed.). **Pré-processamento de produtos agrícolas.** Juiz de Fora, MG: Instituto Maria, 1995. p. 395 - 461.

SOARES, J. B. **Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja (*Glycine max L.*)**. Viçosa, MG: UFV, 1986. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1986.

SPIEGEL, M. R. **Manual de fórmulas e tabelas matemáticas**. São Paulo, SP: McGRAW-HILL do Brasil, 1973. 270p. (Coleção Schaum).

SPIVAKOVSKY, A. O., DYACHKOV, V. K. **Conveying machines**. Moscow: MIR, 1985. 262p.

SRIVASTAVA, K. A., GOERING, E. C., ROHRBACH, P. R. **Engineering principles of agricultural machines**. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1993. 601p.

TEIXEIRA, M. M. **Desenvolvimento e desempenho de uma máquina de limpeza a ar, com peneira cilíndrica rotativa, para grãos**. Viçosa, MG: UFV, 1988. 59p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1988.

TEIXEIRA, M. M. **Limpeza de grãos**. Viçosa, MG: CENTREINAR, 1995. 31p.