

Universidade Federal do Pampa

Erick Medeiros Silva

**PROJETO PRELIMINAR DE UM SEPARADOR  
PNEUMÁTICO DE CASCA/AMÊNDOA DA NOZ  
PEÇÃ**

Alegrete

2016



Erick Medeiros Silva

# **PROJETO PRELIMINAR DE UM SEPARADOR PNEUMÁTICO DE CASCA/AMÊNDOA DA NOZ PECÃ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Wang Chong

Alegrete

2016



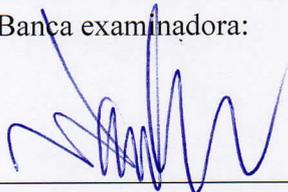
Erick Medeiros Silva

**PROJETO PRELIMINAR DE UM SEPARADOR  
PNEUMÁTICO DE  
CASCA/AMÊNDOA DA NOZ PECÃ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal do Pampa como requi-  
sito parcial para a obtenção do título de Bacha-  
rel em Engenharia Mecânica.

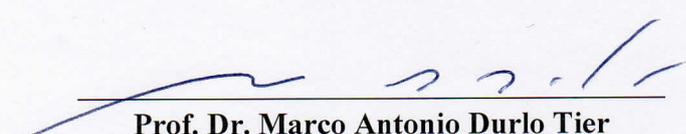
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 13 de dezembro de 2016

Banca examinadora:



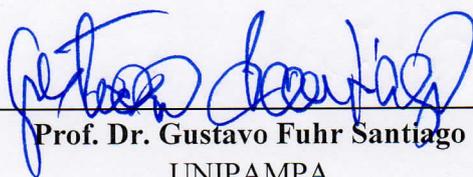
---

**Prof. Dr. Wang Chong**  
Orientador



---

**Prof. Dr. Marco Antonio Durlo Tier**  
UNIPAMPA



---

**Prof. Dr. Gustavo Fuhr Santiago**  
UNIPAMPA



*Este trabalho é dedicado aos meus pais que me deram suporte integral para que eu pudesse  
buscar todos os meus sonhos.*



# Agradecimentos

Em primeiro lugar e sempre, quero agradecer à Deus que É Todas as Coisas, a Fonte de tudo, tudo que é vida - e a própria vida.

Em segundo, quero agradecer em especial minha mãe, Neide, pelo apoio e o amor incondicional. Meu pai, Helio, que nao mediu esforços para que eu pudesse correr atrás dos meus sonhos. Aos meus irmãos, Talline e Igor, os quais tenho muito amor e carinho, pela compreensão nos momentos difíceis que compuseram minha trajetória até aqui. Minhas avós, Josefa e Zélia por acreditarem em mim e no meu sonho.

Em terceiro, quero agradecer a todas as pessoas que de certa forma fizeram parte desta conquista, em especial aos amigos que fiz em Alegrete Djovane Girard, Dionnathan Willian, Ricardo Misio, Lucas Dallago, também agradeço ao grande amigo Rafael Solane pelo apoio que a mim foi dado na execução deste trabalho.

Em quarto, agradeço a UNIPAMPA pela oportunidade e estrutura do Campus Tecnológico de Alegrete que me formaram engenheiro mecânico. Á todos os funcionários e técnicos que contribuem diariamente para o aumento da qualidade do ensino em nossa instituição. Aos professores que fizeram parte da minha formação e não recuaram diante do desafio de transmitir seus conhecimentos, que são: Tonilson Rosendo, José Wagner, Carlos Dilli, Marco Tier, Divane Marcon, Adriana Salbego, Renato Silva, Daniel Gamarra, Aldoni Gabriel, Jorge Arpasi, Gustavo Fuhr, Vicente Puglia, Fladimir Fernandes, Alexandre Oliveira, Alexandre Hoffmann, Maurício França, Felipe Denardin e Vilnei Dias. Ao meu orientador Wang Chong pelo qual tenho bastante admiração, que sempre esteve disposto a me instruir na resolução dos problemas encontrados.



*“Many small people who in many small places do many small things that can alter the face of  
the world.”  
(African Wisdom)*



# Resumo

O sul do Brasil tem se mostrado uma importante região produtora de nozes pecã. Devido a crescente demanda do mercado consumidor a região possui um elevado potencial para o aumento da produção. O beneficiamento é uma importante parte do processo produtivo, agregando valor ao produto, garantindo a qualidade e aumentando assim, a renda do produtor. Neste contexto o trabalho tem o objetivo de realizar o projeto de um separador pneumático de casca da noz-pecã para uso em linha de beneficiamento. O equipamento deve ser capaz de separar as cascas e a amêndoa em um regime contínuo de operação. Para isso, casca e amêndoa foram caracterizadas de modo a conhecer parâmetros como densidade, tamanho após a quebra, velocidade terminal das partículas. Utilizou-se uma análise experimental da velocidade terminal do produto, a partir das quais foi elaborado o projeto. Assim, o separador foi concebido para trabalhar com uma vazão média de  $0,625 \text{ m}^3/\text{s}$  de ar, o que na coluna de separação corresponde a um perfil de velocidade com até  $12 \text{ m/s}$ . O separador projetado apresenta uma forma bem compacta possui 2,1 metros de altura, construído em aço inoxidável AISI 304 e peso total aproximado de 137 kg, capacidade estimada de 300 kg/h de produto separado, com ventilador centrífugo de pás voltadas para trás acionado por motor elétrico de 0,75 cv.

**Palavras-chave:** Noz Pecã. Separador. Projeto de Máquinas.



# Abstract

The south of Brazil has proved to be an important region producing pecans. Due to the increasing demand of the consumer market the region has a high potential for the increase of production. Processing is an important part of the production process, adding value to the product, guaranteeing quality and thus increasing the producer's income. In this context the work has the objective of realizing the design of a pneumatic peeler of pecan peel for use in a beneficiation line. The equipment must be able to separate the shells and the almond into a continuous operating regime. For this, shell and almond were characterized in order to know parameters such as density, size after breaking, terminal velocity of the particles. An experimental analysis of the terminal velocity of the product was used, from which the design was elaborated. Thus, the separator is designed to operate at an average flow rate of  $0.625 \text{ m}^3/\text{s}$  which in the separation column corresponds to a velocity profile with up to  $12 \text{ m/s}$ . The designed separator features a very compact shape having 2.1 meters high, built in AISI 304 stainless steel and approximate weight of  $137 \text{ kg}$ , estimated capacity of  $300 \text{ kg/h}$  of separate product, with centrifugal fan Rear spades driven by electric motor of  $0.75 \text{ cv}$ .

**Key-words:** Pecan. Separator. Machine Design.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – A) Nogueira-Pecã. B) Noz Pecã. . . . .	27
Figura 2 – Estrutura da noz. . . . .	28
Figura 3 – Endosperma. . . . .	29
Figura 4 – Casca de noz-pecã. . . . .	29
Figura 5 – Diversas fases da fluidização . . . . .	33
Figura 6 – Diagrama de correlação entre o diferencial de pressão ( $\Delta p$ ) e a velocidade do gás ( $u_0$ ) no leito. . . . .	35
Figura 7 – Mapa para a velocidade terminal de partículas caindo através de fluidos. . .	38
Figura 8 – Alimentação vertical de sólidos em um leito onde ocorre o transporte pneumático de partículas. . . . .	39
Figura 9 – Esquema de um transporte pneumático por aspiração. . . . .	39
Figura 10 – Esquema de um transporte pneumático por compressão . . . . .	40
Figura 11 – Sistema misto aspiração e compressão. . . . .	40
Figura 12 – Sistema básico de separação por aspiração. . . . .	41
Figura 13 – Funcionamento da coluna de separação em um sistema de aspiração. . . . .	42
Figura 14 – Ventilador centrífugo. . . . .	43
Figura 15 – Tipos de rotores de ventiladores centrífugos. . . . .	45
Figura 16 – Granulometria das Amêndoas após a decorticação . . . . .	48
Figura 17 – Granulometria das cascas após a decorticação . . . . .	48
Figura 18 – Uso do <i>MATLAB</i> na obtenção da área de folhas. . . . .	49
Figura 19 – Esquema de dispositivo utilizado para determinar a velocidade terminal da amostra. . . . .	50
Figura 20 – Fases do Projeto com Iterações. . . . .	51
Figura 21 – Amostras de diferentes granulometrias de casca e amêndoa. . . . .	53
Figura 22 – Procedimento para obtenção da área em <i>MATLAB</i> . . . . .	54
Figura 23 – Concepção do separador . . . . .	56
Figura 24 – Componentes do equipamento separador . . . . .	57
Figura 25 – Perfil de velocidade do ar na coluna de separação para a vazão de $0,8125 \text{ m}^3/\text{s}$ . . . . .	59
Figura 26 – Perfil de velocidade do ar na coluna de separação para a vazão de $0,625 \text{ m}^3/\text{s}$ . . . . .	60
Figura 27 – Distância $L$ na coluna. . . . .	61
Figura 28 – Menores partículas de amêndoa presentes no produto. . . . .	62
Figura 29 – Determinação do ângulo das bicas de alimentação e saída . . . . .	63
Figura 30 – Determinação do ângulo das bicas de alimentação e saída . . . . .	63
Figura 31 – Pontos de uniões por soldagem do separador] . . . . .	65
Figura 32 – Coeficiente de perda em função do ângulo de abertura das laminas.] . . . . .	66
Figura 33 – Queda de pressão na coluna de separação. . . . .	67

Figura 34 – Pontos de operação do ventilador. . . . .	69
Figura 35 – Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã. . . . .	70
Figura 36 – Vista explodida do Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã. . . . .	71
Figura 37 – Janela para manutenção e limpeza. . . . .	73
Figura 38 – Amortecedor tipo Mac selecionado. . . . .	99
Figura 39 – Curva de desempenho do ventilador pás voltadas para trás D280 da TER- MODIN. . . . .	100
Figura 40 – Características do Damper. . . . .	101
Figura 41 – Arranjo do Ventilador. . . . .	102
Figura 42 – Tela selecionada para o meio cone invertido. . . . .	103

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Características das nozes produzidas no Rio Grande do Sul. . . . .	30
Tabela 2 – Valores das duas constantes $K_1$ e $K_2$ . . . . .	36
Tabela 3 – Razão média massa/área projetada para casca e amêndoa. . . . .	54
Tabela 4 – Valores médios das velocidades terminais obtidos experimentalmente. . . . .	55
Tabela 5 – Espessura das chapas dos dutos, em função do diâmetro. . . . .	62
Tabela 6 – Características da tela. . . . .	64
Tabela 7 – Parafusos. . . . .	64
Tabela 8 – Relação das perdas de carga do sistema. . . . .	68
Tabela 9 – Características do ventilador e acionamento. . . . .	70
Tabela 10 – Estimativa de custo do Separador. . . . .	74
Tabela 11 – Razão média massa/área projetada para casca. . . . .	83
Tabela 12 – Razão média massa/área projetada para a amêndoa. . . . .	83



# Lista de símbolos

$\Delta p_l$	Diferencial de pressão no leito
$\Delta p_t$	Diferença de pressão total
$\eta_t$	Rendimento da transmissão
$\eta_t$	Rendimento total do ventilador
$\lambda$	Coefficiente de perda
$\mu_{ar}$	Viscosidade dinâmica do ar
$\mu_{ar}$	Viscosidade do fluido
$\Phi_s$	Esfericidade da partícula
$\rho_s$	Densidade do sólido
$\rho_g$	Densidade do fluido
$\varepsilon_{mf}$	Porosidade do leito em mínima de fluidização
$\varepsilon_{mf}$	Porosidade do leito
$A$	Área da secção transversal
$A_p$	Área projetada da partícula
$A_t$	Área da secção transversal
$Ar$	Número de Archimedes
$C_D$	Coefficiente de arraste
$D$	Diâmetro do rotor do ventilador
$d_e$	Diâmetro equivalente
$d_p$	Diâmetro da partícula
$g$	$9,8 \text{ m/s}^2$ , Aceleração da gravidade
$g_c$	$\frac{1\text{Kg.m}}{\text{N.s}^2}$ , Fator de conversão
$J$	Perda de carga
$L$	Distância entre a alimentação do produto e saída da amêndoa

$L_{mf}$	Altura da região de escoamento considerada
$m$	Massa da partícula
$m_p$	Massa da partícula
$N$	Rotação [rpm]
$P_m$	Potência de instação
$P_s$	Pressão estática do ventilador
$P_t$	Pressão total do ventilador
$P_v$	Pressão dinâmica do ventilador
$Q$	Vazão de ar no sistema
$Q$	Vazão de ar
$Re$	Número de Reynolds
$Re_{p,mf}$	Número de Reynolds da partícula em mínima de fluidização
$u_0$	Velocidade superficial do fluido
$u_c$	Velocidade de saída da casca
$u_t$	Velocidade terminal
$u_{ta}$	Velocidade Terminal da Amêndoa
$u_{tc}$	Velocidade Terminal da Casca
$V_p$	Volume da partícula
$W$	Peso das partículas

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	Justificativa	24
1.2	Objetivo Geral	25
1.3	Objetivos específicos	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
2.1	Características botânicas da Nogueira-pecã	27
2.2	Noz-pecã	28
2.3	Processamento da Noz Pecã	30
2.4	Separação Pneumática de Materiais Polidispersos	31
2.4.1	Elutriação em Leitos Fluidizados	32
2.4.2	Velocidade Mínima de Fluidização ( $u_{mf}$ )	33
2.4.3	Velocidade Terminal das Partículas ( $u_t$ )	36
2.5	Transporte Pneumático	38
2.6	Coluna de Separação	40
2.6.1	Potência de Instalação ( $P_m$ )	42
2.7	Ventiladores Centrífugos	43
2.7.1	Nível Energético de Pressão	44
2.7.2	Tipo de Construção	44
2.7.3	Caracterização de Partículas Sólidas	45
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>47</b>
3.1	Produto de Separação	47
3.2	Razão massa/área projetada da casca e amêndoa	49
3.3	Avaliação Experimental da Velocidade Terminal	49
3.4	Fases do projeto	50
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>53</b>
4.1	Caracterização do Produto de Separação	53
4.1.1	Razão Massa/Área Projetada	53
4.1.2	Determinação da Velocidade Terminal	54
4.2	Concepção do Separador	55
4.3	Projeto do Separador Pneumático	58
4.3.1	Dimensionamento da coluna de separação	58
4.3.2	Dimensionamento das Bicas de Alimentação e Saída	62
4.3.3	Seleção de Tela	64

4.3.4	Uniões parafusadas e soldadas . . . . .	64
4.3.5	Avaliação das Perdas de Carga . . . . .	65
4.3.6	Seleção do ventilador e Potência de Acionamento . . . . .	68
<b>4.4</b>	<b>Montagem Final . . . . .</b>	<b>70</b>
<b>4.5</b>	<b>Instalação, Operação e Manutenção . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>4.6</b>	<b>Estimativa de Custos . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE A – ENSAIOS . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS . . . . .</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO A – CATÁLOGOS E TABELAS . . . . .</b>	<b>99</b>

# 1 Introdução

A produção de nozes pecã no Brasil tem se mantido crescente nos últimos anos, tendo dobrado desde o ano de 2008, como apontam dados do IBGE (2010). A pecanicultura tornou-se uma excelente alternativa de investimento para as propriedades, principalmente devido à alta rentabilidade e fácil manejo comparado a outras culturas (Paralelo 30, 2015).

Mesmo com um mercado ascendente, o Brasil produz apenas 10 % dos frutos que consome. Nos últimos 5 anos, o mercado nacional importou U\$ 167 milhões em nozes pecã (Paralelo 30, 2015). O maior volume de produção se encontra na região sul do país, sendo esta responsável por 79 % da produção nacional. No Rio Grande do Sul dentre os diversos municípios produtores, destacam-se Cachoeira do Sul, Rio Pardo e Anta Gorda como sendo os principais (IBGE, 2010).

A noz pecã é originária dos Estados Unidos, que é atualmente responsável por mais de 80 % da produção mundial (VENKATACHALAM, 2004). O seu consumo mundial é em grande parte estimulado por suas propriedades nutricionais, o que a deixa junto com os outros tipos de amêndoas entre os alimentos mais benéficos à saúde. Desta forma, seu consumo diário diminui o risco de doenças cardíacas, reduz o mau colesterol, ajuda a melhorar o funcionamento intestinal, cerebral e pulmonar (Condor, 2015; Paralelo 30, 2015; DIVINUT, 2015). Assim, os fatores já citados aliados ao clima e solo propícios para o cultivo da noqueira pecã no Brasil, evidenciam o potencial produtivo do país.

A produção industrial de pecã teve seu início há mais de cem anos (VENKATACHALAM, 2004). Entretanto, no Brasil esta atividade é relativamente nova, por isso os estudos e equipamentos disponíveis ainda são escassos. Segundo Molina Junior (200-), o beneficiamento é a última etapa do processo de produção e uma importante parte de toda a cadeia produtiva. Esta etapa tem a função de tornar o produto colhido de melhor qualidade, preparando-o para ser embalado e/ou armazenado, o que o torna atraente para comercialização ou para processamentos subsequentes. Geralmente na indústria beneficiadora as nozes pecã são submetidas a algumas etapas de processamento principais. A etapa inicial é a limpeza, na qual se faz uma lavagem para remover matéria orgânica e outros tipos de impurezas. Na próxima etapa é feita a quebra e logo depois a separação da amêndoa e da casca. Por fim se faz a classificação das nozes por tamanho e qualidade para então serem embaladas (ORO, 2007).

O processo de separação tem o objetivo de remover as cascas para os processos seguintes. Assim, ao fim da separação, deve restar o mínimo possível de cascas ainda junto com as amêndoas, sendo este um dos parâmetros de qualidade produto. Desde modo, podem ser dados destinos diferentes para ambas, ou seja, amêndoas seguem para a classificação e as cascas segundo Prado (2008) podem ser comercializadas, sendo utilizadas no preparo de chá.

O trabalho está estruturado a partir de um primeiro capítulo com uma introdução sobre a noz pecã, seu potencial produtivo e dificuldades do seu beneficiamento. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito das características físicas da noz, parâmetros utilizados separação pneumática de produtos e técnicas usadas em projetos de sistemas pneumáticos. Na sequência é exposta a metodologia utilizada para a concepção do projeto de máquina e caracterização das cascas e amêndoas. Assim, o próximo capítulo demonstra o desenvolvimento do projeto de acordo com os fundamentos do capítulo anterior, evidenciando os resultados e dificuldades encontradas. Por fim, as considerações finais compõem o último capítulo, onde é avaliado se os objetivos iniciais do projeto foram alcançados.

## 1.1 Justificativa

O Rio Grande do Sul se destaca como o maior produtor de noz pecã do Brasil seguido pelos estados do Paraná e Santa Catarina (ORTIZ, 2000). O aumento da demanda interna é promissor devido aos diversos fatores, como clima, solo, rentabilidade e incentivos a produtores por parte das cooperativas e associações como a EMATER-RS (Associação Rio-grandense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural), cujo objetivo é a expansão de pomares já existentes. Este aumento também se deve a uma maior da demanda interna, através do emprego da amêndoa em uma grande variedade de alimentos, e da casca frequentemente utilizada no preparo de chás e outros subprodutos.

No entanto, é necessário que se disponha de tecnologias eficientes no processo de beneficiamento das nozes, de modo a buscar melhores condições, aumento da produtividade e da qualidade dos produtos, resultando em maior rendimento e eficiência na produção. A partir da identificação desta necessidade, surgiu no grupo *PET - CTC* (Programa de Educação Tutorial - Ciência, Tecnologia e Cidadania) da *UNIPAMPA* - Universidade Federal do Pampa campus Alegrete sob orientação do professor Dr. Marco Durló Tier o projeto de uma pequena linha de beneficiamento da noz pecã. Tal sistema, conta com três etapas principais: “Caracterização Mecânica da Noz e Projeto do Decortificador”(SOLANE, 2015), “Projeto de uma Peneira Vibratória para Classificação de Noz Pecã”(BOAVENTURA, 2015) e este trabalho denominado “Projeto de um Separador Pneumático”.

Neste sentido, o aprimoramento do processo de separação é muito importante no projeto de linha de beneficiamento desenvolvido pelo *PET - CTC*, pois resulta em uma melhor qualidade das nozes, sem impurezas para o processo subsequente de classificação e no produto final, além de também preservar a qualidade da casca como subproduto em potencial. Estendendo este aprimoramento para toda linha de beneficiamento, agrega-se valor ao produto aumentando a renda do produtor, oferece-se melhor qualidade ao consumidor e ao mesmo tempo se estimula o crescimento da pecanicultura no Brasil.

## 1.2 Objetivo Geral

O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver o projeto de uma máquina que realize de forma eficiente a separação entre casca e a amêndoa da noz pecã por meio de um fluxo de ar com velocidade adequada. O separador deve ter capacidade de operação equivalente aos demais que compõem a linha de beneficiamento citados na seção 1 na página 23, promovendo a melhora da qualidade do processo de beneficiamento.

## 1.3 Objetivos específicos

Para que a meta principal seja alcançada, alguns objetivos específicos também são necessários:

- Caracterização da casca e amêndoa quanto às velocidades de arraste;
- Escolha do tipo de instalação a ser utilizada;
- Determinar os parâmetros de operação do separador.



## 2 Revisão Bibliográfica

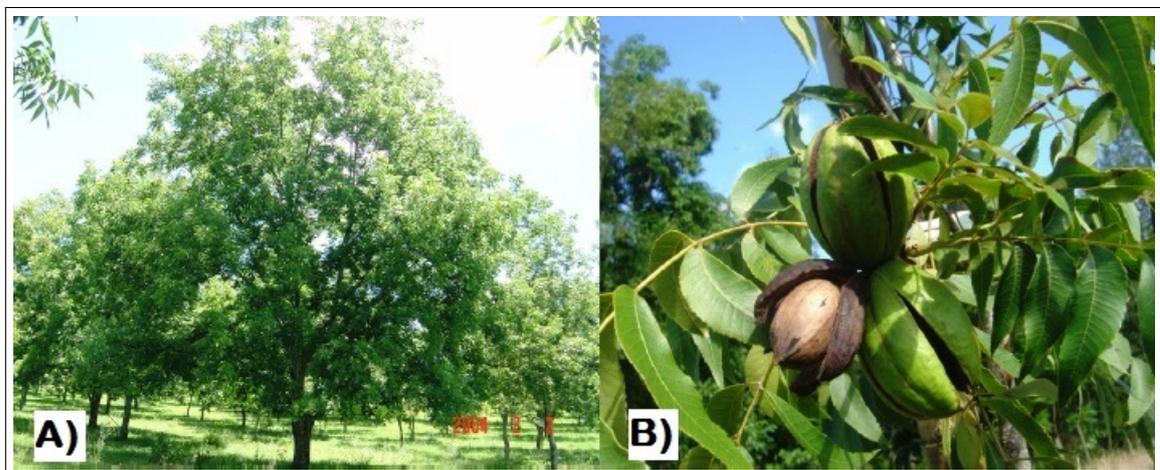
### 2.1 Características botânicas da Nogueira-pecã

A noqueira pecã [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch], é uma das poucas espécies de plantas nativas na América do Norte que tem se desenvolvido como uma cultura agrícola significativa. Espécie pertencente à família Juglandaceae, a noz era muito utilizada pelas tribos nativas dos Estados Unidos e México como principal fonte de alimento no período pré-colonial. Hoje é comercialmente cultivada por diversos países, como Brasil, México, Austrália, África do Sul, Israel, Argentina, Egito, dentre outros (WOOD; PAYNE; GRAUKE, 1994; VENKATACHALAM, 2004).

A noz foi introduzida no Brasil pelos pioneiros da imigração norte-americana a partir de 1866 que estabeleceram plantações em Santa Bárbara do Oeste e Americana, no estado de São Paulo (ORTIZ, 2000; ORO, 2007). As principais cultivares de Nogueira-pecã presentes no país são Mahan, Frotscher, Schley, Success, Moneymaker Barton, Shawnee, Cape Fear, Chickasaw, Choktaw, Desirable, Melhorada, Imperial, Importada, Burkett, Chpecear, Shoshone (Agroline, 2010; POLETTTO et al., 2012).

A noqueira (Figura 1 - A)) pode atingir mais de 40 metros de altura, 40 metros de diâmetro de copa e 20 metros de circunferência em seu tronco. Já o fruto (Figura 1 - B)) é uma drupa, agrupados em cachos com geralmente três a sete unidades, sendo que o epicarpo se separa do fruto na maturação. Uma parte que varia de 40 a 60 % do fruto é aproveitável (ORTIZ, 2000; ORO, 2007).

Figura 1 – A) Nogueira-Pecã. B) Noz Pecã.



Fonte: Prado (2008, p. 42)

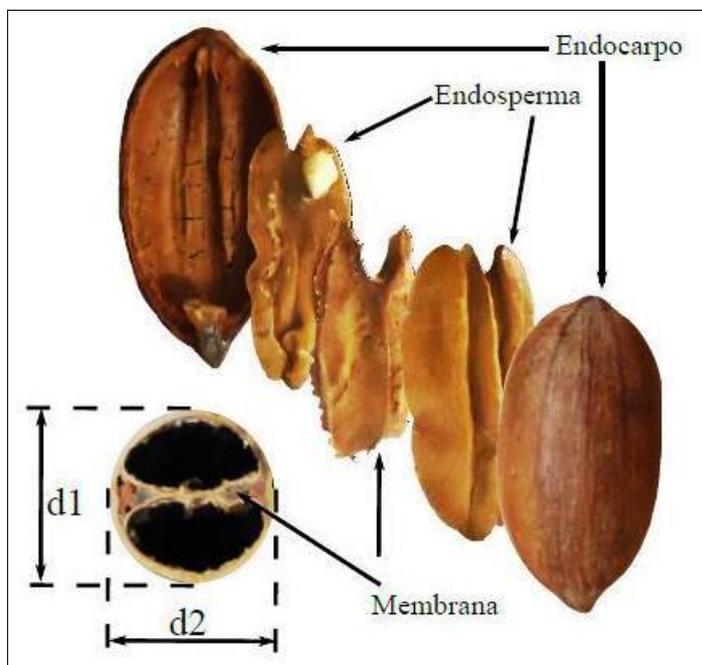
No Brasil as pesquisas relacionadas à noqueira-pecã ainda são raras. Faltam estudos

que caracterizem os frutos das cultivares produzidas no país. Tais conhecimentos podem ajudar tanto os produtores quanto as indústrias que beneficiam, de modo que possam escolher cultivares satisfatórias, frutos com características favoráveis ao beneficiamento e mais atrativos aos consumidores (POLETTI et al., 2012).

## 2.2 Noz-pecã

A noz-pecã (Figura 2) possui uma coloração marrom e uma forma aproximada a de um elipsoide. No seu interior se encontra o endosperma, ou seja, as duas metades comestíveis da noz separadas por uma membrana. Já na parte externa, tem-se a casca rígida e de aspecto liso.

Figura 2 – Estrutura da noz.



Fonte: Solane (2015, p.47)

O endosperma (Figura 3) é crocante, de sabor agradável e uma ótima fonte de energia com cerca de 700 kcal por 100 g de porção. Além disso, também é uma excelente fonte de minerais, fibras e lipídeos. Seu consumo é muito apreciado in natura, tostada, salgada ou revestida com açúcar ou mel. São comumente utilizadas em uma grande quantidade de produtos alimentícios como confeitaria, cookies, bolos, sorvetes e laticínios (PRADO, 2008).

O endosperma também é utilizado para a obtenção do óleo, que apesar do consumo pouco difundido no Brasil, é bastante apreciado em muitas partes do mundo, como Oriente Médio, Ásia e Europa, devido às características nutricionais e de óleo gourmet. O processo de obtenção do óleo através da prensagem do endosperma resulta na produção da torta, que devidamente embalada pode ser comercializada com o objetivo de uso em confeitaria e pani-

Figura 3 – Endosperma.



Fonte: (Organic Spoon, 2015)

ficação. A mesma é fonte de nutrientes como proteína e lipídios (ORO, 2007; PRADO, 2008; VENKATACHALAM, 2004).

As cascas de noz-pecã (Figura 4) são o subproduto que é gerado através de uma série de operações do processamento da pecã para consumo humano. Alguns dos usos atuais para aproveitamento deste subproduto incluem o uso como matéria orgânica de cobertura do solo, uso como matéria de combustão, abrasivos de cola e de sabão, e como fonte de carvão ativado para fins de filtração de água. Entretanto, apesar dos diversos usos, dados indicam que uma quantidade substancial de aproximadamente 55 milhões de quilos de cascas de nozes produzidos anualmente nos Estados Unidos ainda não são utilizados (LITTLEFIELD et al., 2011; LITTLEFIELD, 2010).

Figura 4 – Casca de noz-pecã.



Segundo Prado (2008) o volume de casca resultante do processamento da noz pecã varia de 40 a 50 %. Já utilizada no Brasil para preparação de chás e farinha, possui também potencial

para ser utilizada como fonte alternativa de compostos que agem como antioxidantes, como é o caso dos compostos fenólicos totais encontrados em quantidades significativas nas mesmas.

O tamanho das nozes é uma característica que varia de acordo com a cultivar, sendo que para atingir 1 kg são necessárias de 60 a 160 nozes (ORO, 2007). Assim, Poletto et al. (2012) afirmam em estudo de análise de características dos frutos das cultivares de noqueira-peca cultivadas no Rio Grande do Sul, que as variedades Mahan, Importada e Melhorada foram as que apresentaram melhor rendimento de amêndoa (57,12, 55,50 e 55,24 %, respectivamente), não se diferenciando estatisticamente das variedades Success (54,02 %) e Imperial (54,49 %). Em contrapartida as variedades Desirable (48,92 %) e Moneymaker (47,36 %) foram as que tiveram menores rendimentos de amêndoas e conseqüentemente o maior rendimento de casca. Ainda segundo os autores, estas relações podem variar de ano para ano dependendo das condições edafoclimáticas, nutricionais e sanitárias a que as noqueiras são expostas. As dimensões de cada variedade, tal como o coeficiente de variância (CV) são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das nozes produzidas no Rio Grande do Sul.

<b>Cultivares</b>	<b>Massa por frutos (g)</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Comp. (mm)</b>	<b>Rend. amêndoa (%)</b>	<b>Frutos por Kg</b>
Success	12,31	26,54	47,20	54,02	82,68
Imperial	10,02	25,85	39,35	54,49	100,45
Melhorada	9,45	23,22	45,98	55,24	107,05
Desirable	9,30	21,50	58,78	48,92	108,48
Importada	7,37	21,42	38,69	55,50	137,53
Mahan	7,93	19,93	53,43	57,12	128,61
Moneymaker	7,41	22,4	33,66	47,36	137,41
CV %	12,67	4,24	5,01	7,11	13,16

Fonte: Poletto et al. (2012, p. 04)

Mesmo a casca exercendo um papel importante de proteção à amêndoa, cultivares que apresentem frutos com casca fina são muito apreciadas devido a este fator favorecer o processo de beneficiamento. Além disso, geralmente as cultivares que possuem esta característica apresentam frutos com relação amêndoa/casca maior do que cinquenta por cento (POLETTTO et al., 2012).

## 2.3 Processamento da Noz Pecã

Segundo Oro (2007), na indústria beneficiadora as nozes passam por determinadas etapas de processamento:

- Lavagem inicial: utiliza-se água fria com o objetivo de remover solo, matéria orgânica e outras impurezas;

- Primeira separação por tamanho: separação na qual as nozes ainda inteiras passam por uma peneira, sendo separadas em diferentes tamanhos;
- Segunda lavagem: é utilizada água aquecida a uma temperatura de 80°C durante cinco minutos com o objetivo de inativação de enzimas e eliminação de microrganismos;
- Descascamento: a noz passa por decorticadores onde é quebrada e descascada;
- Separação: as casca quebradas e seus fragmentos são retirados dos processos restando apenas as amêndoas;
- Segunda separação por tamanho: as amêndoas livres de impurezas são separadas em diferentes tamanhos através de peneiras;
- Secagem: as amêndoas são expostas a uma temperatura máxima de 40°C para a remoção da umidade, que deve atingir o valor final máximo de 4 %;
- Classificação: as amêndoas passam por esteiras e são geralmente selecionadas manualmente por tamanho, sendo também descartadas as que não atendem aos padrões de qualidade estabelecidos;
- Embalagem: nesta última etapa as amêndoas são embaladas e acondicionadas em potes de polipropileno com capacidade para 100 g ou a vácuo, em filmes de nylon-polietileno com capacidade de 1 kg.

Os processos descritos podem variar de acordo com a tecnologia utilizada e da indústria de beneficiamento.

Após as operações preliminares de decorticação e descasque serem concluídas, é necessário retirar as cascas. Logo, passos adicionais de processamento são necessários (SIMS, 1994). Na indústria alimentícia o processo de separação entre os materiais contaminantes e os alimentares é fundamental na preparação do produto para uso em processos posteriores (FELLOWS, 2009).

## 2.4 Separação Pneumática de Materiais Polidispersos

O método mais antigo usado para separação no beneficiamento foi o abano, que é baseado na diferença de densidade entre o produto e as “impurezas”. A diferença densimétrica existente entre os materiais é sem dúvida o fator mais explorado pelos equipamentos de separação existentes na indústria em geral, principalmente na indústria agrícola. Basicamente o que determina se uma partícula será arrastada por uma determinada corrente de ar é a relação peso/resistência aerodinâmica da mesma, ou seja, seu peso *versus* forma geométrica.

O projeto do separador pneumático apresentado neste trabalho é baseado nos princípios da fluidodinâmica de um sistema gás-sólido. Segundo Kunii e Levenspiel (1991) a passagem de gás através do produto durante a separação neste tipo de equipamento pode apresentar regimes distintos como partículas em queda livre, em fluidização e partículas sendo carregadas, o chamado arraste.

Deste modo, a fim de possibilitar um melhor entendimento do funcionamento e projeto deste tipo de equipamento, faz-se necessária uma revisão acerca de fenômenos como a fluidização e arraste de partículas em sistemas bifásicos gás-sólido.

### 2.4.1 Elutriação em Leitos Fluidizados

Um dos princípios fundamentais do projeto de um separador pneumático é o da fluidização. Kunii e Levenspiel (1991) definem fluidização como a operação na qual partículas sólidas são transformadas em estado fluídico através de suspensão em um gás ou líquido.

Se um fluido, no caso um gás, tem um fluxo ascendente de baixa velocidade através de um leito de partículas como mostrado na Figura 5(a), ele escoar nos espaços entre as partículas e não promove o movimento das mesmas, isto é um leito fixo. Com um acréscimo na velocidade do gás, as partículas afastam-se e algumas começam a apresentar uma leve vibração movendo em regiões restritas, tem-se nesse momento um leito expandido (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

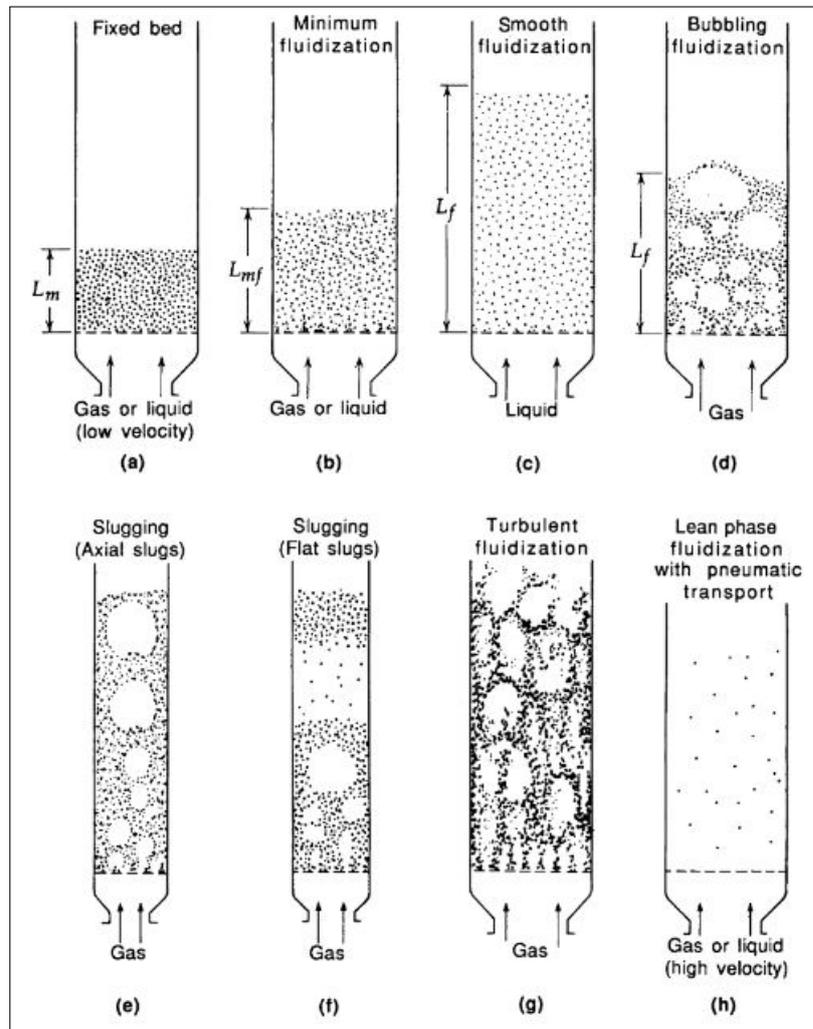
Com uma velocidade ainda maior, alcança-se um ponto em que todas as partículas são suspensas pelo fluxo de fluido. Neste ponto o peso das partículas é contrabalanceado pela força de atrito entre o escoamento do gás e as partículas, a componente vertical da força de compressão entre as partículas adjacentes desaparece, e a pressão cai nas sessões do leito igualando o peso do fluido e partículas nessa sessão. O leito é considerado fluidizado e referido como um leito fluidizado incipiente ou leito na mínima fluidização (Figura 5(b)) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Aumentando ainda mais a velocidade do fluido acima da fluidização mínima, grandes instabilidades com borbulhamento e canais de gás são observados. Com o fluxo de gás maior, a agitação se torna mais violenta e o movimento dos sólidos se torna mais vigoroso. Em contrapartida, o leito não se expande muito além comparado com a mínima fluidização. Este estado é chamado de fluidização borbulhante, veja a Figura 5(d). No caso de partículas finas, elas fluem calmamente para baixo pelas paredes através das projeções dos vazios de gás, isto é chamado de fluidização com “slug” axial. Já para partículas grossas a porção acima do leito é empurrada para cima e para baixo em um movimento oscilatório que se repete (Figura 5(e)). Esta fase chama-se “slug” plano (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Quando partículas finas são fluidizadas com um fluxo de gás de velocidade alta o suficiente, a velocidade terminal dos sólidos é excedida, a superfície superior do leito desaparece e, ao invés de bolhas, observa-se movimentos turbulentos de sólidos agrupados. Este regime se

chama fluidização turbulenta (Figura 5(g)). Com um acréscimo ainda maior na velocidade do gás, os sólidos são arrastados para fora do leito com o gás (Figura 5(h)), atingindo o estado de transporte pneumático (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Figura 5 – Diversas fases da fluidização



Fonte: Kunii e Levenspiel (1991, p. 02).

A Figura 5 mostra as diferentes fases do que se chama fluidização, a qual compreende o intervalo entre a fluidização incipiente e a turbulenta. Nitz e Guardani (2008) alertam que nem toda partícula, quando submetida à fluidização gasosa, comporta-se da mesma maneira. Porém o exposto neste trabalho serve como entendimento dos princípios principais.

#### 2.4.2 Velocidade Mínima de Fluidização ( $u_{mf}$ )

Kunii e Levenspiel (1991) propuseram considerar um leito de partículas sustentado por um distribuidor por onde passa um fluido, no caso um gás. Como dito na subseção 2.4.1 o início da fluidização ocorre quando a força de arraste do fluxo ascendente de gás é igual ao peso das partículas. Ou seja,  $\Delta p_l A_t = W$ , onde:

$\Delta p_l$  = diferencial de pressão no leito [ $P_a$ ];  
 $A_t$  = área da seção transversal do leito [ $m^2$ ];  
 $W$  = peso das partículas [ $kg$ ].

Com  $\Delta p_l$  sempre positivo, o peso pode ser representado em termos de características do sólido e do leito, sendo assim (KUNII; LEVENSPIEL, 1991),

$$\Delta p_l A_t = W = A_t L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) \left[ (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right] \quad (2.1)$$

Rearranjando, encontramos para condição mínima de fluidização (KUNII; LEVENSPIEL, 1991),

$$\frac{\Delta p_l}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.2)$$

Onde,

$L_{mf}$  = altura da região de escoamento considerada;  
 $\epsilon_{mf}$  = porosidade do leito;  
 $\rho_s$  = densidade do sólido;  
 $\rho_g$  = densidade do fluido;  
 $g$  = aceleração da gravidade;  
 $g_c$  = fator de conversão.

A Figura 6 mostra uma correlação entre o diferencial de pressão no leito e a velocidade do fluido para partículas não tão pequenas e de tamanho uniforme. Para um baixo fluxo no leito fixo, a queda de pressão é relativamente proporcional à velocidade do gás, geralmente alcançando um  $\Delta p_{max}$  ligeiramente mais alto do que a pressão estática do leito (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

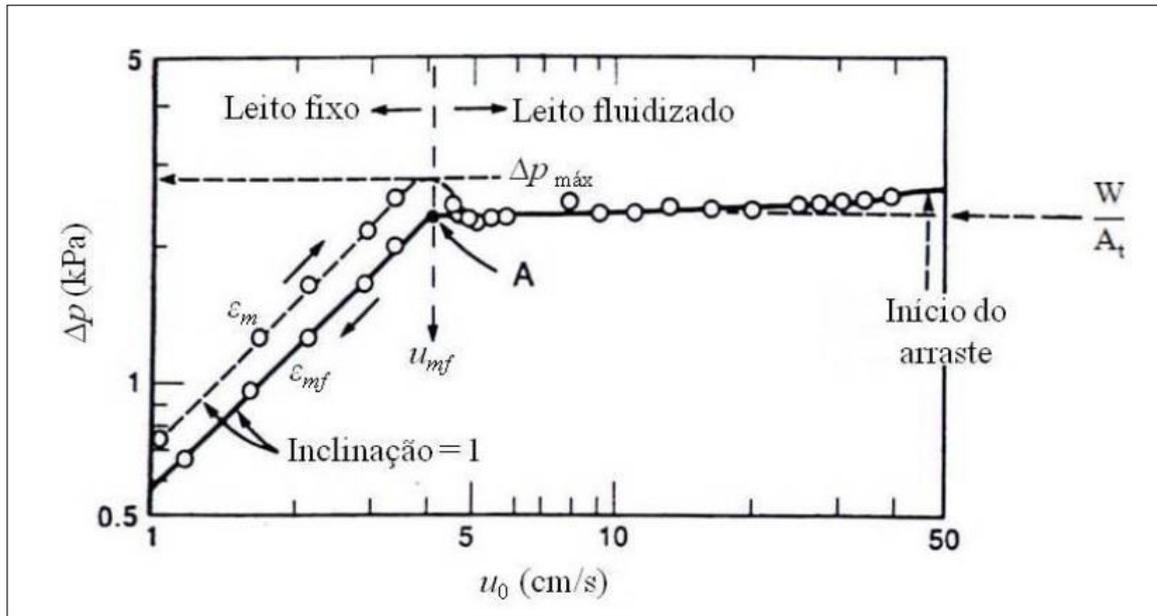
De acordo com Kunii e Levenspiel (1991) a correlação empírica para a proporcionalidade demonstrada é a correlação de Ergun. Considerando leitos fixos com determinada altura que contenham sólidos isotrópicos de tamanho único de diâmetro de partícula conhecido, a correlação de Ergun é dada por:

$$\frac{\Delta p_l}{L_m} = \frac{150(1 - \epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu u_0}{(\Phi_s d_p)^2} + \frac{1,75(1 - \epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \frac{(\rho_g u_0^2)}{(\Phi_s d_p)} \quad (2.3)$$

Onde,

$\Phi_s$  = esfericidade da partícula;  
 $u_0$  = velocidade superficial do fluido;

Figura 6 – Diagrama de correlação entre o diferencial de pressão ( $\Delta p$ ) e a velocidade do gás ( $u_0$ ) no leito.



Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991, p. 71).

$d_p$  = diâmetro da partícula;  
 $\mu$  = viscosidade do fluido;

A velocidade superficial na condição de mínima fluidização ( $u_{mf}$ ) pode ser encontrada combinando a Equação 2.2 e a Equação 2.3, o que nos dá (KUNII; LEVENSPIEL, 1991),

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_s} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \Phi_s^2} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.4)$$

Onde,  $\varepsilon_{mf}$  é a porosidade do leito na condição mínima de fluidização.

Pela Equação 2.4 os números de Reynolds da partícula ( $Re_{p,mf}$ ) e o número adimensional de Archimedes ( $Ar$ ) são definidos por,

$$Re_{p,mf} = \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) \quad (2.5)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.6)$$

respectivamente (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Para partículas muito grandes, a Equação 2.4 pode ser simplificada para

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{1,75 \rho_g} \epsilon_{mf}^3 \Phi_s, \quad Re_{p,mf} > 1000 \quad (2.7)$$

Mesmo quando  $\epsilon_{mf}$  e/ou  $\Phi_s$  não são conhecidos, pode-se estimar  $u_{mf}$  para um leito de partículas irregulares sem dimensões aparentemente mais longa ou mais curta. Reescrevendo a Equação 2.4 como (KUNII; LEVENSPIEL, 1991)

$$K_1 Re_{p,mf}^2 + K_2 Re_{p,mf} = Ar \quad (2.8)$$

onde,

$$K_1 = \frac{1,75}{\epsilon_{mf}^3 \Phi_s} \quad e \quad K_2 = \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \Phi_s^2} \quad (2.9)$$

Segundo Kunii e Levenspiel (1991), notou-se que os valores de  $K_1$  e  $K_2$  permanecem ligeiramente constantes para diferentes tipos de partículas sob amplo leque de condições ( $Re = 0,001$  até  $4000$ ), o que tem dado um desvio padrão em  $u_{mf}$  de  $\pm 34 \%$ . Assim, vários investigadores tem reportado valores de  $K_1$  e  $K_2$ , alguns desses valores encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores das duas constantes  $K_1$  e  $K_2$ .

Investigadores	Primeiro, $K_2/2K_1$	Segundo, $1/K_1$
Wen e Yu (1966)	33,7	0,0408
Richardson (1971)	25,7	0,0365
Babu et al (1978)	25,3	0,0651
Grace (1982)	27,2	0,0408
Tannous et al. (1998)	25,83	0,0430

Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel (1991, p. 70).

Os dados da Tabela 2 são úteis apenas como uma estimativa para  $u_{mf}$ , tendo em vista que esta é a mais importante medida necessária para o projeto (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

### 2.4.3 Velocidade Terminal das Partículas ( $u_t$ )

Quando uma partícula de tamanho  $d_p$  cai sob o efeito da força constante da gravidade ela acelera até atingir uma velocidade máxima, mantendo-se depois constante. Esta velocidade é chamada de velocidade terminal ou velocidade de arraste. A velocidade terminal depende

do tamanho, densidade e forma das partículas, além das propriedades do fluido, podendo ser estimada pela mecânica de fluidos, através da expressão (KUNII; LEVENSPIEL, 1991):

$$u_t = \sqrt{\frac{4d_p(\rho_s - \rho_g)g}{3\rho_g C_D}} \quad (2.10)$$

Segundo McCabe, Smith e Harriott (1993), a velocidade terminal ( $u_t$ ) também pode ser expressa em termos da área projetada da partícula ( $A_p$ ) e sua massa ( $m$ ) por,

$$u_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_s - \rho_g)m}{A_p\rho_s C_D\rho_g}} \quad (2.11)$$

onde  $C_D$  é o coeficiente de arraste adimensional determinado experimentalmente. No geral, Haider e Levenspiel (1989) encontraram:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} [1 + (8,1716e^{-4,0655\Phi_s})Re_p^{(0,0964+0,5565\Phi_s)}] + \frac{73,69(e^{-5,0748\Phi_s})Re_p}{Re_p + 5,378e^{6,2122\Phi_s}} \quad (2.12)$$

Através da Figura 7 é possível fazer uma avaliação direta de  $u_t$  através de  $d_p$  e das propriedades físicas do sistema. Introduce-se o tamanho de partícula adimensional ( $d_p^*$ ) e a velocidade adimensional do gás ( $u^*$ ) obtidos pelas expressões (KUNII; LEVENSPIEL, 1991),

$$d_p^* = d_p \left[ \frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right]^{1/3} = Ar^{1/3} = \left( \frac{3}{4} C_D Re_p^2 \right)^{1/3}, \quad (2.13)$$

e

$$u^* = u_t \left[ \frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{1/3} = \frac{Re_p}{Ar^{1/3}} = \left( \frac{4}{3} \frac{Re_p}{C_D} \right)^{1/3} \quad (2.14)$$

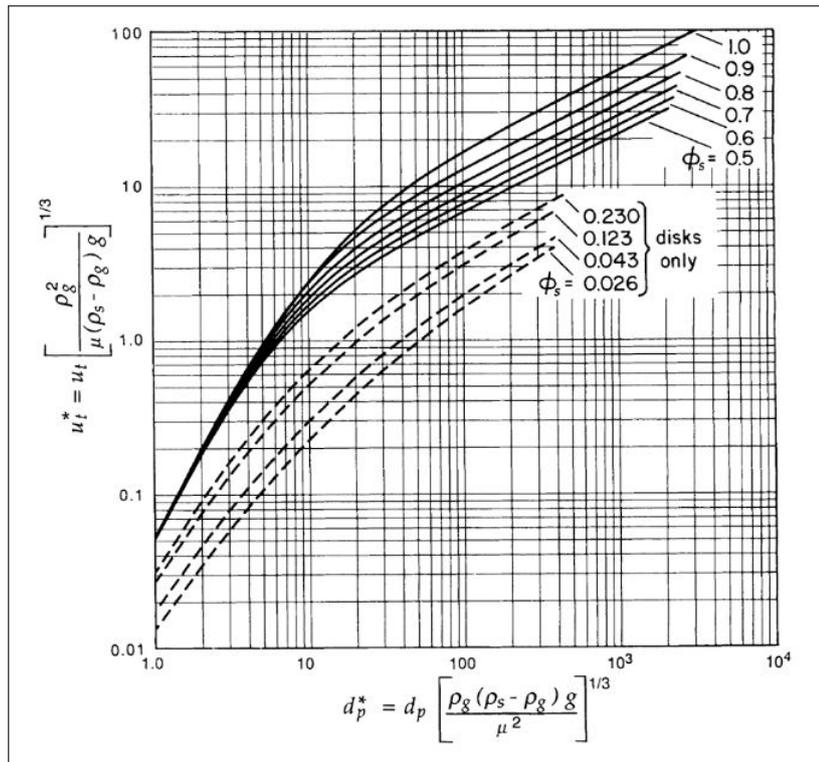
Uma aproximação para a direta avaliação da velocidade terminal das partículas ( $u_t^*$ ) é dada por Haider e Levenspiel (1989) como:

$$u_t^* = \left[ \frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2,335 - 1,744\Phi_s}{(d_p^*)^{0,5}} \right]^{-1}, \quad 0,5 < \Phi_s < 1 \quad (2.15)$$

Nota-se que para uma avaliação de  $u_t$  na Figura 7 utiliza-se os valores encontrados na Equação 2.15 e Equação 2.13.

Para evitar ou diminuir o carregamento de partículas, deve-se manter a velocidade do gás entre  $u_{mf}$  e  $u_t$ . No cálculo de  $u_{mf}$  utiliza-se o diâmetro médio  $\bar{d}_p$  ao passo que para  $u_t$  deve-se usar o menor tamanho de sólidos presentes em quantidade considerável (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Figura 7 – Mapa para a velocidade terminal de partículas caindo através de fluidos.



Fonte: Kunii e Levenspiel (1991, p. 81).

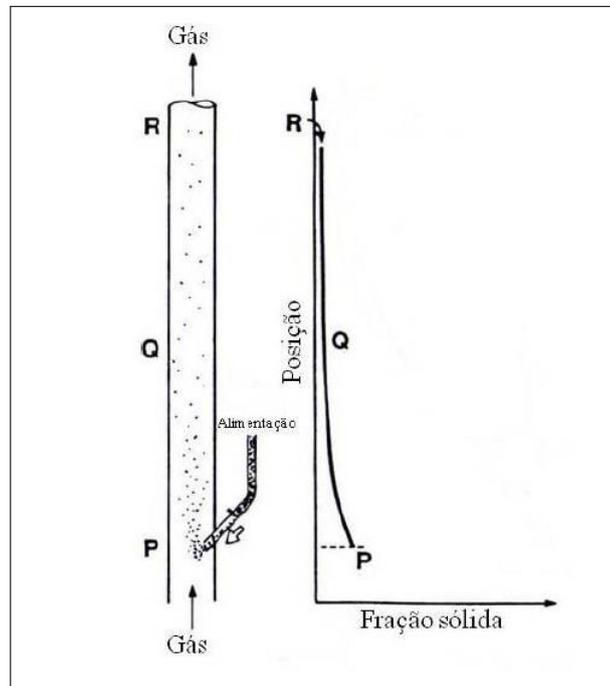
Como neste projeto o objetivo é justamente obter o carregamento apenas das partículas de casca, a velocidade do ar  $u_0$  deve ser mantida entre a maior velocidade terminal avaliada para a partícula de casca e a menor avaliada para a amêndoa. Tal consideração é detalhada na subseção 4.1.2.

## 2.5 Transporte Pneumático

Como dito na seção 2.4 outro regime encontrado em máquinas de separação pneumática é o chamado transporte pneumático. Considerando um fluxo ascendente de ar onde é feita uma alimentação de pequenos sólidos em um tubo, se a velocidade do ar ( $u_0$ ) é alta o suficiente e a taxa de alimentação de sólido é baixa o suficiente como mostrado na Figura 8, todas as partículas serão carregadas tubo acima, dispersas no gás (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Segundo Costa (2005) o transporte pneumático consiste no deslocamento de materiais a granel por meio de corrente de ar com velocidade adequada. Ele pode ser feito por aspiração, por compressão ou por sistema misto.

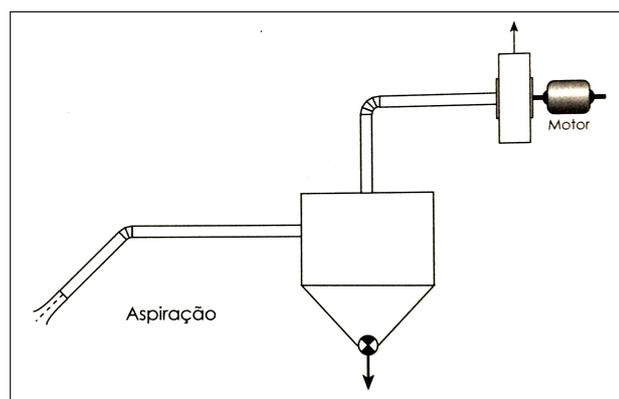
Figura 8 – Alimentação vertical de sólidos em um leito onde ocorre o transporte pneumático de partículas.



Fonte: Kunii e Levenspiel (1991, p. 85).

O transporte pneumático por aspiração (Figura 9) é geralmente utilizado quando se deseja remover o material a granel que não pode entrar no sistema por ação da gravidade (COSTA, 2005).

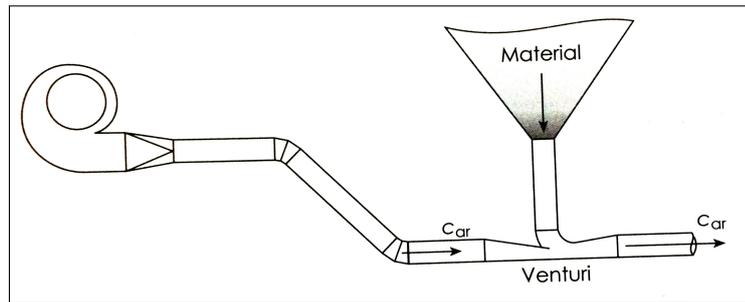
Figura 9 – Esquema de um transporte pneumático por aspiração.



Fonte: Costa (2005, p. 214).

O transporte pneumático por compressão por sua vez (Figura 10), é utilizado sempre que o material for introduzido no sistema por gravidade, como ocorre quando se dispõem de uma tulha ou moega de alimentação por onde sai material pela parte inferior (COSTA, 2005).

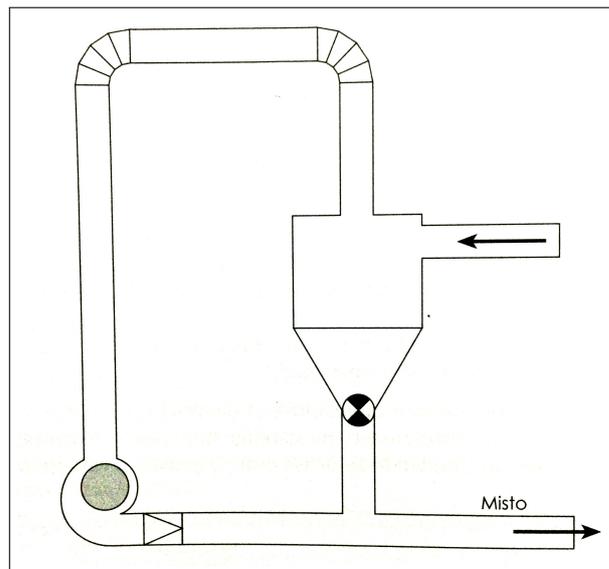
Figura 10 – Esquema de um transporte pneumático por compressão



Fonte: Costa (2005, p. 215).

O sistema misto é composto pela aspiração e compressão combinadas (Figura 11). É utilizado mais como equipamento portátil, de pequena capacidade e até mesmo sobre rodas (COSTA, 2005).

Figura 11 – Sistema misto aspiração e compressão.

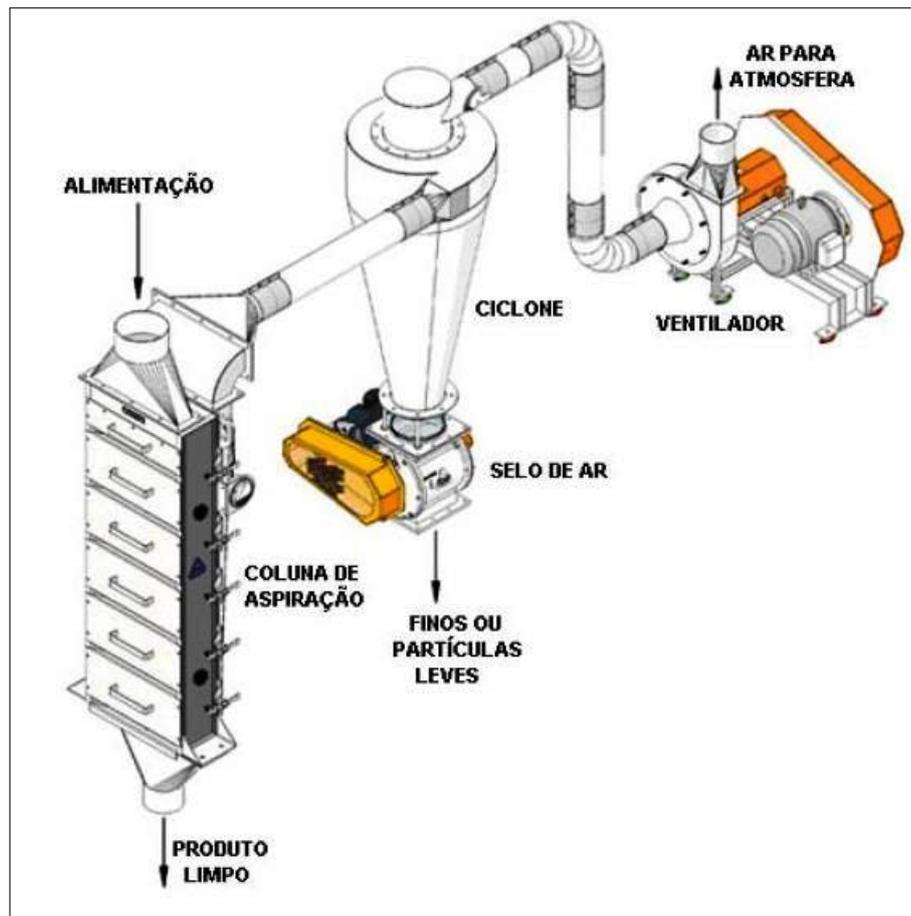


Fonte: Costa (2005, p. 216).

## 2.6 Coluna de Separação

Um sistema de separação com ar geralmente conta com um alimentador (espalhador rotatório de corrente, alimentador rotatório de ventoinha, etc.), uma fonte de sucção (ventilador centrifugo com controle de damper), um receptor/separador (ciclone separador coletor ou filtro de manga), um selo de ar para descarregar os finos (válvula de câmara rotatória) e um duto de conexão. Todos estes componentes, mostrados na Figura 12, devem ser avaliados e combinados para obter em conjunto a máxima eficiência (KICE, 2015).

Figura 12 – Sistema básico de separação por aspiração.

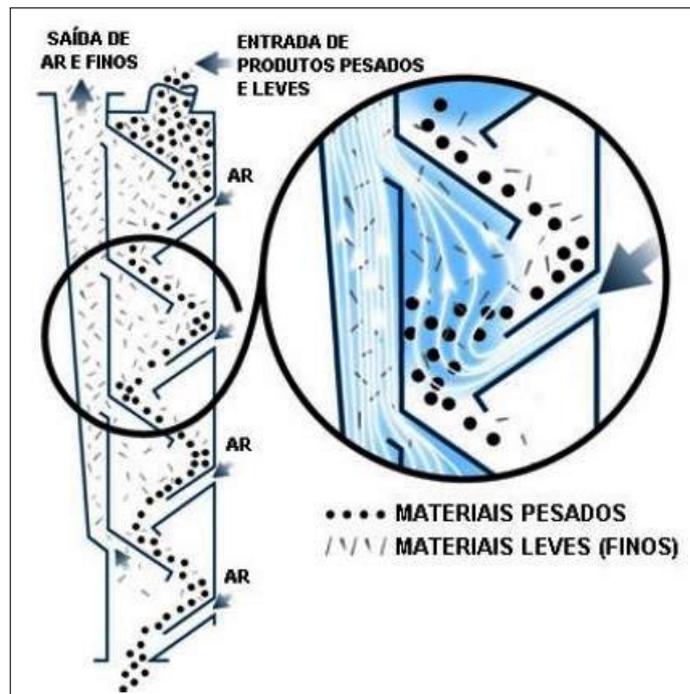


Fonte: Kice (2015).

Na coluna de separação o produto é separado tanto pelo tamanho quanto por sua densidade, tirando vantagem das diferenças nas velocidades terminais dos produtos em questão. O ar ambiente é aspirado através do produto levantando as partículas mais leves para uma câmara de seleção, determinando se serão transportadas para fora ou se permanecerão com as mais pesadas. Logo, as partículas mais leves transportadas pela corrente de ar são separadas do produto. Este por sua vez, cai para uma próxima câmara de seleção, onde as partículas remanescentes podem passar novamente pelo processo de seleção sendo expostas a uma nova corrente de ar. Este processo pode ser repetido várias vezes, como mostrado na Figura 13 (KICE, 2015).

Para uma separação eficaz por meio de classificação com ar é necessário ter o controle de fluxo do produto dentro da coluna de aspiração e distribuí-lo através de toda a largura da coluna de aspiração, o que pode ser feito através de uma tela de ajuste pivotante adicional. Também é importante que a coluna de aspiração seja projetada para que se tenha um fluxo de ar uniforme em todos os declives que forem utilizados, além de possuir um ajuste da vazão de ar para fazer o controle da velocidade terminal da separação requerida. Assim o sistema deve dispor de ventiladores com capacidade suficiente para remover mais material do que requerido (KICE, 2015; PIVATTO, 2013).

Figura 13 – Funcionamento da coluna de separação em um sistema de aspiração.



Fonte: Kice (2015).

De acordo com Kice (2015) em alguns produtos pode haver uma grande variedade nos tipos de partículas encontradas. Partículas de pequena densidade podem voar com a mesma velocidade que as partículas maiores que são abertas. Assim, a separação destas partículas que tem a mesma velocidade terminal, porém diferentes tamanhos e formas pode ser feita por peneiramento prévio, ou seja, pode ser desejável peneirar antes da coluna de aspiração. Isto diminui a faixa de tamanho de partículas e a sobreposição de velocidades terminais, minimizando-a dentro da corrente da coluna de aspiração. Em outros casos pode ser mais prático peneirar os produtos já aspirados pela coluna de aspiração.

### 2.6.1 Potência de Instalação ( $P_m$ )

A corrente de ar em transporte pneumático é geralmente, dependendo da pressão necessária ao sistema, fornecida por um ventilador centrífugo. Este por sua vez é acionado por motor elétrico, diretamente ou por meio de transmissão.

Costa (2005) delimita os fatores mais importantes, dos quais a potência de instalação do sistema depende, como:

- quantidade de material e distância a transportar;
- desnível;
- tipo de instalação (aspiração, compressão ou misto);
- características do material;

- relação em peso estabelecida;
- traçado e acessórios da rede.

Assim, analisando todas as perdas de carga que constam na instalação, descritas como diferença de pressão total ( $\Delta p_t$ ) do ventilador, expressa-se a potência de instalação por (COSTA, 2005):

$$P_m = \frac{Q\Delta p_t}{75\eta_t} \left[ \frac{10332 \pm \frac{\Delta p_t}{2}}{10332} \right] \quad [cv] \quad (2.16)$$

Onde,

$Q$  = vazão de ar;

$\eta_t$  = rendimento total do ventilador.

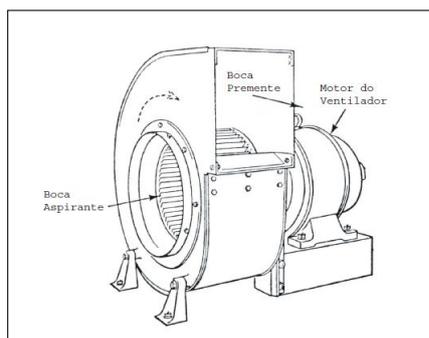
Caso o ventilador tenha acoplamento direto ao motor, a potência do motor selecionado deve ser no mínimo ( $P_m$ ). Se o acoplamento direto não é possível, deve-se acrescentar à potência do motor de acionamento o rendimento da transmissão ( $\eta_t$ ) adotada, geralmente por polia e correia (0,85%).

## 2.7 Ventiladores Centrífugos

Um elemento muito importante em um sistema pneumático é o sistema mecânico de acionamento, no caso o ventilador centrífugo. Por isso é necessário uma revisão a certa dos princípios de funcionamento e classificação destes equipamentos.

Ventiladores centrífugos são constituídos de um rotor que gira dentro de uma carcaça, onde o fluxo do ar na entrada é paralelo ao eixo de rotação do rotor, centrifugado para a carcaça em espiral e expulso pela boca ortogonal ao eixo de rotação do rotor, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Ventilador centrífugo.



Fonte: MILMAN (2002, p. 34).

### 2.7.1 Nível Energético de Pressão

Ventiladores centrífugos se caracterizam pela sua capacidade de fornecer altas vazões e pressões, sendo que a pressão desenvolvida por um ventilador é composta de três parcelas: pressão dinâmica, pressão estática, pressão total (MILMAN, 2002).

A pressão dinâmica ( $P_v$ ) é a pressão fornecida pelo ventilador para manter o ar em movimento, pois o ar, como qualquer outro fluido, flui naturalmente das zonas de alta para as de baixa pressão com uma dada velocidade, que depende do gradiente existente entre elas. A pressão estática ( $P_s$ ) por sua vez, é a pressão efetiva que o ventilador deve proporcionar ao ar em escoamento, para que sua vazão não diminua contra as resistências do sistema, ou seja, é igual à perda de carga do sistema ao qual ele está acoplado. A soma das pressões dinâmica e estática é a pressão total do ventilador:  $P_t = P_v + P_s$  (MILMAN, 2002).

De acordo com MILMAN (2002) ventiladores centrífugos podem ser classificados quanto a pressão total fornecida:

- Baixa pressão: até 200  $mmH_2O$ ;
- Média pressão: entre 200 e 800  $mmH_2O$ ;
- Alta pressão: entre 800 e 2500  $mmH_2O$ ;
- Turbo compressores: maior que 2500  $mmH_2O$ .

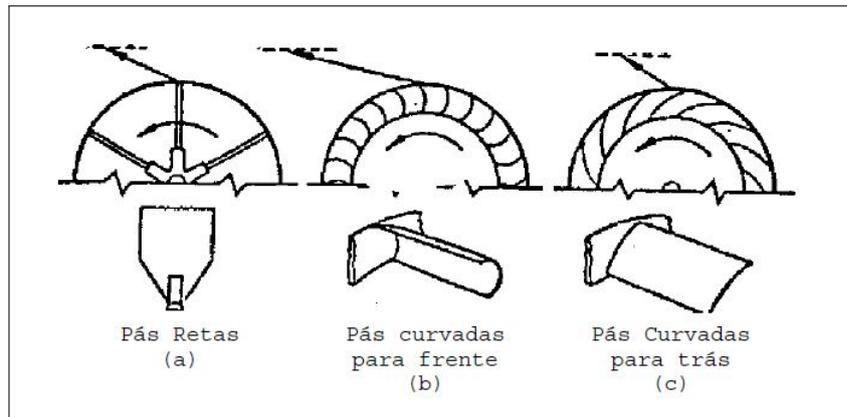
### 2.7.2 Tipo de Construção

Os ventiladores centrífugos também podem ser classificados em função do tipo de rotor (Figura 15) (MILMAN, 2002):

- Ventiladores radiais ou de pás retas: apresentam grande tamanho, baixo rendimento (em torno de 70 %), podendo atingir com um único rotor a pressão de 3500  $mmH_2O$  (MILMAN, 2002; COSTA, 2005);
- Ventiladores de pás curvadas para frente: melhor relação entre tamanho e capacidade que o ventilador de pás retas, rendimento em torno de 85% e fornecem vazões elevadas (MILMAN, 2002);
- Ventiladores de pás curvadas para trás: do tipo *limit load* com consumo limitado de potência, melhores rendimentos (em torno de 90%), pressão máxima é da ordem de 1000  $mmH_2O$  (MILMAN, 2002; COSTA, 2005).

Outra forma de classificação devido à forma construtiva é quanto ao número de bocas aspirantes, simples aspiração ou dupla aspiração. Este segundo equivale a dois ventiladores de simples aspiração em paralelo além de ter seu tamanho reduzido (MILMAN, 2002).

Figura 15 – Tipos de rotores de ventiladores centrífugos.



Fonte: MILMAN (2002, p. 35).

### 2.7.3 Caracterização de Partículas Sólidas

Segundo McCabe, Smith e Harriott (1993), as partículas sólidas individuais são caracterizadas por seu tamanho, forma e densidade. Partículas de sólidos homogêneos tem a mesma densidade encontrada no material inteiro. Tamanho e forma são facilmente identificados em partículas regulares, como esferas e cubos, mas para partículas irregulares (como flocos) os termos de tamanho e forma não são tão claros e precisam ser arbitrariamente definidos.

- **Densidade de Partícula:**

Existem dois tipos de densidade de partículas, real e aparente. A densidade real das partículas é calculada tomando a massa das partículas e dividindo-a pelo seu volume, excluindo poros abertos e fechados. A densidade aparente de partícula única é diferente na medida em que inclui o volume de poros fechados sobre a superfície das partículas no volume de medição. A densidade real é frequentemente medida com um picnômetro de gás hélio ou pelo método de deslocamento de tolueno. Já a densidade aparente das partículas é melhor obtida a partir de medições de tamanho das partículas (LITTLEFIELD, 2010). Assim, a densidade de partícula  $\rho_p$  é dada pela razão da massa do material de amostra  $m_p$  e do seu volume  $V_p$  (Equação 2.17).

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (2.17)$$

Segundo Littlefield (2010) em seu estudo de caracterização da casca da noz-pecã a densidade de partícula real da casca é em torno de  $1439 \text{ kg/m}^3$ , dependendo do tamanho das partículas. Em seu estudo, também identificou que a umidade é outro fator que tem grande influência no valor da densidade.



## 3 Materiais e Métodos

Neste capítulo é apresentada a metodologia para a realização do projeto do separador e teste para o levantamento de parâmetros.

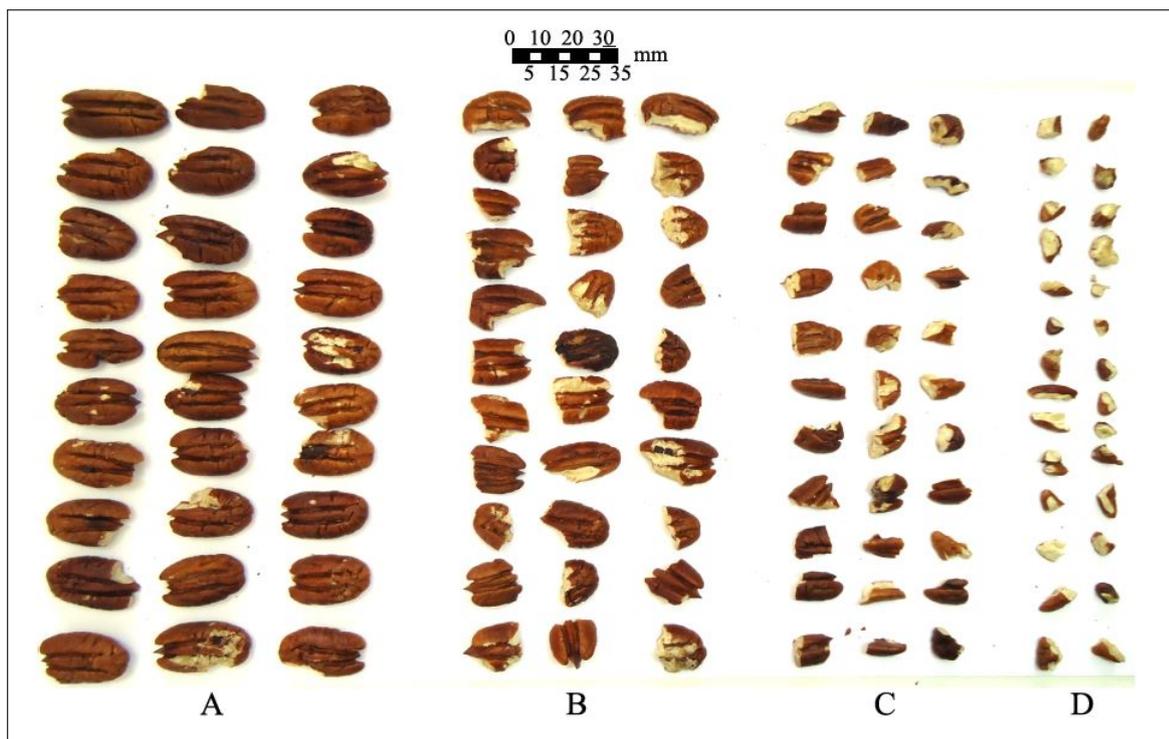
No desenvolvimento deste trabalho utilizou-se noz pecã com características semelhantes às encontradas nas cultivares Moneymaker e Importada (Tabela 1 na página 28). As nozes foram adquiridas de plantios de noqueira-pecã localizados em Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul. Os frutos correspondem a safra de 2015 e constituem uma amostra de aproximadamente 1 kg.

No laboratório da empresa Caramuru Alimentos, localizada em Itumbiara, as nozes foram secas em um analisador de umidade por infra-vermelho (marca *CEHAKA*, modelo *IV2000*) à 40°C até que atingissem o teor de umidade de 7 % *b.u.* (base úmida). Após alcançar a umidade necessária, com a qual se inicia o beneficiamento, as nozes foram descascadas e divididas em 5 granulometrias diferentes de cascas e 5 de amêndoas.

### 3.1 Produto de Separação

Após teste realizado com um decortificador utilizando frutos *in natura*, Solane (2015) obteve um rendimento de 53,81% de amêndoas inteiras, 27,80% de amêndoas pela metade e os outros 18,39% entre os demais grupos. Os resultados podem ser vistos na Figura 16.

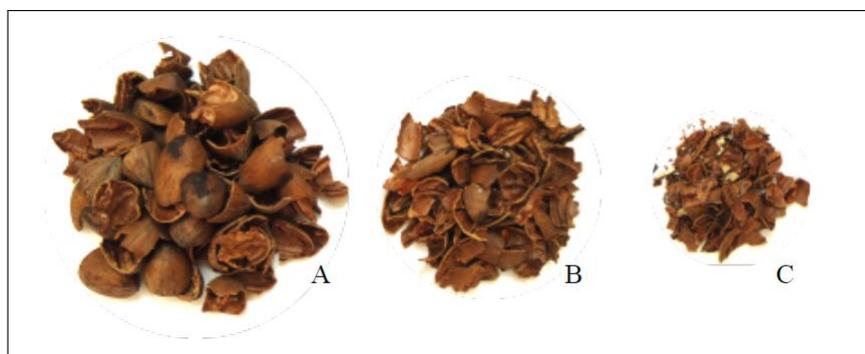
Figura 16 – Granulometria das Amêndoas após a decorticação



Fonte: Solane (2015).

Do mesmo modo, Solane (2015) classificou as cascas em três grupos principais como mostrado na Figura 17

Figura 17 – Granulometria das cascas após a decorticação



Fonte: Solane (2015).

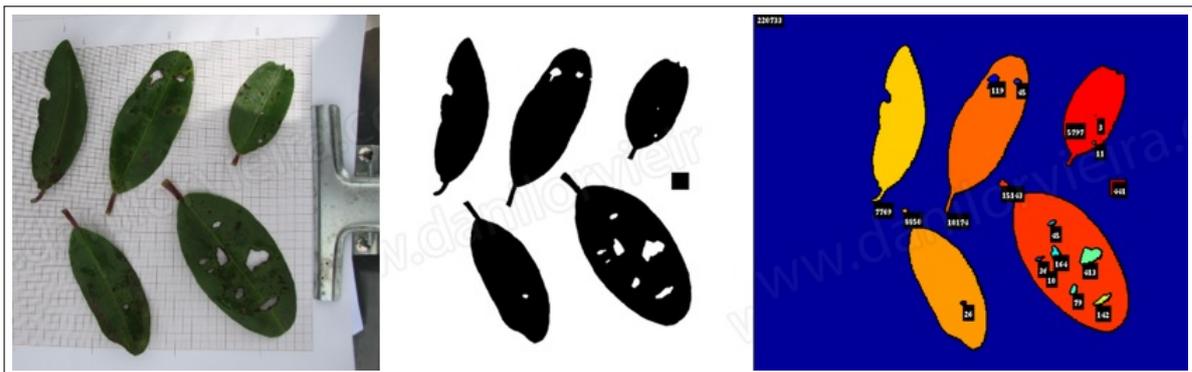
As partículas apresentaram grande variação de tamanho, que dependem dos parâmetros utilizados no decortificador.

## 3.2 Razão massa/área projetada da casca e amêndoa

Para avaliar possibilidade de uso da separação pneumática neste trabalho, inicialmente foi avaliada a diferença entre razão massa/área projetada  $\frac{m}{A_p}$  da casca e da amêndoa.

As áreas projetadas ( $A_p$ ) de cada partícula da amostra de casca e amêndoa foram obtidas utilizando processamento de imagem no software *MATLAB*. As amostras foram colocadas separadamente em cima de uma superfície branca, na qual havia um quadrado desenhado de  $1\text{ cm}^2$  de área. Assim, foram tiradas fotos com escala a partir das vistas superiores de cada amostra. Passando as fotos para uma escala preto e branco e identificando os contornos existentes, fez-se a contagem dos pixels em cada área da imagem. A área dada em pixel foi convertida para  $\text{cm}^2$  dividindo-a pela quantidade de pixels existente em  $1\text{ cm}^2$ . Um exemplo de aplicação de processamento de imagem na obtenção da área foliar é mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Uso do *MATLAB* na obtenção da área de folhas.



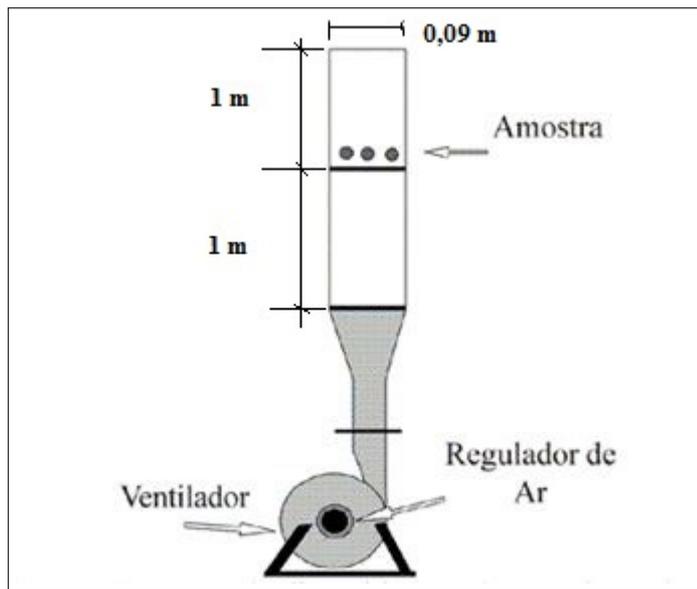
Fonte: Adaptado de Vieira (2016).

Na medição de massa das amostras utilizou-se uma balança analítica com precisão de  $0,1\text{ mg}$  (marca *SHIMADZU*, modelo *AY 220*). As massas de cada amostra foram medidas separadamente.

## 3.3 Avaliação Experimental da Velocidade Terminal

Para determinação experimental da velocidade terminal ( $u_t$ ) das amostras de casca e amêndoa, utilizou-se um dispositivo composto de um motor elétrico para acionamento, um ventilador centrífugo conectado a um tubo de acrílico transparente de  $90\text{ mm}$  de diâmetro interno e 2 metros de comprimento de acordo com o esquema da Figura 19. As amostras foram acomodadas sob uma tela de  $2\text{ mm}$  de abertura a 1 metro da saída superior do tubo. As mesmas foram submetidas a um fluxo de ar controlado por meio de um regulador. Assim, no início do arraste das partículas, a velocidade do ar era anotada por meio de um anemômetro posicionado na saída do tubo. Esta velocidade é tida como velocidade terminal da partícula.

Figura 19 – Esquema de dispositivo utilizado para determinar a velocidade terminal da amostra.



Fonte: Adaptado de Couto et al. (2003).

O procedimento foi realizado separadamente para cada amostra em 3 repetições para cada granulometria, sempre utilizando partículas diferentes. Os dados obtidos foram comparados pelo método de Tukey a 5 % de probabilidade, que é o teste utilizado para comparar médias duas a duas.

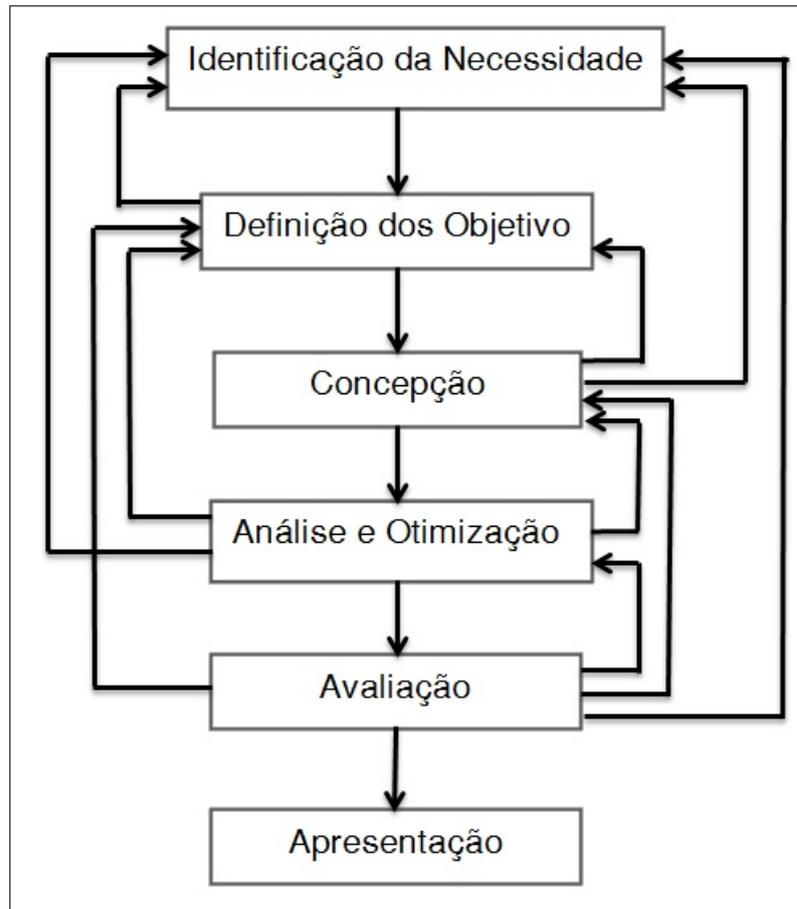
### 3.4 Fases do projeto

O fluxograma da metodologia utilizada para o desenvolvimento deste projeto é mostrado a seguir, para que, antes de chegar ao estágio de dimensionamento, a máquina já tenha sua cinemática definida.

#### 1. Identificação da Necessidade:

O projeto iniciou-se a partir desta etapa de identificação da necessidade. Como descrita na seção 1.1. O trabalho tem como motivação o projeto Quebra - Nozes, que visa o desenvolvimento de equipamentos mais baratos e acessíveis para o beneficiamento da noz pecã, principalmente na região sul. Com a crescente demanda por noz e o preço atrativo para os produtores é necessária a disponibilidade de equipamentos eficientes. A necessidade específica de um separador para cascas e amêndoas de noz-pecã é devida a outros projetos como da máquina decortadora de noz e de uma peneira vibratória para classificação das amêndoas, ambos concluídos no Quebra - Nozes.

Figura 20 – Fases do Projeto com Iterações.



## 2. Definição dos objetivos:

Dentro dessa etapa ocorreu a pesquisa bibliográfica com o objetivo de identificar os principais aspectos relacionados à separação de sólidos. Foram analisados os tipos de processos separação empregados na indústria, os fatores que influenciam a escolha do método de separação e as características da casca e amêndoa.

## 3. Concepção:

Nesta fase buscaram-se diversas soluções que atendiam os objetivos gerais e específicos definidos na fase anterior. Além dos objetivos também foram levados em consideração os parâmetros de operação levantados durante a pesquisa bibliográfica como as características físicas da noz. Assim definiu-se o uso do método de separação por aspiração de ar, como sendo o mais simples e adequada.

## 4. Análise e Otimização:

Esta etapa está iterativamente ligada com a concepção. Nesta fase busca-se a análise matemática do modelo escolhido. No modelo matemático assim dito, é esperado um comportamento mais próximo possível do real. Assim o projeto detalhado e cálculos de dimensionamento de componentes são realizados.

Outra característica dessa fase é a otimização do projeto em termos dos processos de manufatura a serem aplicados. Todos os elementos devem ter a geometria e funcionalidade compatíveis com os métodos de fabricação comumente usados. A fase de análise e otimização é demonstrada a partir do Capítulo 4 deste trabalho.

#### 5. Avaliação:

A fase da avaliação é muito importante no complemento do projeto. O objetivo é descobrir se o separador efetua a separação com eficiência, fazendo possíveis correções em relação aos parâmetros iniciais teóricos. Algumas questões devem ser respondidas, como se o projeto realmente satisfaz as necessidades, se é confiável, se é economicamente viável de se construir e se é fácil de ser operado e regulado.

Como observado no fluxograma da Figura 20, até esta fase de avaliação o projeto é um processo iterativo, ou seja, ao fim de cada etapa são avaliados os resultados podendo-se voltar a uma etapa anterior a fim de realizar melhorias.

#### 6. Apresentação:

Tendo passado por todas as outras etapas com sucesso, tem-se como última fase e não menos importante a apresentação. O produto é apresentado de forma clara, exaltando suas capacidades e características.

## 4 Desenvolvimento

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do projeto desde a caracterização do produto (casca e amêndoa), até a concepção e o dimensionamento do separador. Foram tomadas decisões a cerca da melhor forma de obter as características de granulometria e velocidade terminal. Estas considerações são mostradas nas seções subsequentes.

### 4.1 Caracterização do Produto de Separação

Para o desenvolvimento de qualquer equipamento de separação é extremamente importante determinar as condições necessárias para que o produto seja separado, a fim de levantar os parâmetros iniciais necessários para o projeto. Contudo, as cascas e amêndoas se apresentam como produtos de difícil caracterização após o processo de decorticação da noz-pecã. Isto se deve a sua heterogeneidade e forma irregular das partículas.

#### 4.1.1 Razão Massa/Área Projetada

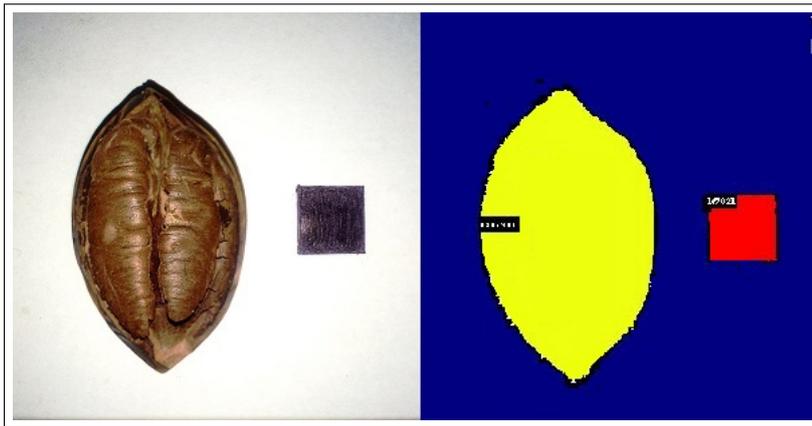
Inicialmente foi realizada uma avaliação a respeito da viabilidade de se utilizar a separação pneumática como tipo de separação da casca/amêndoa. Para isso, utilizou-se a razão massa/área projetada da partícula em diferentes amostras granulométricas de casca e amêndoa. Estas amostras são mostradas na Figura 21.

Figura 21 – Amostras de diferentes granulometrias de casca e amêndoa.



Os procedimentos descritos na seção 3.2 foram realizado para cada amostra da Figura 21 separadamente. Basicamente posicionou-se as amostras sobre uma folha branca e se desenhou um quadrado de  $1\text{ cm}^2$  na folha ao lado da amostra para referência. Assim, foram tiradas fotos da vista superior das amostras. Através do processamento de imagens, foi feita a contagem de pixels de cada área delimitada na imagem, onde as partes amarela e vermelha na Figura 22 são as áreas da amostra e do quadrado desenhado, respectivamente.

Figura 22 – Procedimento para obtenção da área em *MATLAB*.



Logo, a área projetada da partícula ( $A_p$ ) é expressa por:

$$A_p = \frac{\text{Quantidade de pixels na amostra}}{\text{Quantidade de pixels em } 1\text{ cm}^2} [\text{cm}^2] \quad (4.1)$$

Os resultados médios de distribuição de massa por unidade de área obtidos são apresentados na Tabela 3. Os dados para todas as granulometrias estão dispostos no Anexo.

Tabela 3 – Razão média massa/área projetada para casca e amêndoa.

	Massa (g)	Área ( $\text{cm}^2$ )	Massa/Área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )
Casca	0,6398	3,9680	0,1612
Amêndoa	0,8138	2,0044	0,4060

Analisando a Tabela 3 nota-se que  $m/A_p$  avaliada na amêndoa é cerca de 2,5 vezes maior do que na casca, o que indica a possibilidade do uso da separação pneumática neste caso. Entretanto, esta é uma análise superficial, devendo ser determinados parâmetros mais precisos como  $u_t$ .

#### 4.1.2 Determinação da Velocidade Terminal

Como dito na seção 4.1 as partículas de casca e amêndoa são de difícil caracterização devido a sua granulometria heterogênea e grandes dimensões. Por isso, optou-se por uma determinação experimental da velocidade terminal da casca  $u_{tc}$  e amêndoa  $u_{ta}$ .

O experimento foi realizado conforme detalhado na seção 3.3, onde cada partícula da amostra (Figura 21) foi submetida a uma corrente de ar ascendente, tendo sua velocidade de arraste aferida por meio de um anemômetro.

Os valores das respectivas velocidades terminais, os desvios padrão e coeficientes de variação são apresentados na Tabela 4. Cada valor representa a média de três determinações.

Tabela 4 – Valores médios das velocidades terminais obtidos experimentalmente.

Granulometria	$u_{tc}$ (m/s)	$u_{ta}$ (m/s)
1	8,75	15,58
2	10,39	15,67
3	10,54	14,78
4	9,12	16,03
5	9,76	14,90
Média	9,71 <i>a</i>	15,39 <i>b</i>
Desvio Padrão	0,78	0,53
Coef. de Variação (%)	7,99	3,47

Obs.: letras diferentes indicam que, no nível de significância de 5%, há diferença entre as médias.

Nota-se que existe uma grande diferença entre a média de  $u_{tc}$  e  $u_{ta}$ , provavelmente devido a menor distribuição de massa por unidade de área projetada e a forma menos aerodinâmica da casca. Isto significa que sob uma corrente de ar, cuja a velocidade esteja entre estes valores, apenas a casca será carregada.

## 4.2 Concepção do Separador

A concepção do separador pneumático foi elaborada de forma que suprisse os objetivos inicialmente propostos. Ou seja, apresentar uma capacidade de operação maior à do decortificador que é de 100 kg/h (SOLANE, 2015), ser compacto e que realize a separação de forma contínua, utilizando ar em condições normais como agente de separação.

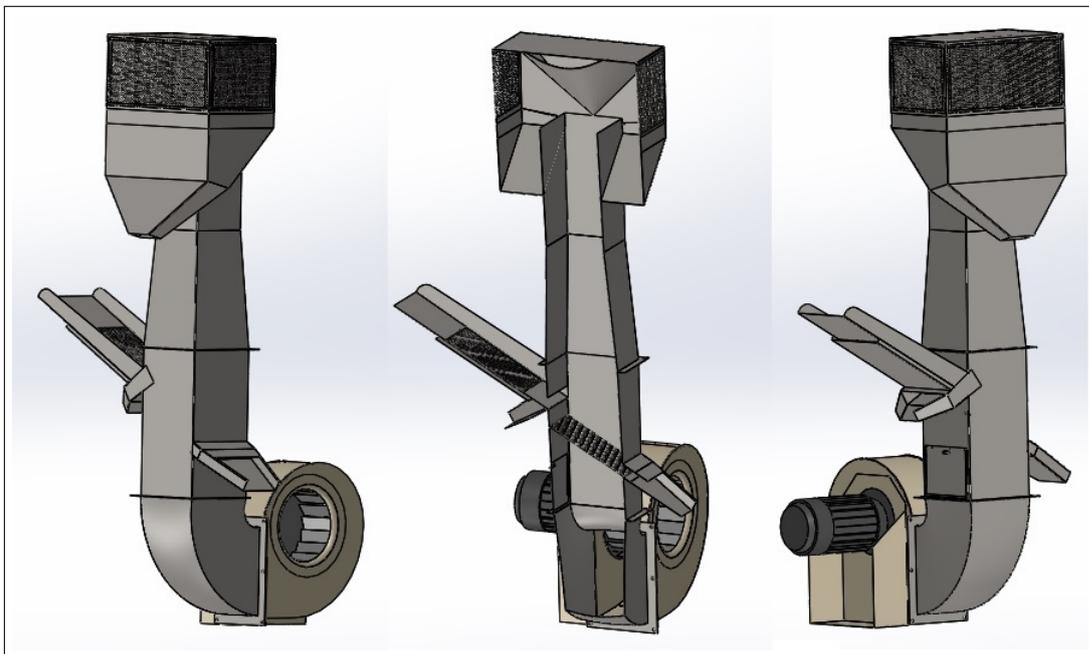
As decisões de projeto foram tomadas tendo como base a relação tamanho/capacidade do equipamento. Portanto, o separador deve ter como funções e premissas:

- capacidade de separação mínima de 300 kg/h;
- separação por compressão, o produto entra no sistema por gravidade;
- alimentação de produto em regime contínuo diretamente no sistema;
- introdução de ar no sistema por ventilador centrífugo acionado por motor elétrico;

- f) construção em aço inoxidável (*AISI 304*) conforme orienta a NSF International/American National Standards Institute *NSF/ANSI – 51*.

A escolha de um sistema por compressão se deve ao fato de ele ser mais simples de se implementar. Ou seja, elimina a necessidade de uma válvula de alimentação e ciclone para separação de finos. Também foi estipulada uma capacidade maior do que a mínima recomendada. A partir destas decisões foi possível gerar a concepção do equipamento, como apresentado na Figura 23.

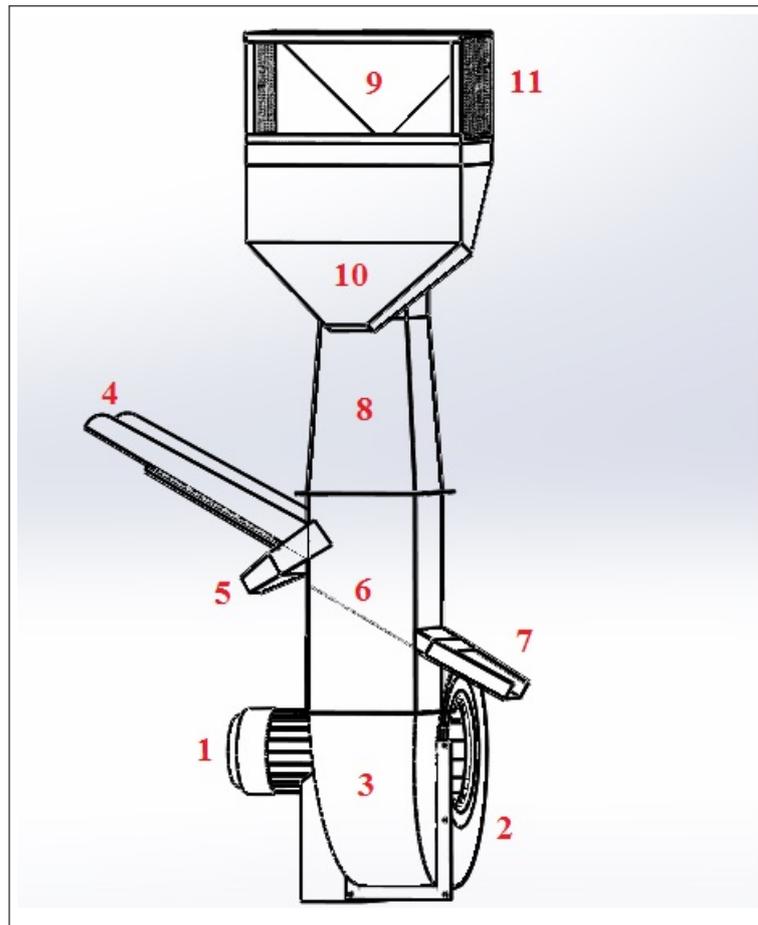
Figura 23 – Concepção do separador



O princípio de funcionamento do equipamento está baseado na elutriação das diferentes partículas do produto, no caso noz pecã decorticada. O processo tem início com o acionamento do ventilador centrífugo, o qual gera um diferencial de pressão no duto provocando um fluxo de ar ascendente até a saída superior da coluna de separação. Com o fluxo de ar estabilizado o produto é alimentado diretamente no sistema por ação da gravidade. Ao entrar em contato com a corrente de ar de velocidade adequada, as partículas mais leves e menos aerodinâmicas do produto polidisperso são carregadas e coletadas na saída de ar na parte superior. As partículas mais pesadas caem através da coluna e são desviadas para fora do sistema por uma grade inclinada.

De modo a compreender melhor a explicação anterior, a Figura 24 ilustra os componentes do separador.

Figura 24 – Componentes do equipamento separador



Onde,

1. Motor elétrico para acionamento;
2. Ventilador centrífugo, responsável por gerar o fluxo de ar no sistema;
3. Curva com redução de área ligando o ventilador à coluna de separação;
4. Bica de alimentação de produto, onde cascas e amêndoas descem por gravidade e onde a fração muito fina de casca (farelo) e amêndoa são retiradas por uma peneira instalada na bica;
5. Bica de saída da fração fina de casca coletada (4);
6. Primeiro módulo da coluna de separação onde é alimentado o produto por gravidade, e onde se separam as partículas de casca por cima (8) e amêndoa por uma grade inclinada para o lado (7);
7. Bica de saída da amêndoas, onde as mesmas são direcionadas para fora por meio uma peneira inclinada dentro da coluna de separação;

8. Segundo módulo da coluna de separação, onde as cascas são carregadas pela corrente de ar ascendente para a saída superior (10);
9. Meio cone invertido que tem por objetivo direcionar as partículas de cascas para as laterais retirando-as do fluxo de ar;
10. Coletor de cascas, onde as mesmas retiradas da corrente de ar, são direcionadas para a saída;
11. Telas laterais responsáveis por permitir a saída de ar do sistema e reter as cascas.

Delimitadas as funcionalidades de cada componente dentro do sistema, iniciou-se o dimensionamento e seleção, como apresentado nas seções subsequentes.

### 4.3 Projeto do Separador Pneumático

O projeto do separador, tal como o dimensionamento e seleção de componentes foi realizado tendo como base principal a metodologia descrita por Costa (2005), onde as mesmas foram utilizadas de acordo com o objetivo do projeto.

#### 4.3.1 Dimensionamento da coluna de separação

Após definir o escopo do equipamento algumas decisões foram tomadas. Primeiramente definiu-se a velocidade de ar ( $u_{ar}$ ) a ser utilizada. Se a  $u_{ar}$  for maior que a velocidade terminal do produto o mesmo será arrastado pelo fluxo. Como o objetivo é a separação, a mesma deve estar entre as velocidades terminais da casca ( $u_{tc} = 9,71 \text{ m/s}$ ) e amêndoa ( $u_{ta} = 15,39 \text{ m/s}$ ) determinadas experimentalmente na subseção 4.1.2.

Uma boa dispersão do produto no fluxo de ar é um dos fatores que aumentam a eficiência da coluna de separação e está diretamente ligado a área da secção da coluna. Assim, optou-se por uma coluna de separação vertical de secção quadrada de  $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$ , ou seja, com a área da secção transversal  $A = 0,0625 \text{ m}^2$ . Inicialmente avaliou-se para esta área uma velocidade  $u_{ar} = 13 \text{ m/s}$ . Calculando o regime de escoamento para as condições pré-estabelecidas, tem-se:

$$Re = \frac{\rho_{ar} u_{ar} D}{\mu_{ar}} \quad (4.2)$$

Onde:

$Re$  = número de Reynolds;

$D$  = diâmetro do tubo;

$\mu_{ar}$  = viscosidade dinâmica do ar [ $17,4 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ].

Assim, pela Equação 4.2,

$$R_e = \frac{1,2 \cdot 13,0 \cdot 25}{17,4 \cdot 10^{-6}} = 224138 = 2,24 \cdot 10^5$$

Logo, este número de Reynolds caracteriza um escoamento em regime turbulento.

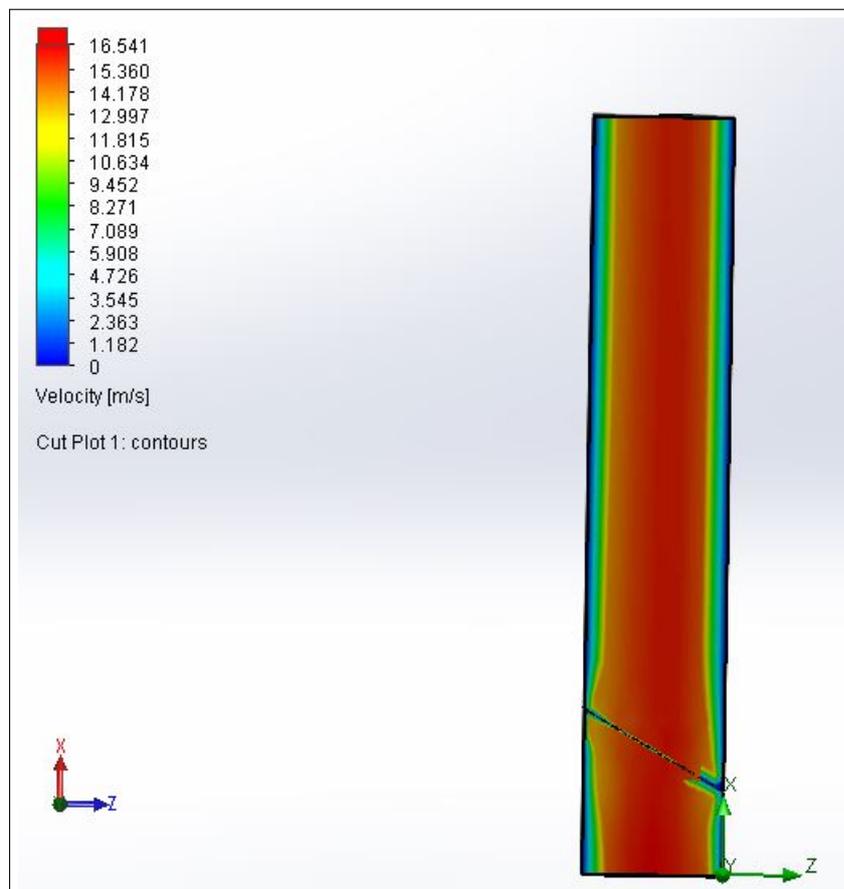
A vazão ( $Q$ ) necessária para se manter esta velocidade na secção é dada por:

$$Q = Au_{ar} = 0,0625 \cdot 13 = 0,8125 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.3)$$

Entretanto, esta equação trabalha com valores médios, ou seja, determinados pontos da secção de escoamento apresentam velocidades distintas. Caso estes pontos de máxima velocidade alcancem um valor superior a velocidade terminal da amêndoa, estas partículas também serão arrastadas. Portanto, uma análise um mais profunda foi necessária.

Utilizando o software *SolidWorks Flow Simulation*, analisou-se o escoamento ao longo do primeiro módulo da coluna de separação para a vazão inicialmente calculada  $Q = 0,8125 \text{ m}^3/\text{s}$ . A Figura 25 apresenta o perfil de velocidade através de um corte ao longo do duto. Também tomou-se algumas considerações para a simulação, como escoamento completamente desenvolvido na entrada (parte inferior) e pressão atmosférica na saída (parte superior).

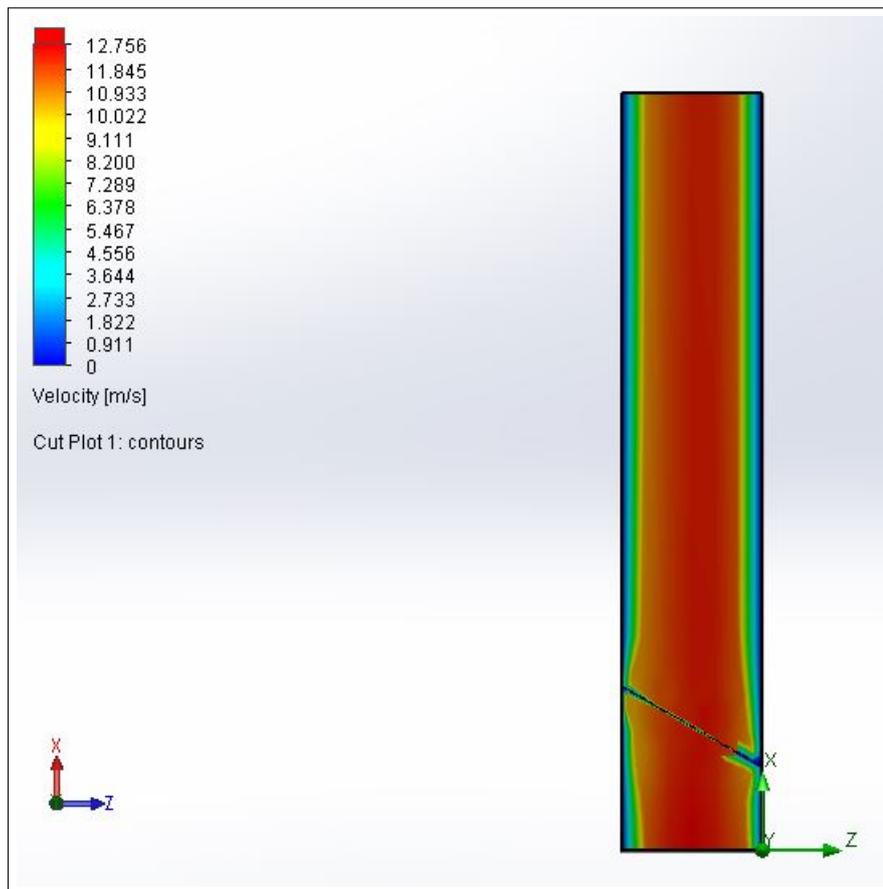
Figura 25 – Perfil de velocidade do ar na coluna de separação para a vazão de  $0,8125 \text{ m}^3/\text{s}$



Analisando o perfil de velocidade simulado, nota-se que a velocidade é reduzida nas regiões próximas as paredes do duto como esperado. Porém, no centro da coluna a velocidade do ar alcança um máximo de  $16,54 \text{ m/s}$  o que certamente provocaria um carregamento das amêndoas. Portanto, foi necessário buscar outra solução.

Após algumas iterações chegou-se a velocidade do ar  $10 \text{ m/s}$ . Analogamente, através da Equação 4.3 tem-se  $Q = 0,625 \text{ m}^3/\text{s}$ . Assim, a simulação para a nova vazão é apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Perfil de velocidade do ar na coluna de separação para a vazão de  $0,625 \text{ m}^3/\text{s}$



Nota-se que os perfis de velocidade do ar para as duas vazões são idênticos, porém no segundo caso a velocidade máxima na região central do escoamento é de  $12,75 \text{ m/s}$ , o que satisfaz as condições de separação, já que  $u_{ar} < u_{ta}$ . Logo a vazão volumétrica de ar à ser utilizada é  $Q = 0,625 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2250 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

Como mencionado, o primeiro módulo da coluna de separação tem o objetivo de provocar o início do arraste das partículas de casca ao mesmo tempo em que permite a queda das partículas de amêndoa, por isso é necessário o extremo controle da velocidade neste ponto. Já no segundo módulo da coluna de separação as cascas estão no regime de transporte pneumático sendo aceleradas para fora do sistema. Isto é possível através de uma redução da área da secção da tubulação neste ponto. Sendo assim, a secção da tubulação no segundo módulo é reduzida à

0,20 m x 0,20 m ( $A_2 = 0,04 \text{ m}^2$ ), o que pela Equação 4.3 resulta em uma velocidade do ar de aproximadamente 15,62 m/s.

Logo, pela Equação 4.4 encontrou-se a velocidade  $u_c$  com que a casca deve movimentar-se através do fluxo de ar.

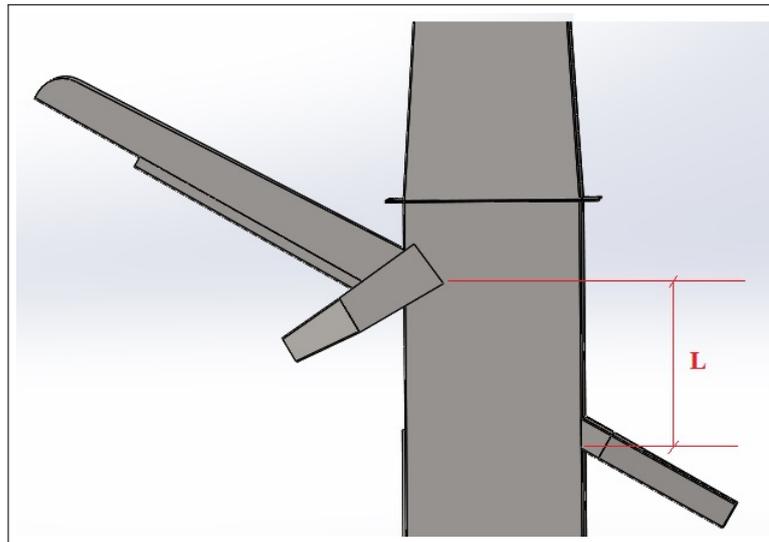
$$u_c = u_{ar} - u_{tc} = 15,62 - 9,71 = 5,91 \text{ m/s} \quad (4.4)$$

A distância mínima ( $L$ ) necessária na coluna de separação entre a alimentação do produto no sistema até a saída das amêndoas foi dimensionada de tal forma que as velocidades do ar e terminal da casca permitam a separação, ou seja, relacionou-se a velocidade terminal da casca e a velocidade do ar ao longo da lateral da coluna pela seguinte equação:

$$L = (\text{Tamanho da lateral da coluna}) \frac{u_{tc}}{u_{ar}} = 0,25 \frac{9,71}{10} = 0,24 \text{ m} \quad (4.5)$$

Esta distância  $L$  da coluna é ilustrada na Figura 27.

Figura 27 – Distância  $L$  na coluna.



A coluna de separação é conectada às demais partes do separador por meio de flanges parafusados. A estrutura da coluna é fabricada por meio de chapa dobrada. Como os dutos da coluna de separação possuem seção quadrada, foi calculado o diâmetro equivalente ( $d_e$ ) pela Equação 4.6 para tubos de seção circular, onde  $E$  e  $B$  são os lados da coluna (MILMAN, 2002).

$$d_e = 1,3 \left[ \frac{(E \cdot B)^5}{(E + B)2} \right]^{1/8} = 1,3 \left[ \frac{(250 \cdot 250)^5}{(250 + 250)2} \right]^{1/8} = 273,3 \text{ mm} \quad (4.6)$$

A Tabela 5 mostra as espessuras recomendadas de acordo com o diâmetro da tubulação de seção circular.

Tabela 5 – Espessura das chapas dos dutos, em função do diâmetro.

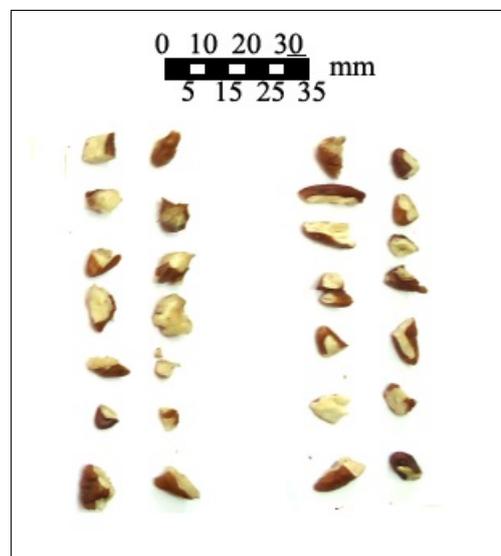
Diâmetro da tubulação (mm)	Espessura da chapa (mm)	AWG
200 mm	0,9	20
200 a 450	1,2	18
450 a 760	1,5	16
mais de 760	1,9	14

Fonte: MILMAN (2002, p. 48).

Portanto, para  $d_e = 273,3 \text{ mm}$  a espessura de chapa recomendada é de  $1,2 \text{ mm}$ . Por praticidade esta espessura também é utilizada nos demais componentes do separador.

Ao cair ao longo da coluna de separação as amêndoas são desviadas para saída por meio de uma chapa perfurada fixada dentro da coluna paralelamente a bica de saída. Esta grade tem a função de impedir a queda das partículas de amêndoa retirando-as do sistema ao mesmo tempo que atua como um difusor permitindo a passagem da corrente de ar. A mesma possui 60% de área aberta e furos redondos de  $4 \text{ mm}$  dispostos de forma aleatória no sentido da entrada de produto. O valor para o diâmetro dos furos foi determinado de acordo com as menores partículas de amêndoas presentes no processo, o que pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Menores partículas de amêndoa presentes no produto.



Fonte: Adaptado de Solane (2015, p. 74).

A perda de carga decorrente deste acessório é observada na subsecção 4.3.5

#### 4.3.2 Dimensionamento das Bicas de Alimentação e Saída

A alimentação na coluna de separação, se dá por meio de uma abertura de largura igual a da coluna e altura de  $40 \text{ mm}$ . Nesta abertura é conectada a bica de alimentação e uma inclinação

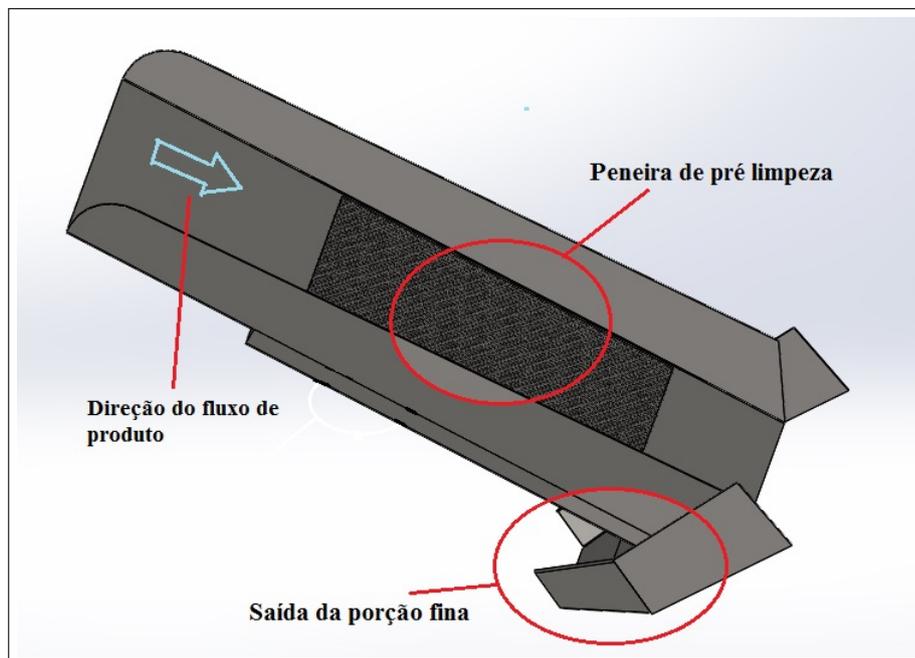
de 30 graus, o que favorece a entrada do produto no sistema por gravidade. Esta inclinação foi determinada colocando-se amostras de casca e amêndoas sobre uma chapa de aço inox, variando sua inclinação afim de obter o melhor ângulo de escorregamento das partículas, como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Determinação do ângulo das bicas de alimentação e saída



Um dos fatores que determinam a eficiência em processos de separação é a variação do tamanho de partículas dentro da coluna de separação. Assim, adotou-se uma grade perfurada com diâmetro de furos de 4 mm e 300 mm de comprimento instada na bica de alimentação de modo a retirar a porção muito fina de casca decorrente do processo de decorticação. A bica de alimentação possui um comprimento de 600 mm, sendo que a grade localiza-se a 100 mm da entrada da coluna. Ao passar pela peneira de pré limpeza as partículas mais finas caem pelos furos para um plano inferior da bica de alimentação e são coletadas pela bica de saída das porções finas como ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Determinação do ângulo das bicas de alimentação e saída



Analogamente, do lado oposto encontra-se a abertura com a bica saída das amêndoas, porém  $L = 240 \text{ mm}$  abaixo da alimentação.

### 4.3.3 Seleção de Tela

O ultimo estágio de separação que se encontra no topo do separador é composto de um meio cone invertido que direciona o fluxo composto por ar e partículas de casca para as laterais de encontro com as telas instaladas. Estas telas permitem a passagem do ar e restringem as cascas fazendo com que elas caiam e escorreguem pela bica de saída localizada abaixo. Portanto, considerando que as partículas com diâmetro inferior a  $4 \text{ mm}$  foram previamente separadas antes da entrada na coluna de separação, a tela deve ter abertura igual a  $3 \text{ mm}$ . Logo a tela de aço inoxidável selecionada possui as características mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características da tela.

Diâmetro do arame (mm)	Abertura de malha (mm)	Área de abertura (%)
1,24	2,99	50

### 4.3.4 Uniões parafusadas e soldadas

A estrutura do separador possui três uniões flangeadas, duas que compõem a parte superior e inferior do primeiro módulo de separação e uma de ligação da curva de redução de secção com o ventilador centrífugo. Como a estrutura não é submetida a esforços em trabalho, os parafusos que ligam os flanges possuem apenas a função de ligar os componentes. Portanto, adotou-se o uso de parafusos M6 x 1 também de aço inoxidável 304.

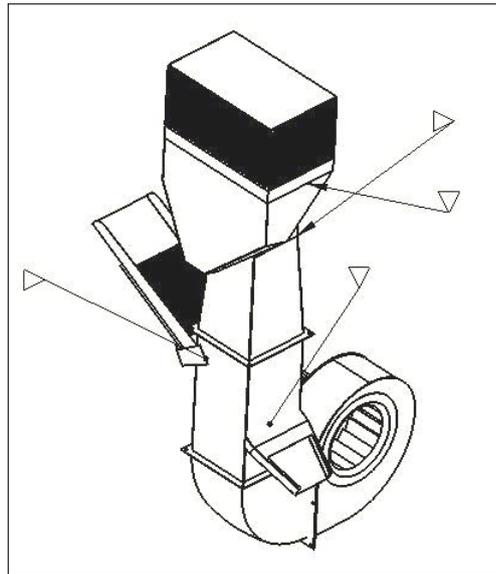
Tabela 7 – Parafusos.

Tipo	Comprimento (mm)	Qtd.	Aplicação
M6 x 1	10	4	fixação dos módulos 1 e 2 da coluna de separação
M6 x 1	10	4	fixação da coluna de separação e curva
M6 x 1	10	6	fixação da curva e damper
M6 x 1	10	6	fixação do damper e ventilador

A construção do separador é realizada utilizando basicamente os processos de corte, dobra e soldagem. Analogamente as uniões parafusadas, as uniões soldadas do projeto tem a característica essencialmente de fixação, pois não sofrem esforços consideráveis. Como estabelecido na seção 4.2 o separador é todo fabricado em aço inoxidável AISI 304. Portanto, a união entre peças do projeto deve ser feita utilizando o processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), o que possibilita a soldagem das chapas de espessuras de  $1,2 \text{ mm}$  utilizadas no projeto.

A Figura 31 ilustra os principais pontos de uniões soldadas entre cada bloco do separador.

Figura 31 – Pontos de uniões por soldagem do separador]



O restante das dimensões físicas da estrutura foram estipuladas a partir das dimensões já calculadas e do objetivo maior do projeto, que é de obter um equipamento compacto. Estas dimensões não precisaram ser calculadas devido à ausência de esforços, porém tomou-se o cuidado de manter a concepção apresentada na seção 4.2. Tais dimensões são mostrados nos Apêndices.

#### 4.3.5 Avaliação das Perdas de Carga

Um fator importante levado em conta foi a perda de carga existente em todos os sistemas que envolvem fluxo de algum fluido e por consequência em separadores pneumáticos, pois elas influenciam na potência de instalação e também nos processos que dela dependem. No entanto, devido a simplicidade do projeto em questão as perdas de carga distribuídas tornam-se desprezíveis. Logo, foram calculadas apenas as perdas de cargas mais importantes, que foram:

- Entrada de ar no sistema

A entrada de ar no sistema será feita de ar puro, ou seja, a admissão se dá na própria aspiração do ventilador. Neste caso a perda de carga ( $J$ ) é dada pela Equação 4.7, onde o valor do coeficiente de perda ( $\lambda$ ) para o caso de tomada de ar arredondada é 0,5.

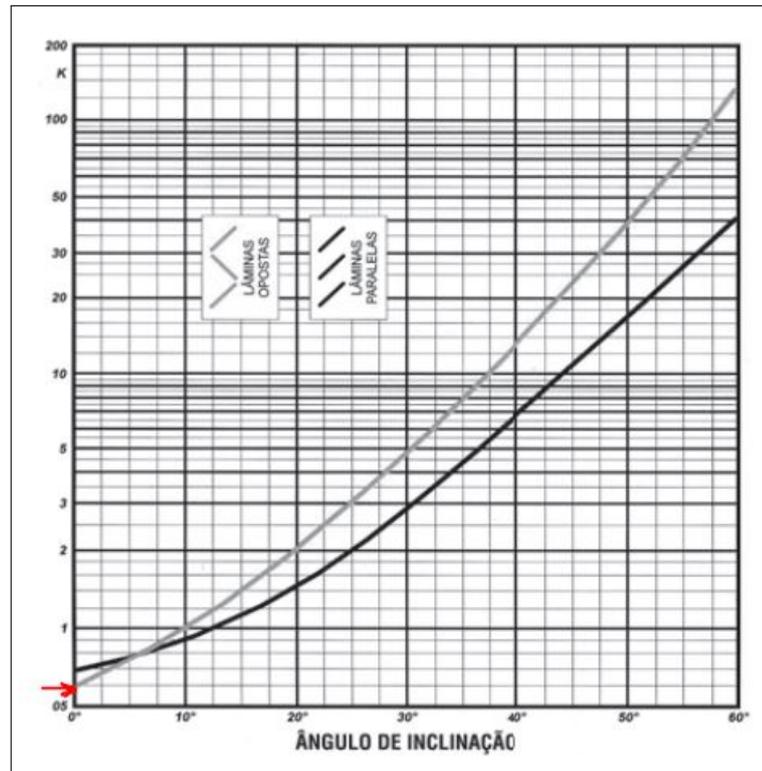
$$J_{entrada} = \lambda \frac{u_{ar}^2}{2g} \rho_{ar} = 0,5 \frac{10^2}{2 \cdot 9,81} 1,2 = 3,06 \text{ kgf/m}^2 \quad (4.7)$$

Onde  $\lambda$  pode assumir valores de 1,5 (seção abrupta) e até 3 (seção abrupta, protegida por tela, com 70% de área livre).

- Damper (Registro de descarga)

O registro de descarga utilizado para controlar a vazão do sistema tem seu coeficiente de perda em função do ângulo de inclinação das aletas e o tipo de lâmina utilizado ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Coeficiente de perda em função do ângulo de abertura das lamínas.]



Fonte: Adaptado de Tropical (2016).

Para damper de lâminas opostas em uma condição de registro todo aberto, ou seja, lâminas em 0°, tem-se que  $\lambda = 0,6$ . Logo, a perda de carga é calculada pela Equação 4.8:

$$J_{saida} = \lambda \frac{u_{ar}^2}{2g} \rho_{ar} = 0,6 \frac{10^2}{2,9,81} 1,2 = 3,7 \text{ kgf/m}^2 \quad (4.8)$$

- Curva de 90°

Um dos acessórios que compõem o projeto é a curva que conecta o damper à coluna de separação. A perda de carga causada pela curva em dutos de seção quadrada é geralmente calculada tomando a razão do raio de curvatura no centro do duto ( $R = 100 \text{ mm} + 125 \text{ mm}$ ) pela altura do duto ( $D$ ), ou seja,  $\frac{R}{D}$ .

Neste caso, para  $\frac{225 \text{ mm}}{250 \text{ mm}} = 0,9$ , tem-se que  $\lambda \approx 0,25$ . Assim, pela Equação 4.9 a perda de carga é:

$$J_{curva} = \lambda \frac{u_{ar}^2}{2g} \rho_{ar} = 0,25 \frac{10^2}{2 \cdot 9,81} 1,2 = 1,55 \text{ kgf/m}^2 \quad (4.9)$$

- Boca de saída

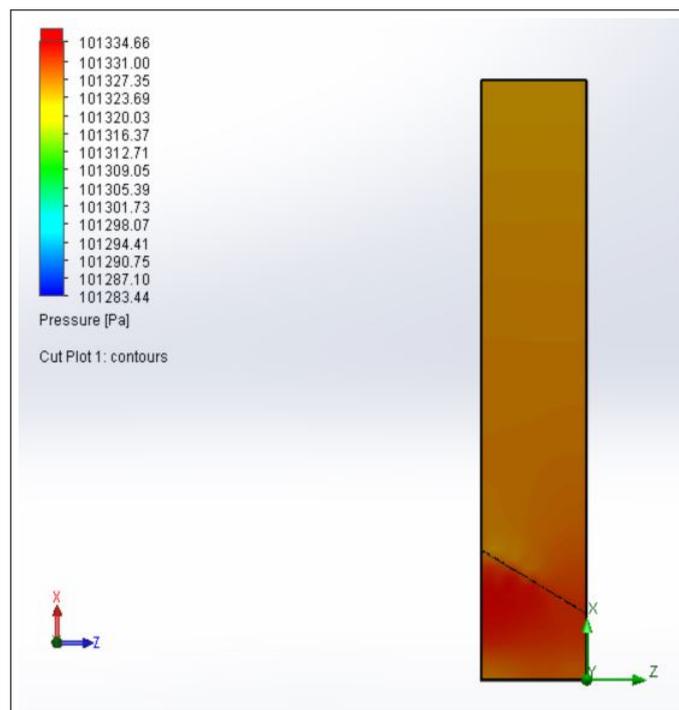
A boca de saída de ar do separador assemelha-se as bocas do tipo chaminé devido ao semi cone invertido e inclinado a  $45^\circ$ . O coeficiente de perda para saídas que utilizam este tipo de acessório é em média  $\lambda = 1$ . Calculando a perda de carga pela Equação 4.10, onde a velocidade de saída do ar é  $15,62 \text{ m/s}$ , tem-se:

$$J_{saida} = \lambda \frac{u_{ar}^2}{2g} \rho_{ar} = 1 \frac{15,62^2}{2 \cdot 9,81} 1,2 = 6,11 \text{ kgf/m}^2 \quad (4.10)$$

- Peneira

Finalizando o cálculo das perdas de carga, falta apenas determinar aquela correspondente à peneira que direciona as amêndoas para a calha de saída. Devido a complexidade, optou-se por estimar esta perda de carga por meio de simulação de forma análoga a realizada para a velocidade, porém obtendo o perfil da queda de pressão como resultado. A Figura 33 mostra o perfil obtido na simulação para uma vazão  $Q = 0,625 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figura 33 – Queda de pressão na coluna de separação.



Analisando os resultados, observa-se que a máxima pressão avaliada em 101334,66 Pa na coluna de separação, se concentra na área posterior à peneira, onde as cores demonstram tons mais vermelhos. Logo após a peneira, a pressão se mantém constante ao longo de toda coluna em aproximadamente 101327,35 Pa, ou seja, praticamente a pressão atmosférica. Portanto, a perda de carga provocada ( $J_{entrada}$ ) por este acessório é dada por:

$$J_{peneira} = 101334,66 - 101327,35 = 7,31 \text{ Pa} = 0,75 \text{ kgf/m}^2 \quad (4.11)$$

Somando-se todas as perdas de carga, chega-se a diferença de pressão total  $\Delta_p = 15,73 \text{ kgf/m}^2$ . Os valores das perdas de carga são dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Relação das perdas de carga do sistema.

<b>Elemento</b>	<b>J (kgf/m<sup>2</sup>)</b>
Tomada de ar puro	3,06
Curva	1,55
Damper	3,7
Saída de ar	6,11
Chapa perfurada	0,75
<b>Total (<math>\Delta_{pt}</math>)</b>	<b>15,2</b>

Observa-se que devido à simplificação do equipamento, ou seja, um separador mais compacto, as perdas existentes são poucas se comparadas com as dos sistemas de separação e transporte pneumático mais comuns. Lembrando que as perdas de carga distribuída puderam ser desprezadas.

#### 4.3.6 Seleção do ventilador e Potência de Acionamento

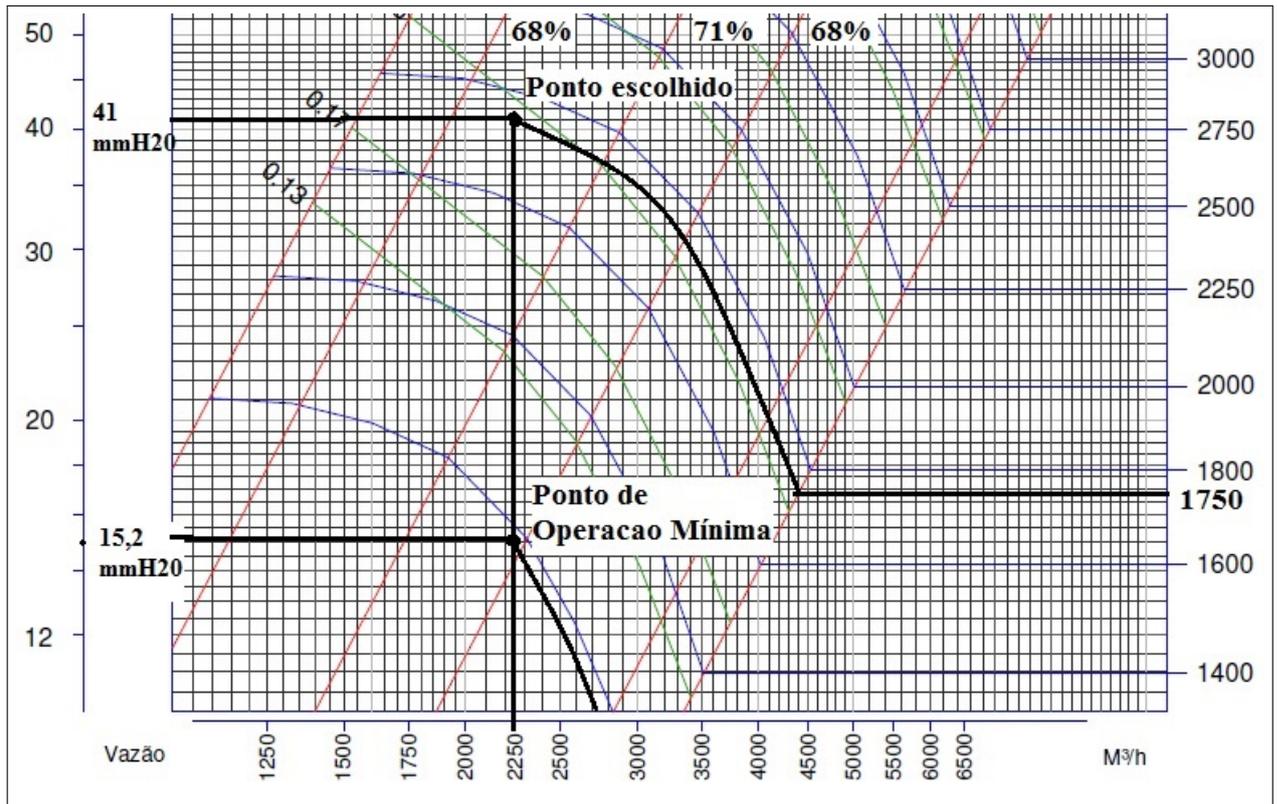
O ventilador a ser usado na instalação do projeto é do tipo centrifugo com pás voltadas para trás (*Limit load*). Esta escolha se deve a boa eficiência e baixo ruído proporcionados por esse tipo de ventilador. Para a seleção do ventilador levou-se em conta a vazão de ar necessária do sistema e a diferença de pressão total calculada.

O ventilador selecionado possui um tamanho de rotor  $D = 280 \text{ mm}$ . Suas características de desempenho fornecidas pelo próprio fabricante encontram-se em Anexos.

Analisando sua curva de desempenho temos que para o ponto de operação mínimo, em que  $Q = 0,625 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2250 \text{ m}^3/\text{h}$ ) e  $\Delta_{pt} = 15,2 \text{ kgf/m}^2$ , o rendimento do ventilador é de aproximadamente  $\eta_t = 69 \%$  em  $N \approx 1200 \text{ rpm}$ . Entretanto, com o uso do registro de descarga na saída do ventilador é possível que a vazão de ar seja controlada, ou seja, pode-se ajustá-la à necessidade existente, como separação de maior quantidade de produto ou perdas de carga imprevistas, por exemplo.

Logo, selecionando um ponto na rotação comercial  $N = 1750 \text{ rpm}$ , o ventilador selecionado possui rendimento  $\eta_t \approx 70 \%$  e fornece a pressão total de aproximadamente  $41 \text{ mmH}_2\text{O}$  ( $41 \text{ kgf/m}^2$ ) na vazão  $Q = 2250 \text{ m}^3/\text{h}$ . A Figura 34 ilustra o ponto selecionado e o ponto de operação mínima do separador na curva de desempenho do ventilador escolhido. A curva completa encontra-se nos Anexos deste trabalho.

Figura 34 – Pontos de operação do ventilador.



Fonte: Adaptado do Catálogo da empresa TERMODIN.

Na prática, isto significa que a velocidade do ar na coluna de separação pode ser diminuída ou aumentada de acordo com a necessidade. A diferença de pressão pode ser obtida fechando-se o registro.

Deste modo, a potência de acionamento necessária no ventilador  $P_m$  (cv) para o ponto de operação selecionado foi encontrada pela Equação 2.16. Onde,

$$P_m = \frac{Q \Delta p_t}{75 \eta_t} \left[ \frac{10332 + \frac{\Delta p_t}{2}}{10332} \right]$$

$$P_m = \frac{0,625 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 41 \text{ kgf/m}^2}{75 \cdot 0,70} \left[ \frac{10332 + \frac{41 \text{ kgf/m}^2}{2}}{10332} \right] = 0,5 \text{ cv}$$

Apesar deste tipo de ventilador possuir a característica de consumo de potência limitada com o aumento da vazão, por segurança o motor de acionamento teve sua potência mínima acrescida em 20% conforme recomendação do fabricante. Aproximando para uma potência comercial, tem-se que  $P_m \approx 0,75 \text{ cv}$ .

Agrupando as características do ventilador e acionamento na Tabela 9, tem-se:

Tabela 9 – Características do ventilador e acionamento.

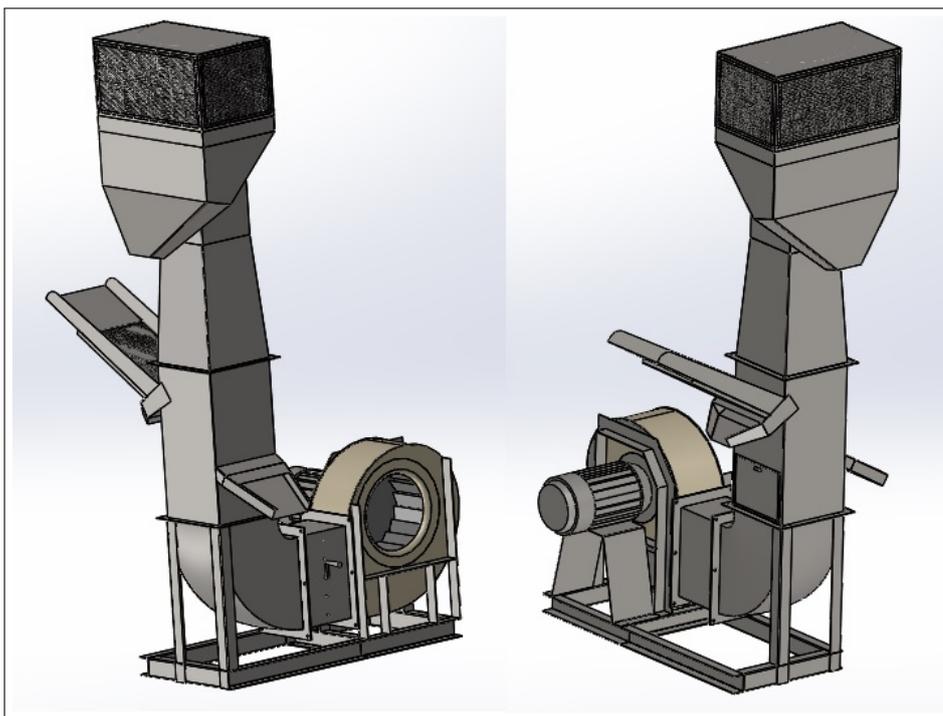
<b>Tipo de ventilador</b>	Centrifugo com pás voltadas para trás ( <i>Limit load</i> )
<b>Diâmetro do rotor</b>	280 mm
<b>Vazão</b>	2250 m <sup>3</sup> /h (0,625 m <sup>3</sup> /s)
<b>Diferença de pressão</b>	41 kgf/m <sup>2</sup> (41 mm/H <sub>2</sub> O)
<b>Rotação</b>	1750 rpm
<b>Rendimento total</b>	70 %
<b>Potência de acionamento</b>	0,75 cv

O arranjo do ventilador e a rotação comercial permitem que o motor seja acoplado diretamente.

#### 4.4 Montagem Final

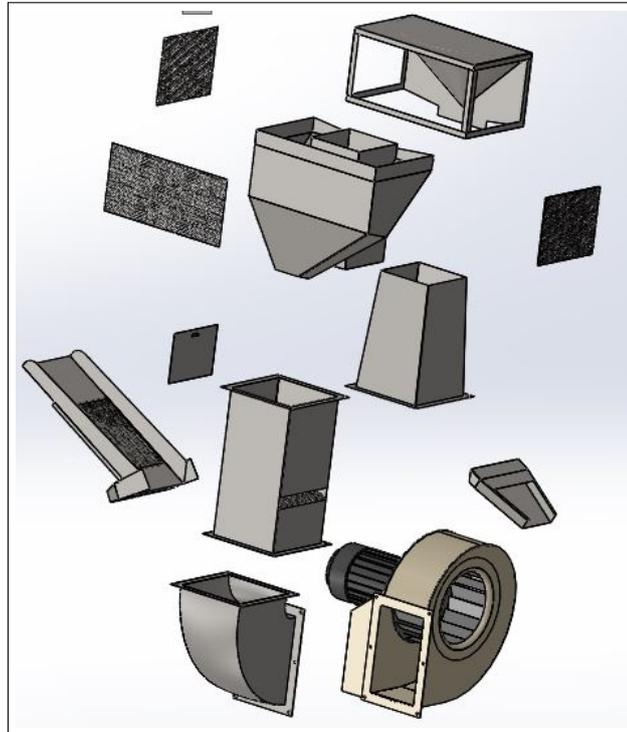
A Figura 35 ilustra o separador em sua forma final após todas as etapas de dimensionamento e condições mínimas de operação.

Figura 35 – Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã.



As partes principais que compõem o separador podem ser identificadas na Figura 36. É possível observar a estrutura simples e compacta do separador, o qual pode ser separado em módulos.

Figura 36 – Vista explodida do Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã.



Além dos elementos principais dimensionados e/ou especificados, o projeto conta com outros que não tiveram suas dimensões calculadas pelo fato de não sofrerem esforços significativos. Estes elementos tiveram suas dimensões estipuladas com base em sua funcionalidade dentro do processo de separação, dificuldade de fabricação e custo, como é o caso do cone invertido, localizado na saída de ar da coluna de separação. Seu ângulo de abertura foi estipulado em  $45^\circ$  de forma que direcione o fluxo para as lateais permitindo a coleta das cascas de maneira suave.

A base do separador será feita de chapas de 3 mm dobradas em perfil U seguindo a base do ventilador. Dois apoios ligados a coluna de separação também são feitos da mesma chapa, porém com perfil L. Para diminuir efeitos da vibração na estrutura do separador foram selecionados 4 amortecedores da linha tradicional Mac para carga estática de até 300 kgf, para serem instalados nas extremidades da base do equipamento. Na seleção do modelo e tipo, levou-se em conta o peso do separador e a rotação do ventilador. Os detalhes dos amortecedores selecionados encontram-se em Anexo a este trabalho.

Os elementos e partes que serão fabricadas têm seus desenhos técnicos detalhados com todas as suas dimensões no Apêndice. Como estipulado inicialmente, todos os componentes que compõem o separador com exceção do ventilador e sua base, são fabricados em chapas de aço inoxidável AISI 304.

A seguir são apresentadas as características finais do equipamento projetado, que são:

- Potência de acionamento: 0,75 cv;
- Capacidade mínima estimada de separação: 300 kg/h;
- Peso total aproximado: 137 kg;
- Dimensões: 2082 mm de altura x 1174 mm de comprimento x 977 mm de largura;
- Material principal de construção: Aço Inoxidável AISI 304;

A montagem do separador deve se iniciar pela parte inferior, ligando as uniões parafusadas ao ventilador e assim partindo para as partes superiores.

## 4.5 Instalação, Operação e Manutenção

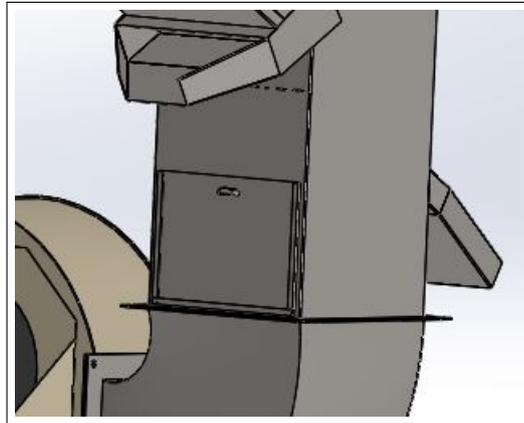
Antes de efetuar a instalação do separador, diversos fatores devem ser observados de modo a garantir a segurança da operação. Deve-se certificar que a rede elétrica dispõem da alimentação adequada à necessária pelo equipamento e verificar a correta fixação do equipamento a base ou chão, são alguns deles. Quanto à operação do equipamento, deve-se observar antes de se colocar o ventilador em funcionamento:

- a) Analisar se o ventilador esta devidamente alinhado e fixado à curva ligada a coluna de separação;
- b) Assegurar que todos os parafusos e porcas nas conexões parafusadas estejam devidamente apertados;
- d) Verificar a presença de corpos estranhos dentro da carcaça do ventilador;
- e) Girar o rotor manualmente certificando que o mesmo não esteja travado;
- f) Ao ligar o equipamento, aguardar que a rotação nominal do ventilador seja atingida e que o fluxo de ar esteja estabilizado para dar início à alimentação.

Outros procedimentos que devem ser realizados regularmente são os de manutenção preventiva. A correta manutenção de máquinas e equipamentos é essencial para o bom funcionamento da máquina, durabilidade e segurança das pessoas que a operam. O projeto do separador foi executado de modo a facilitar a manutenção. Para isso a o primeiro módulo da coluna de separação possui uniões por meio de flanges, facilitando a desmontagem do equipamento sempre que necessário, para reparo de peneira ou limpeza.

Além disso, o projeto conta com uma janela de inspeção e manutenção localizada na coluna logo abaixo da bica de alimentação, como mostra a Figura 37. Isto facilita a inspeção da peneira e retirada de impurezas do sistema sem a necessidade de desmontar o equipamento.

Figura 37 – Janela para manutenção e limpeza.



O procedimento de manutenção do separador projetado é baseado em inspeção visual, ou seja, vistorias no equipamento observando possíveis inconformidades. Alguns dos procedimentos de manutenção e segurança que devem ser realizados são:

- a) Observar a ocorrência de ruídos estranhos;
- b) Abrir a janela de manutenção apenas com o equipamento desligado;
- d) Limpar regularmente dos dutos e ventilador, interna e externamente;
- e) Observar níveis anormais de vibração;
- f) Verificar a conformidade das peneiras regularmente.

## 4.6 Estimativa de Custos

De modo a garantir a viabilidade de qualquer projeto, é necessário que se faça uma análise de custos de material e fabricação. A avaliação permite que componentes sejam substituídos e/ou processos de fabricação sejam alterados a fim de otimizar o projeto.

Portanto o separador tem seu custo mostrado na Tabela 10. Vale ressaltar que o custo mostrado é apenas uma estimativa obtida através de cotação de material utilizado, fabricantes e fornecedores de componentes.

Tabela 10 – Estimativa de custo do Separador.

Cód.	Peça	Processo	Mat.	Peso (kg)	Qtd.	(R\$)	Fabric.(R\$)	Total (R\$)
S00	Motor Elétrico*	-	-	12,00	1	550	-	550
S01	Ventilador*	-	-	84,20	1	-	-	1700
S02	Curva 90°	C-D-S-F	Chapa	4,60	1	18,00	30,00	112,80
S03	Módulo 1 Coluna	C-D-S-F	Chapa	8,88	1	18,00	100,00	259,84
S04	Módulo 2 Coluna	C-D-S-F	Chapa	3,70	1	18,00	70,00	136,60
S05	Módulo 3 Coluna	C-D-S	Chapa	7,74	1	18,00	300	439,30
S06	Meio Cone	C-D-S	Chapa	4,71	1	18,00	70,00	154,78
S07	Bica de saída	C-D-S	Chapa	0,88	1	18,00	15,00	30,84
S08	Bica de Alim.	C-D-S	Chapa	3,33	1	18,00	60,00	120
S09	Tampa de Manut.	C-S	Chapa	0,37	1	18	5,00	11,70
S11	Damper*	-	-	3,30	1	150	-	150
S12	Peneira*	-	-	0,20	2	2	50	100
S13	Tela*	-	-	-	2 m <sup>2</sup>	35,00	-	70
S14	Base	S	Chapa Perfil	6,73	1	18	50	151,14
S15	Amort. Coxim*	-	-	-	4	16,00	-	64
S16	Paraf. M6 x 1 - 10 mm*	-	-	-	20	0,74	-	14,80
Total							785	4065,80

(S) Soldagem; (C) Corte;(D) Dobra; (F) Furação; \*Comprado

Ao custo de fabricação do separador, poderia ser adicionado o custo de montagem de aproximadamente R\$ 1000. Portanto, em uma estimativa de custo sem pesquisa de mercado, o preço total do separador é em torno dos R\$ 5000.

## 5 Conclusão

O projeto decorreu de forma satisfatória, levando em conta as incertezas que geralmente são encontradas em sistemas que trabalham com fluidos.

Observando os objetivos inicialmente traçados, tem-se que a concepção do separador se deu de forma compacta, favorecendo um bom layout da linha de beneficiamento, já que a área que ocupa é bem reduzida. O equipamento também possibilita a instalação de um decortificador diretamente sobre a bica de alimentação, tornando o processo de beneficiamento contínuo e eliminando a necessidade de equipamento transportador, o que gera facilidade, rapidez e economia no processo. Outro fator positivo é a possibilidade de regulação da vazão de trabalho, tornando o equipamento muito mais versátil.

A metodologia utilizada foi adequada ao objetivo proposto. As teorias que descrevem o comportamento partículas sólidas em leitos fluidizados ou em transporte pneumático são geralmente aplicadas de forma satisfatória em partículas muito pequenas. Devido ao produto da decorticação da noz pecã ser muito heterogêneo, contendo partículas grandes e mais variadas formas, a simulação realizada foi necessária. Porém, a simulação por si só não é tão eficiente em descrever os fenômenos na coluna de separação, o que foi suprido com a escolha de um ponto superior de operação. Além disso, a base teórica apresentada neste trabalho é indispensável para o entendimento do funcionamento e possível otimização do separador.

O separador demonstra-se então como uma boa opção para pequenas e médias produções de noz pecã, com um bom custo benefício, tornando-se uma opção relativamente barata de melhoria dos processos de separação e limpeza da noz. Sua estrutura principal pode ser construída basicamente com três processos: corte, dobra e soldagem. Por não possuir geometrias complexas e usar chapas como materiais de base, sua fabricação elimina a necessidade do uso de máquinas especiais.



## 6 Sugestão para Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros recomenda-se construir o equipamento. Assim é possível averiguar sua real capacidade e faixa de operação, traçando uma relação entre a vazão de produto admitida na alimentação, a vazão de ar e a eficiência de separação.



## Referências

- Agroline. *Pecanita lança projeto para ampliar plantação de noqueiras no RS*. 2010. Acessado em 28 de Setembro de 2015. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/agronoticias/noticia.php?id=19388>>. Citado na página 27.
- BOAVENTURA, A. I. Projeto de uma peneira vibratória para classificação de noz pecã. 2015. Citado na página 24.
- Condor. *Fruticultura: Cultivo da Nogueira Pecã*. 2015. Acessado em 26 de Agosto de 2015. Citado na página 23.
- COSTA, E. C. d. *Ventilação*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado 7 vezes nas páginas 38, 39, 40, 42, 43, 44 e 58.
- COUTO, S. M. et al. Parâmetros relevantes na determinação antes na determinação da velocidade terminal de frutos de café1. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 7, n. 1, p. 141–148, 2003. Citado na página 50.
- DIVINUT. *A Nogueira-pecã*. 2015. Disponível em: <[http://divinut.com.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=48&Itemid=58](http://divinut.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=58)>. Citado na página 23.
- FELLOWS, P. J. *Food processing technology: principles and practice*. [S.l.]: Elsevier, 2009. Citado na página 31.
- HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. *Powder technology*, Elsevier, v. 58, n. 1, p. 63–70, 1989. Citado na página 37.
- IBGE. *Séries Estatísticas & Séries Históricas*. 2010. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/>>. Citado na página 23.
- KICE. *Multi-Aspiration*. 2015. Acessado em 10 de Novembro de 2015. Disponível em: <<http://www.kice.com/System-MultiAspiration.html>>. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41 e 42.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. *Fluidization engineering*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 1991. Citado 8 vezes nas páginas 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39.
- LITTLEFIELD, B. et al. Physical and flow properties of pecan shells—particle size and moisture effects. *Powder Technology*, Elsevier, v. 212, n. 1, p. 173–180, 2011. Citado na página 29.
- LITTLEFIELD, B. L. *Characterization of pecan shells for value-added applications*. Dissertação (Mestrado) — Auburn University, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 45.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. *Unit operations of chemical engineering*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1993. v. 5. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 45.
- MILMAN, M. J. Equipamentos para pré-processamento de grãos. *Pelotas: UFPel*, 2002. Citado 5 vezes nas páginas 43, 44, 45, 61 e 62.

MOLINA JUNIOR, W. F. *Máquinas para Processamento de Cereais*. 200—. Acessado em 05 de Setembro de 2015. Disponível em: <<http://www.ler.esalq.usp.br/molina.htm>>. Citado na página 23.

NITZ, M.; GUARDANI, R. Fluidização gás-sólido—fundamentos e avanços. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, p. 20–24, 2008. Citado na página 33.

ORO, T. *Composto Nutricional, Compostos Bioativos e Vida de Prateleira de Noz e Óleo Prensado a Frio de Noz-Pecã*. 106 p. Dissertação ((Mestrado em Ciência dos Alimentos)) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 23, 27, 29 e 30.

ORTIZ, E. Propriedades nutritivas e nutracêuticas das nozes. *Monografia—Especialização em Tecnologia de Alimentos, Universidade de Santa Cruz do Sul, RG, Brasil*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

Paralelo 30. *Qualidade*. 2015. Acessado em 05 de Abril de 2015. Disponível em: <<http://www.pecan.com.br/qualidade/>>. Citado na página 23.

PIVATTO, R. S. *Desenvolvimento de um sistema de separação por aspiração de farelo de soja*. Dissertação (Mestrado), 2013. Citado na página 41.

POLETTI, T. et al. *Análise de Características dos Frutos de Cultivares de Nogueira-Pecã Cultivadas no Rio Grande do Sul*. [S.l.]: SEPE - Simpósio de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2012. Acessado em 05 de Abril de 2015. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 30.

PRADO, A. C. P. D. *Avaliação da Atividade Antioxidante da Casca e Torta de Noz Pecã [Carya illinoensis (Wangenh) C. Koch]*. 130 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 23, 27, 28 e 29.

SIMS, K. A. Mechanization of post-harvest pecan processing. In: *Pecan Technology*. [S.l.]: Springer, 1994. p. 68–86. Citado na página 31.

SOLANE, R. B. Caracterização mecânica da noz pecã e projeto do decorticador. 2015. Citado 6 vezes nas páginas 24, 28, 47, 48, 55 e 62.

TROPICAL. *Difusão de Ar - Dampers*. 2016. Citado na página 66.

VENKATACHALAM, M. *Chemical Composition of Select Pecan [Carya illinoensis (Wangenh.) K. Koch] Varieties and Antigenic Stability of Pecan Proteins*. Dissertação (Dissertation) — Florida State University, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 23, 27 e 29.

VIEIRA, D. R. *Cálculo da área de folhas com MATLAB*. 2016. Acessado dia 10 de Novembro de 2016. Disponível em: <[www.danilorvieira.com/secoes/artigos/4/](http://www.danilorvieira.com/secoes/artigos/4/)>. Citado na página 49.

WOOD, B. W.; PAYNE, J. A.; GRAUKE, L. J. An overview of the evolution of the us pecan industry. In: *Pecan Technology*. [S.l.]: Springer, 1994. p. 1–11. Citado na página 27.

# Apêndices



## APÊNDICE A – Ensaios

A Tabela 11 e Tabela 12 mostram os valores das razões médias massa/área projetada de todas as granulometrias para casca e amêndoa respectivamente.

Tabela 11 – Razão média massa/área projetada para casca.

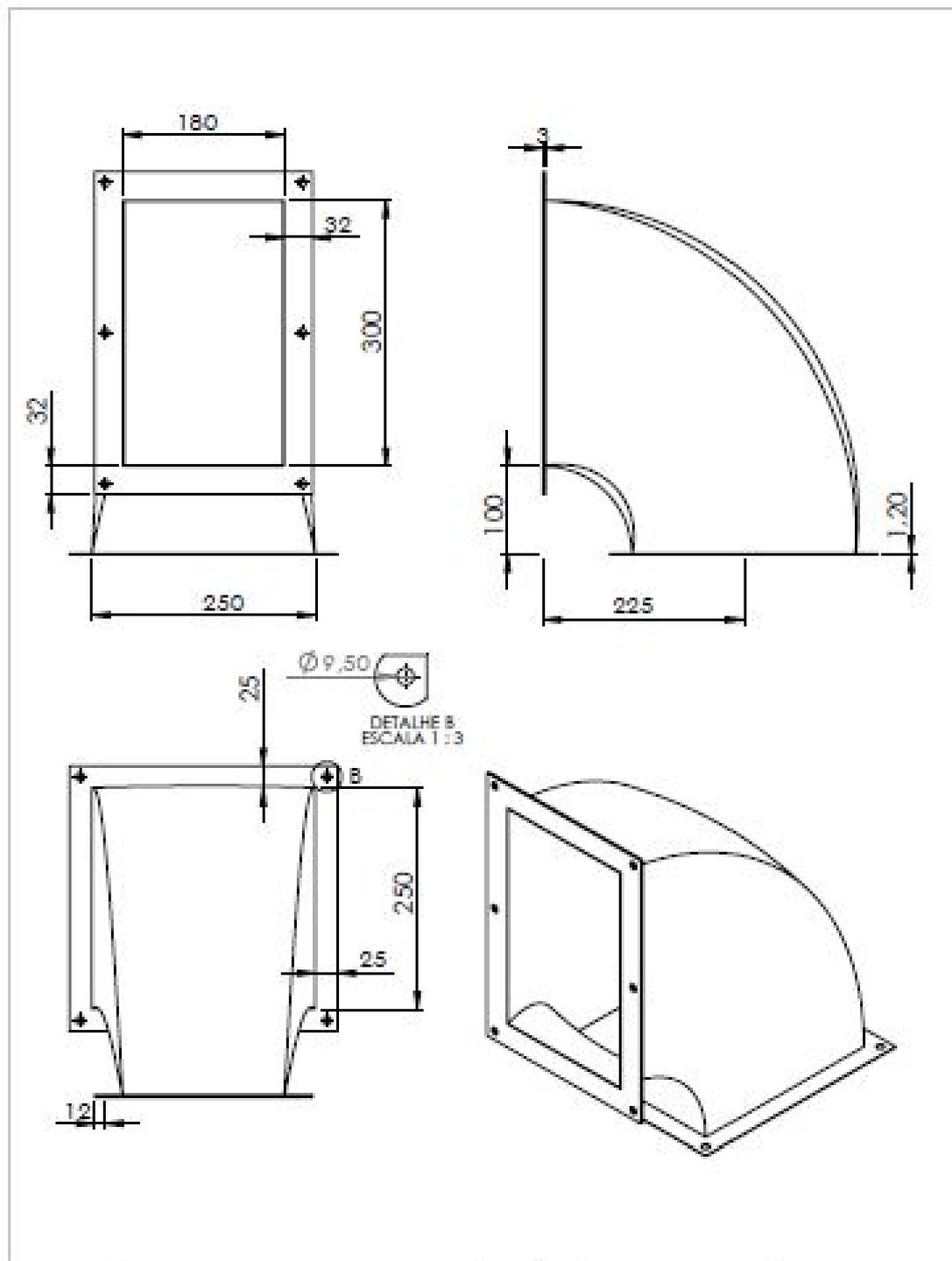
Granulometria	Massa (g)	Área (cm <sup>2</sup> )	Massa/Área (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0867	0,4947	0,1752
2	0,3358	2,4666	0,1361
3	0,7070	4,2390	0,1667
4	0,6087	4,7700	0,1276
5	1,4609	7,8700	0,1856
Média			0,1582

Tabela 12 – Razão média massa/área projetada para a amêndoa.

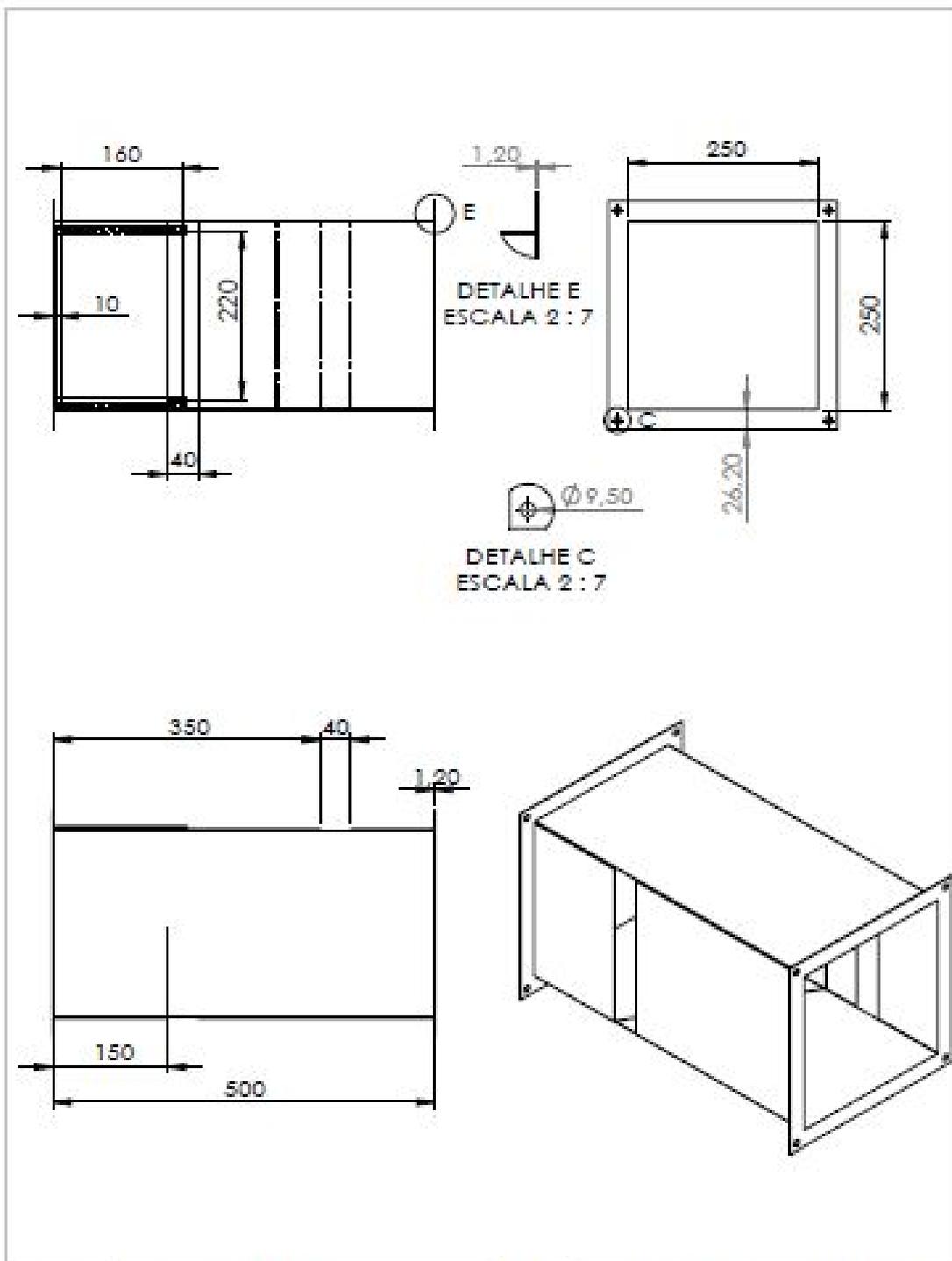
Granulometria	Massa (g)	Área (cm <sup>2</sup> )	Massa/Área (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,2315	0,742	0,3119
2	0,4464	1,1036	0,4044
3	0,8313	2,1105	0,3938
4	0,819	2,0024	0,4090
5	1,7409	4,0637	0,4284
Média	0,81382	2,00444	0,3895
Média			0,3895



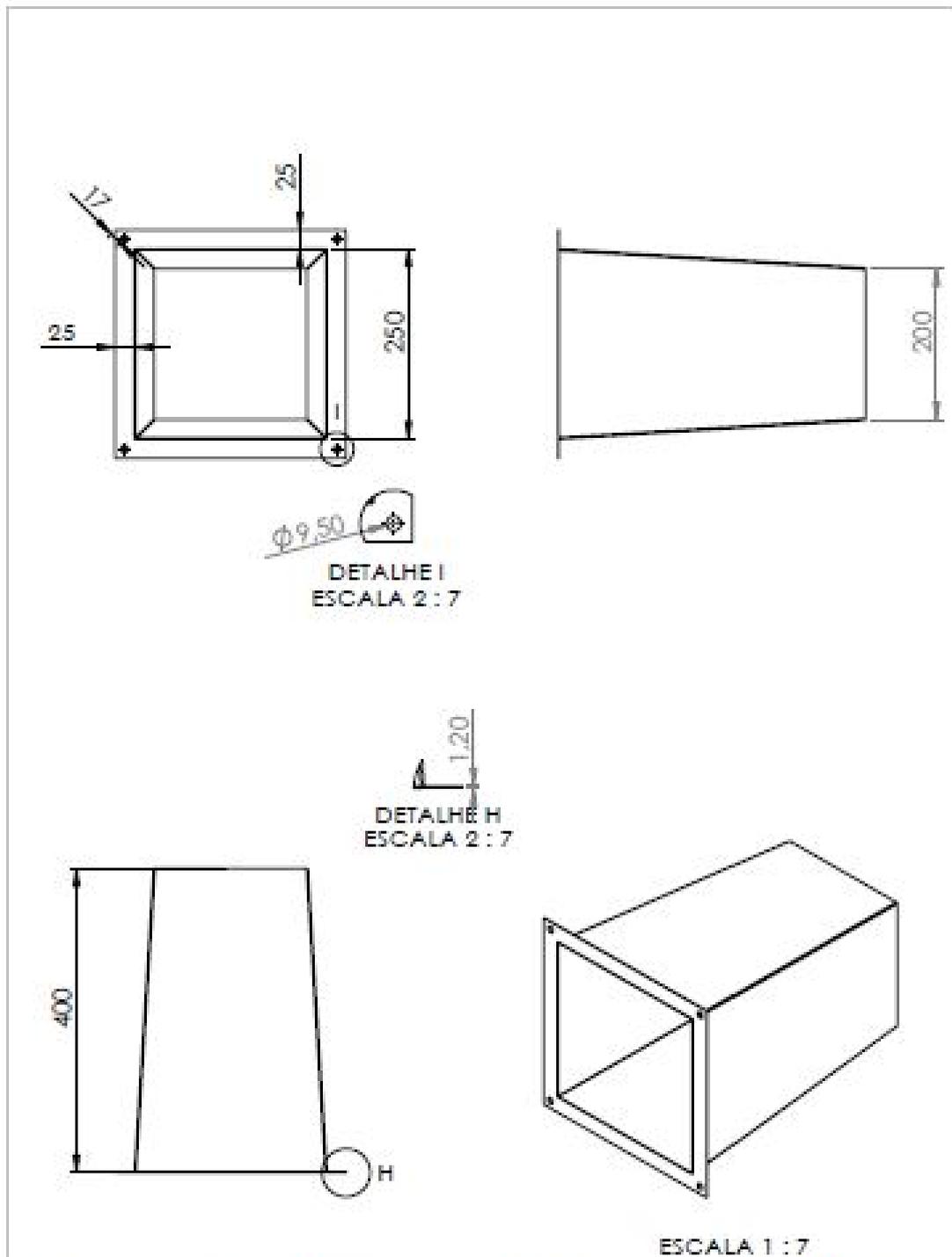
## APÊNDICE B – Desenhos Técnicos



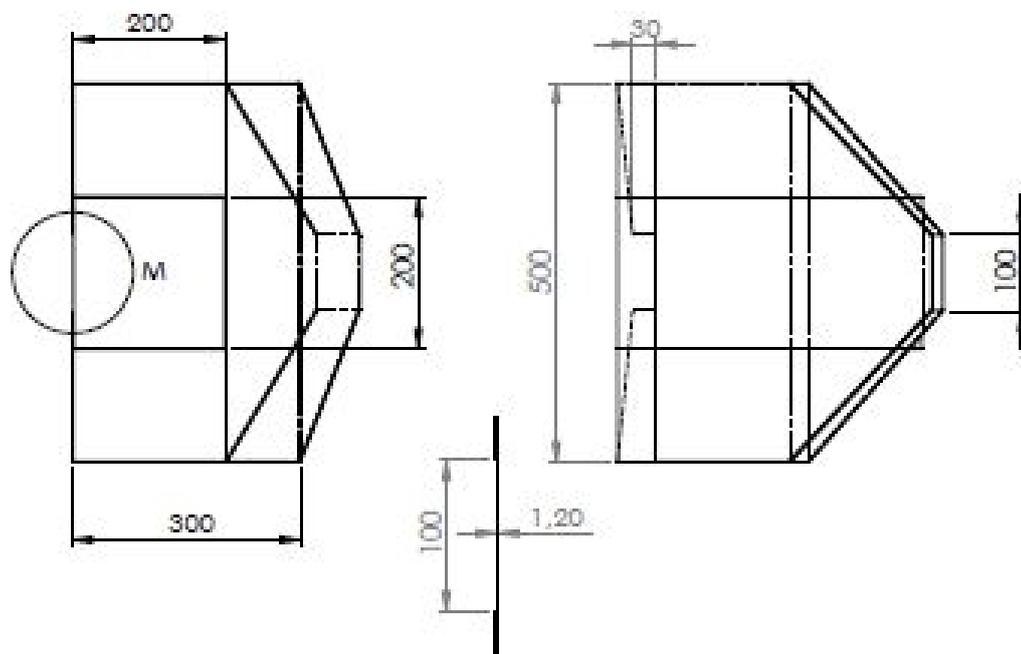
S02	Curva 90°	1	Aço Inoxidável AISI 304
Cód. Peça	Denominação	Qnt.	Material
 Universidade Federal do Pampa	Título: Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã		Projeção: 
	Instituto:	Universidade Federal do Pampa	Data: 05/13/2016
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Unidade: mm
	Responsável:	Erick Medeiros Silva	Escala: 1:6
			Folha: 2 de 10



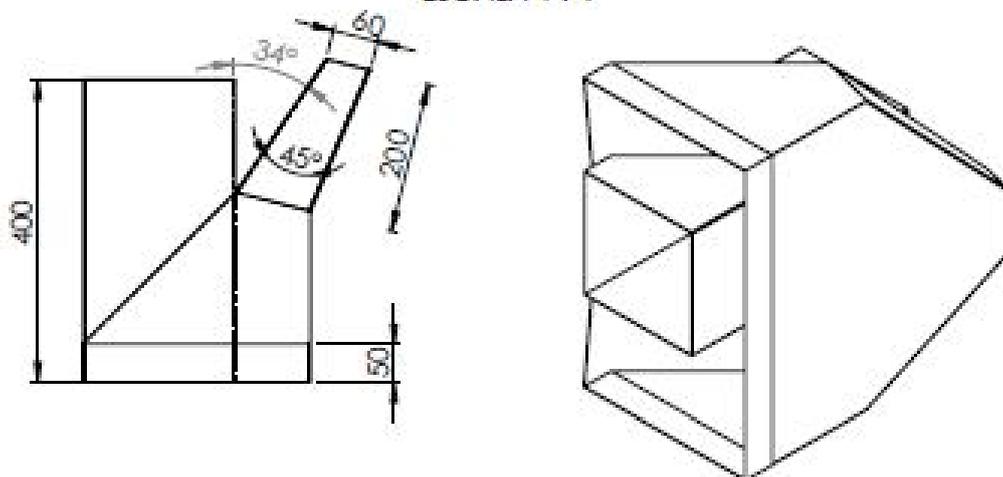
S03	Módulo 1 Coluna	1	Aço Inoxidável AISI 304
Cód. Peça	Denominação	Qnt.	Material
 Universidade Federal de Pampa	Título		Projeção: 
	Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã		Data: 05/12/2016
	Instituto:	Universidade Federal de Pampa	Unidade: mm
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Escala: 1:7
Responsável:	Erick Medeiros Silva	Folha: 3 de 10	



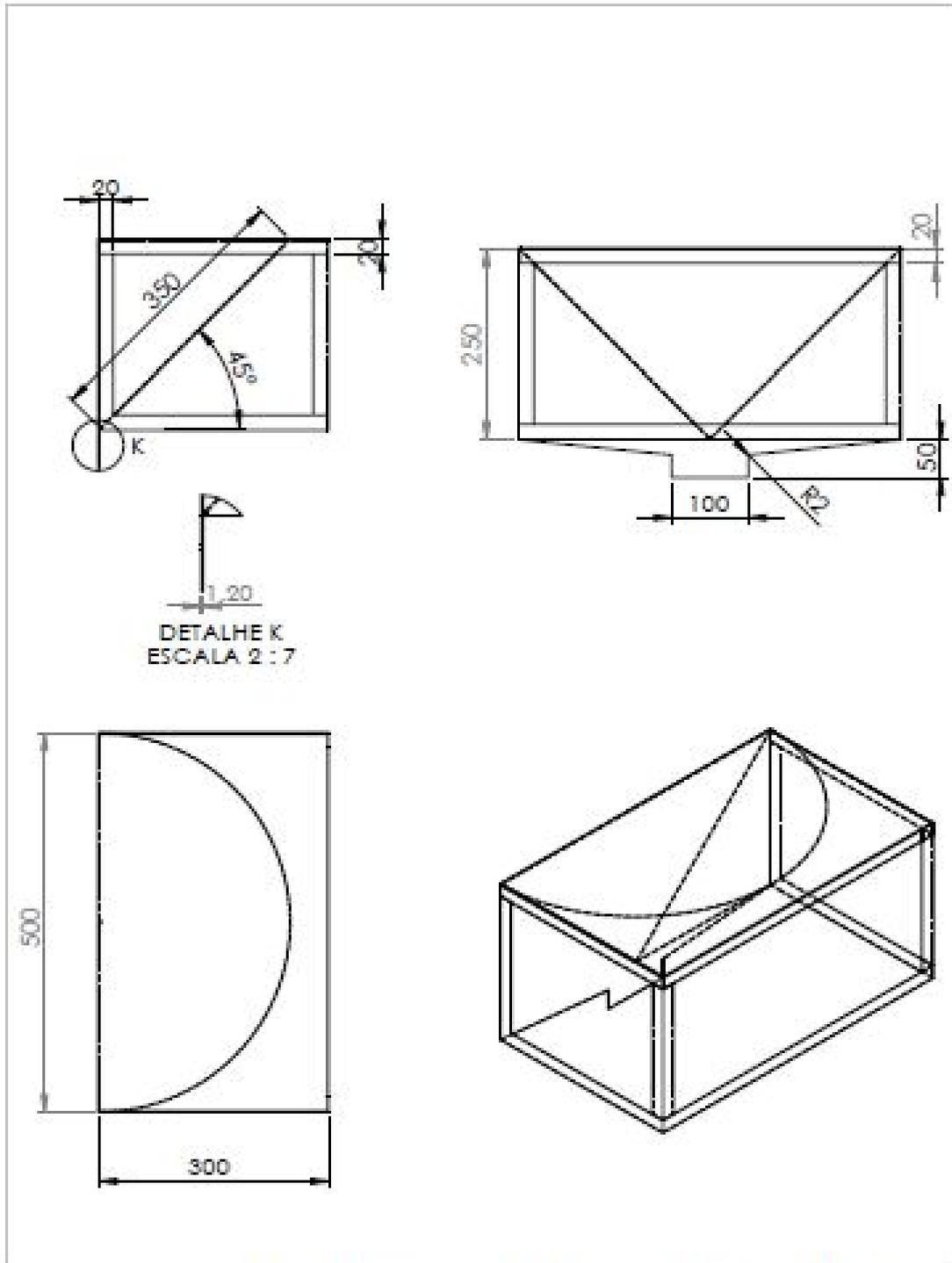
504	Módulo 2 Coluna	1	Aço Inoxidável AISI 304
Cód. Peça	Denominação	Qnt.	Material
 Universidade Federal de Pampa	Título: Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã		Projeção: 
	Instituto:	Universidade Federal de Pampa	Data: 05/12/2016
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Unidade: mm
	Responsável:	Erick Medeiros Silva	Escala: 1:7
			Folha: 4 de 10



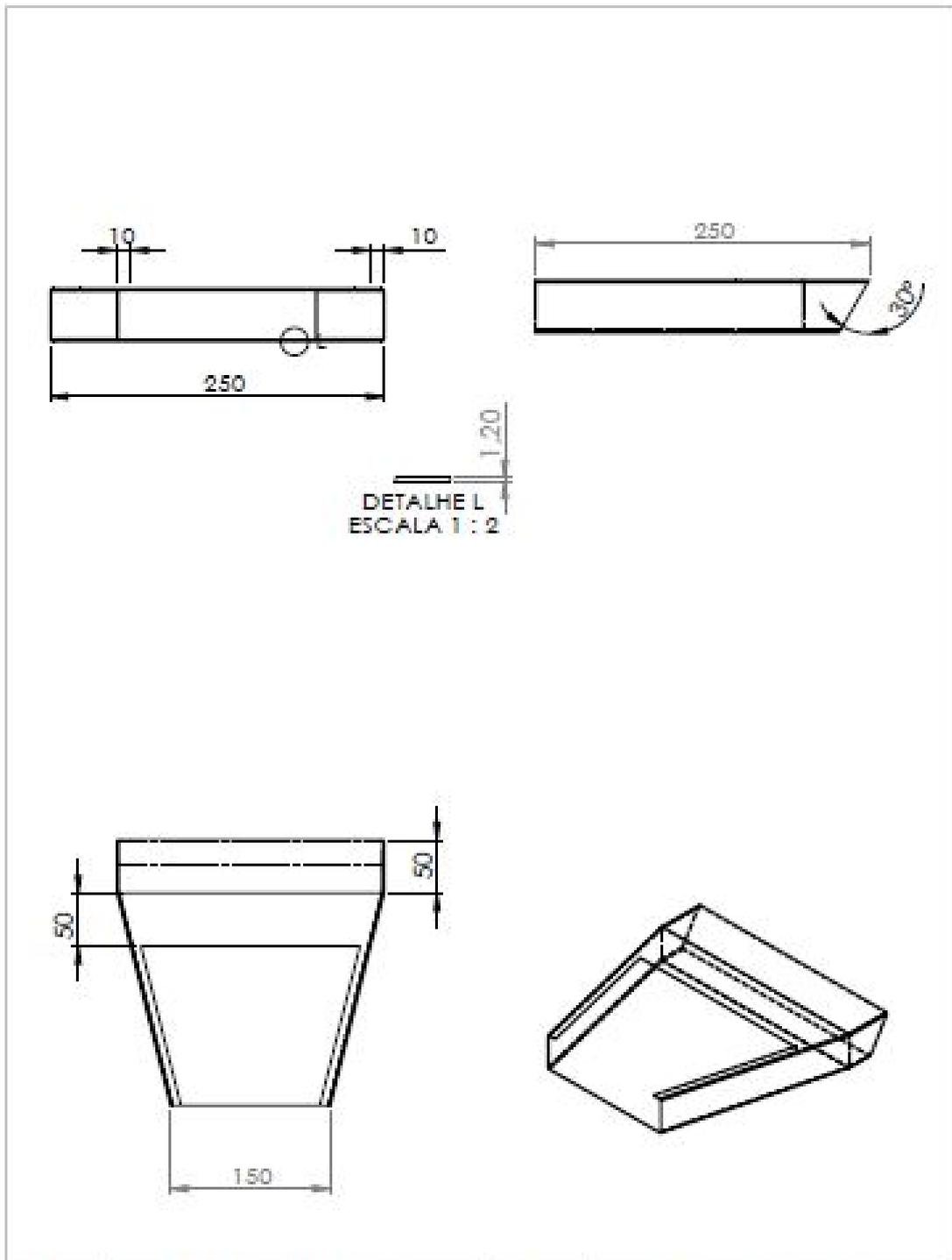
DETALHE M  
ESCALA 1 : 4



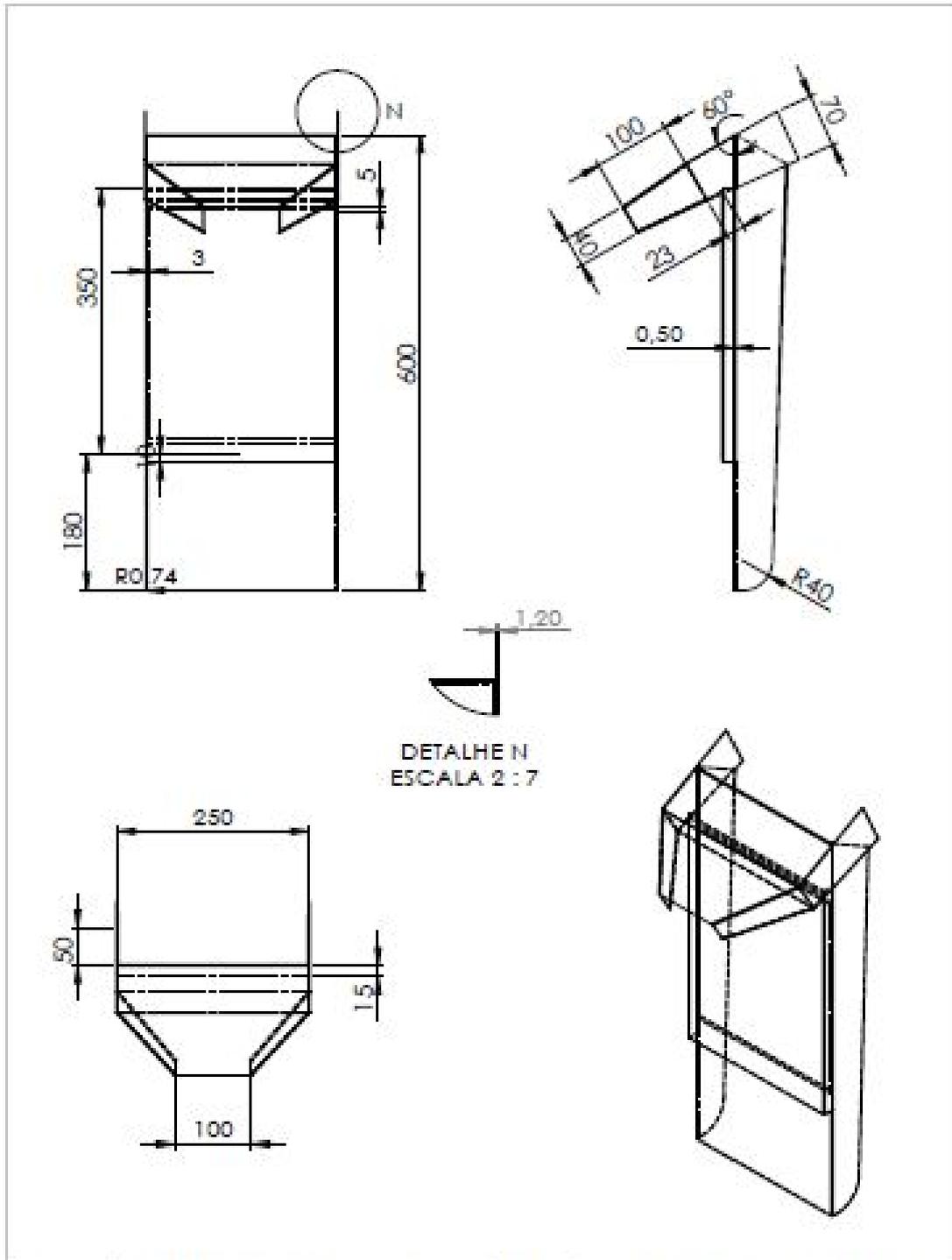
S05	Módulo 3 da Coluna	1	Aço Inoxidável AISI 304
Cód. Peça	Denominação	Qty.	Material
 Universidade Federal do Pampa	Título: Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã		Projeção: 
	Instituto:	Universidade Federal do Pampa	Data: 05/12/2016
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Unidade: mm
	Responsável:	Erick Medeiros Silva	Escala: 1:8
			Folha: 5 de 10



S06	Meio Cone Invertido	1	Aço Inoxidável AISI 304
Cód. Peça	Denominação	Qnt.	Material
 <p>unipampa Universidade Federal do Pampa</p>	Título: Separador de Casca/Amêndoas de Noz Pecã		Projeção: 
	Instituto:	Universidade Federal do Pampa	Data: 05/12/2016
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Unidade: mm
	Responsável:	Erick Medeiros Silva	Escala: 1:7
			Folha: 6 de 10

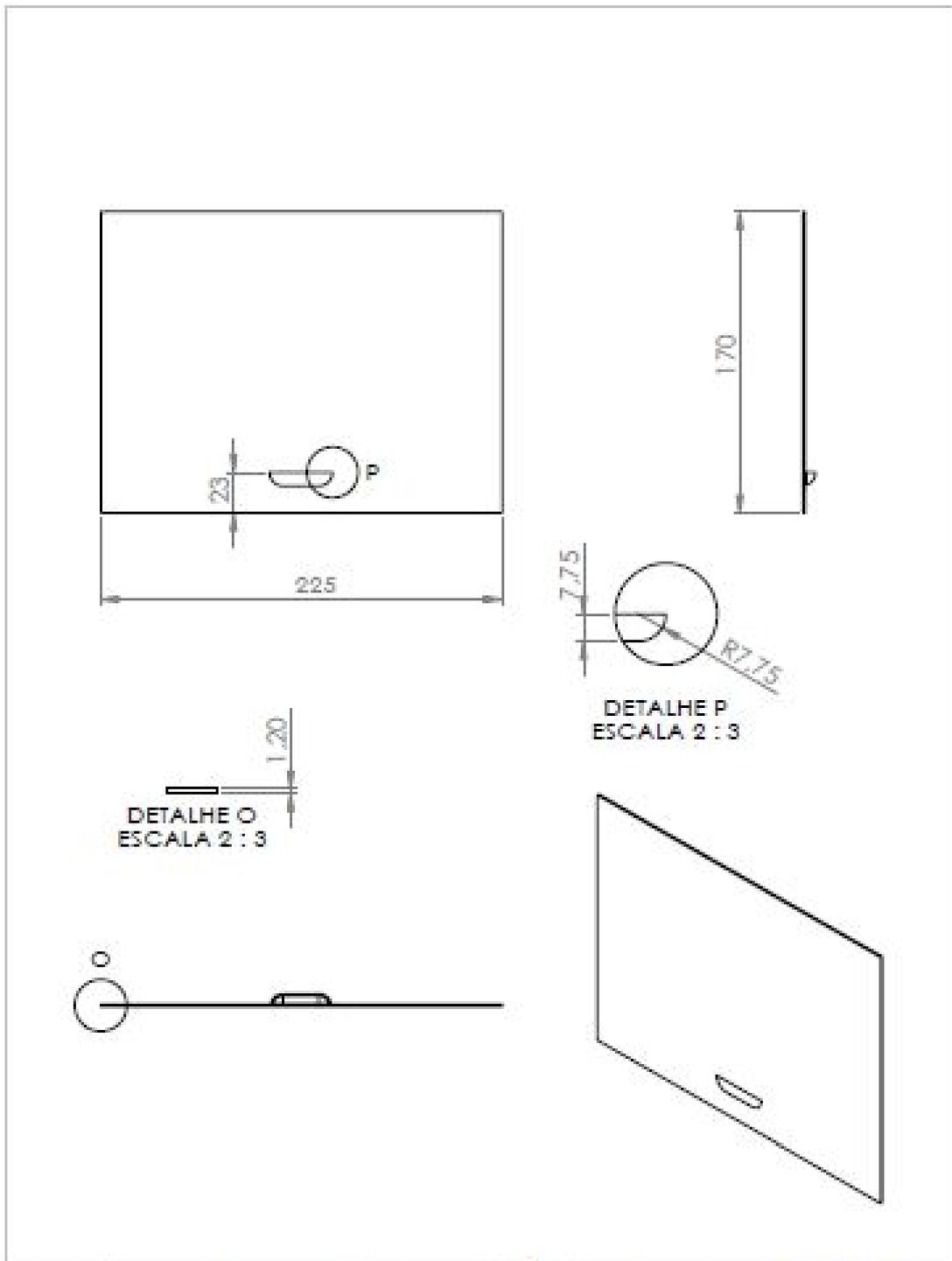


S07	Bica de Saída de Amêndoa	1	Aço Inoxidável AISI 304
Cód. Peça	Denominação	Qnt.	Material
 Universidade Federal de Pampa	Título: Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã		Projeção: 
	Instituto:	Universidade Federal de Pampa	Data: 05/12/2016
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Unidade: mm
	Responsável:	Erick Medeiros Silva	Escala: 1:4
			Folha: 7 de 10

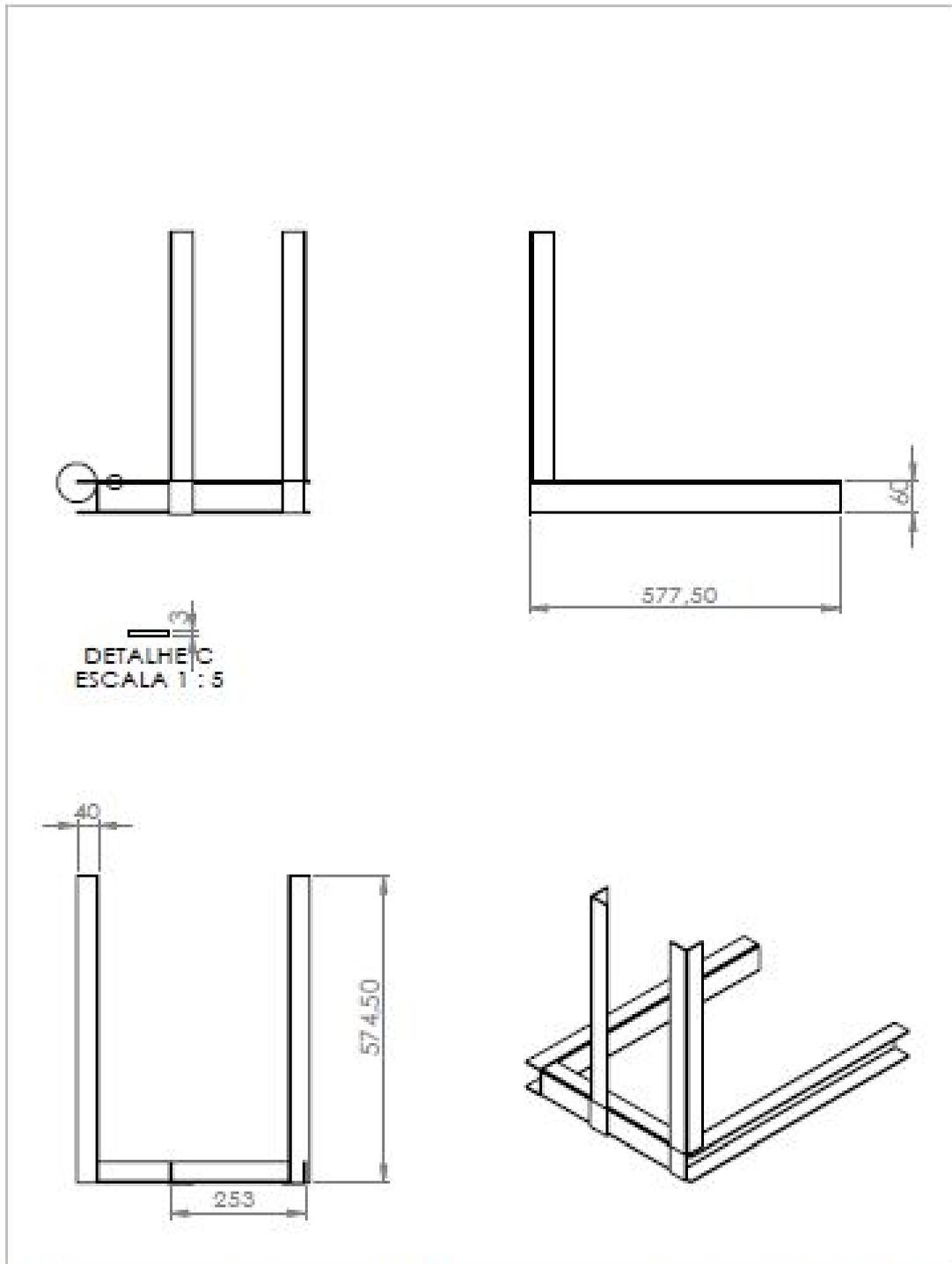


DETALHE N  
ESCALA 2 : 7

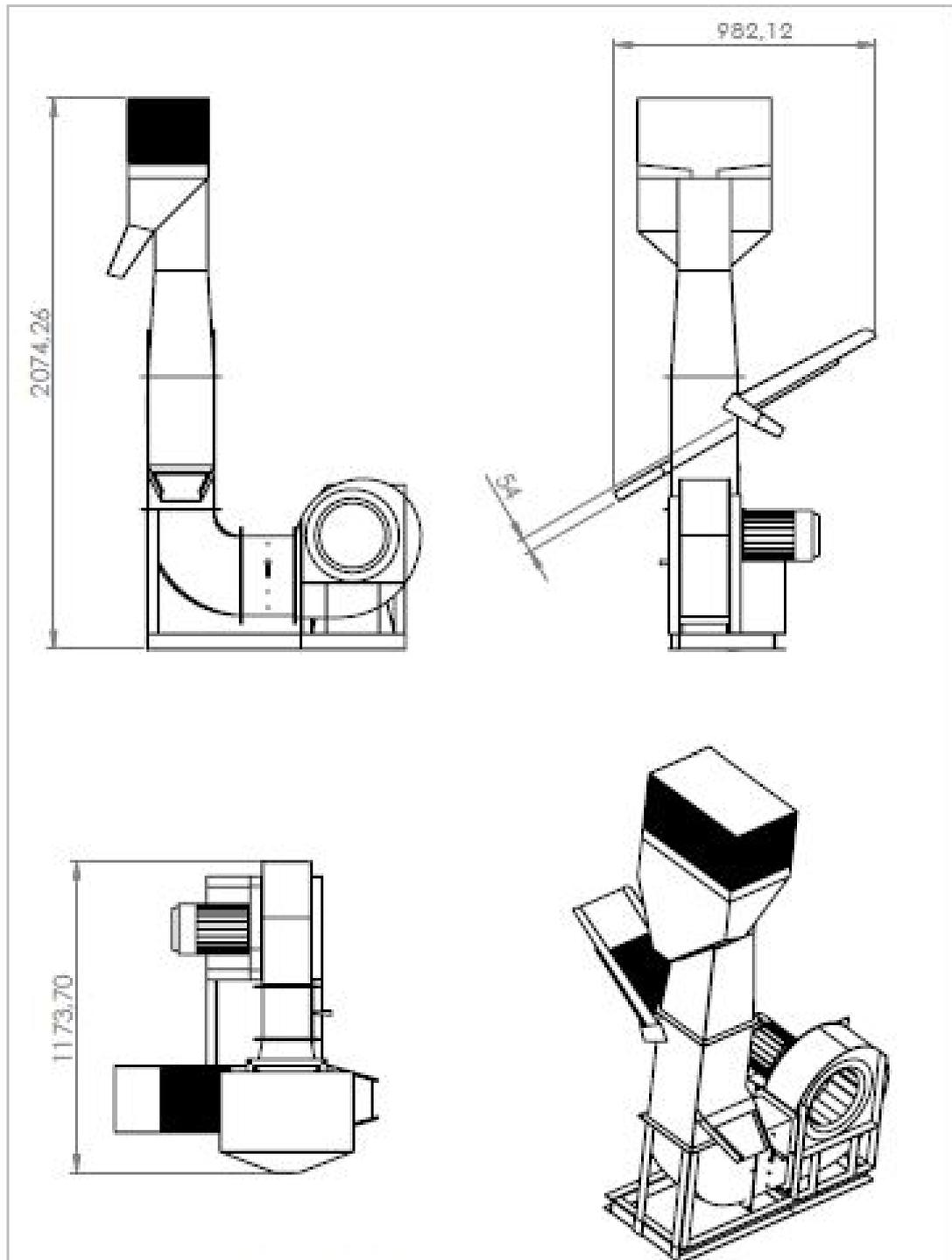
S08	Bica de Alimentação	1	Aço Inoxidável AISI 304
Cód. Peça	Denominação	Qnt.	Material
	Título		Projeção: 
	Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã		Data: 05/12/2016
	Instituto:	Universidade Federal do Pampa	Unidade: mm
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Escala: 1:7
Responsável:	Erick Medeiros Silva	Folha: 8 de 10	



509	Tampa de Manutenção	1	Aço Inoxidável AISI 304
Cód. Peça	Denominação	Qnt.	Material
 Universidade Federal de Pampa	Título: Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã		Projeção: 
	Instituto:	Universidade Federal de Pampa	Data: 05/12/2016
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Unidade: mm
	Responsável:	Erick Medeiros Silva	Escala: 1:3
			Folha: 9 de 10



S14	Base do Separador	1	Aço Inoxidável AISI 304
Cód. Peça	Denominação	Qtt.	Material
 Universidade Federal de Pampa	Título: Separador de Casca/Amêndoas de Noz Pecã		Projeção: 
	Instituto:	Universidade Federal do Pampa	Data: 05/12/2016
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Unidade: mm
	Responsável:	Erick Medeiros Silva	Escala: 1:10
			Folha: 1 de 10



Cód. Peça	Denominação	Qtd.	Material
	Montagem do Separador	1	
 Universidade Federal de Pampa	Título: Separador de Casca/Amêndoa de Noz Pecã		Projeção: 
	Instituto:	Universidade Federal de Pampa	Data: 05/12/2016
	Departamento:	Engenharia Mecânica	Unidade: mm
	Responsável:	Erick Medeiros Silva	Escala: 1:20
			Folha: 10



# Anexos



# ANEXO A – Catálogos e Tabelas

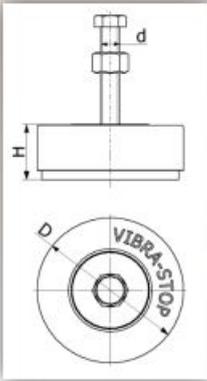
Figura 38 – Amortecedor tipo Mac selecionado.



**VIBRA - STOP**  
Desde 1956 em 1º lugar na fabricação de amortecedores de impacto e vibração

Rev. 00

### Linha Tradicional



**Descrição**

Carcaça em ferro fundido nodular (com possibilidade de fabricação em AÇO INOX 316), com pintura eletrostática à pó na cor padrão prata e base de borracha natural.

**Características do Amortecedor**

\*Frequência natural entre 12 a 18 Hz.

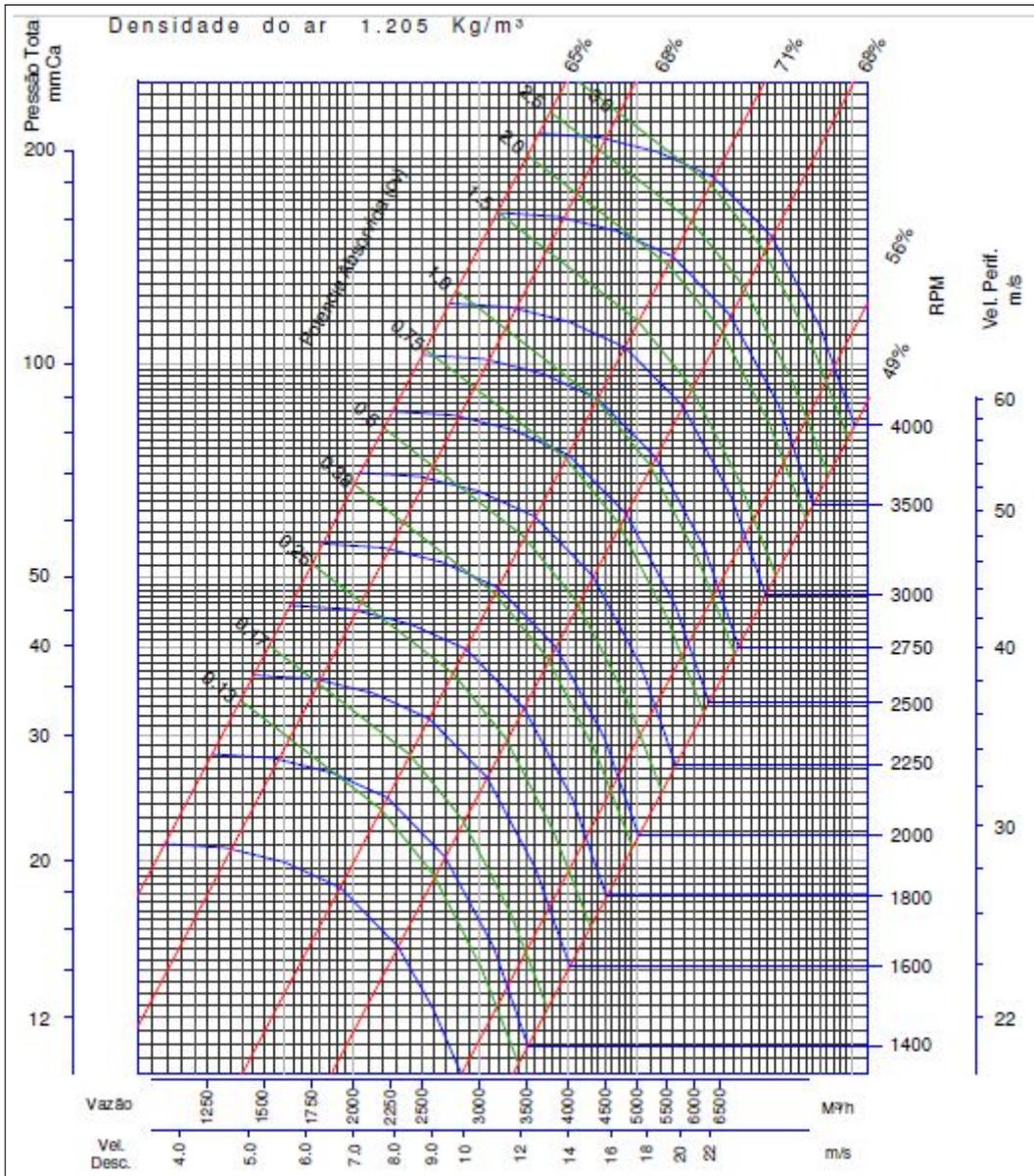
\*Frequência natural para a linha tradicional com Mafu de Aço: 20 a 25 Hz

Tradicional	Mac	Mini	Standard	Intermediário	Super	Mega
Carga Estática Kgf	50 a 200	200 a 500	500 a 1.500	1.500 a 5.000	5.000 a 10.000	10.000 a 20.000
Carga Dinâmica Kgf	200 a 500	500 a 2.000	2.000 a 6.000	6.000 a 20.000	20.000 a 40.000	40.000 a 80.000
Diâmetro (D) mm	62	90	115	150	190	230
**Parafuso (d)	1/4" 5/16" 3/8"	3/8" 1/2" 5/8"	1/2" 5/8" 3/4"	5/8" 3/4" 1"	5/8" 3/4" 1"	3/4" 1" 1 1/2"
Altura Regulável (H) mm	25~30	40~50	51~60	50~70	55~75	65~85

\*Todas as roscas seguem o padrão americano UNC, exceto as de bitola 1/2" que seguem o padrão WW. Os complementos dos parafusos são: Mac: [UNC 1/4" x 2,1/2"; UNC 5/16" x 2,1/2"; UNC 3/8" x 2,1/2"]; Mini: [UNC 3/8" x 3"; WW 1/2" x 3"; UNC 5/8" x 4"]; Standard: [WW 1/2" x 4"; UNC 5/8" x 4"; UNC 3/4" x 4"]; Intermediário: [UNC 5/8" x 4"; UNC 3/4" x 4"; UNC 1" x 5"]; Super: [UNC 5/8" x 4"; UNC 3/4" x 5"; UNC 1" x 6"]; Mega: [UNC 3/4" x 5"; UNC 1" x 6]; UNC 1 1/8" x 6"]

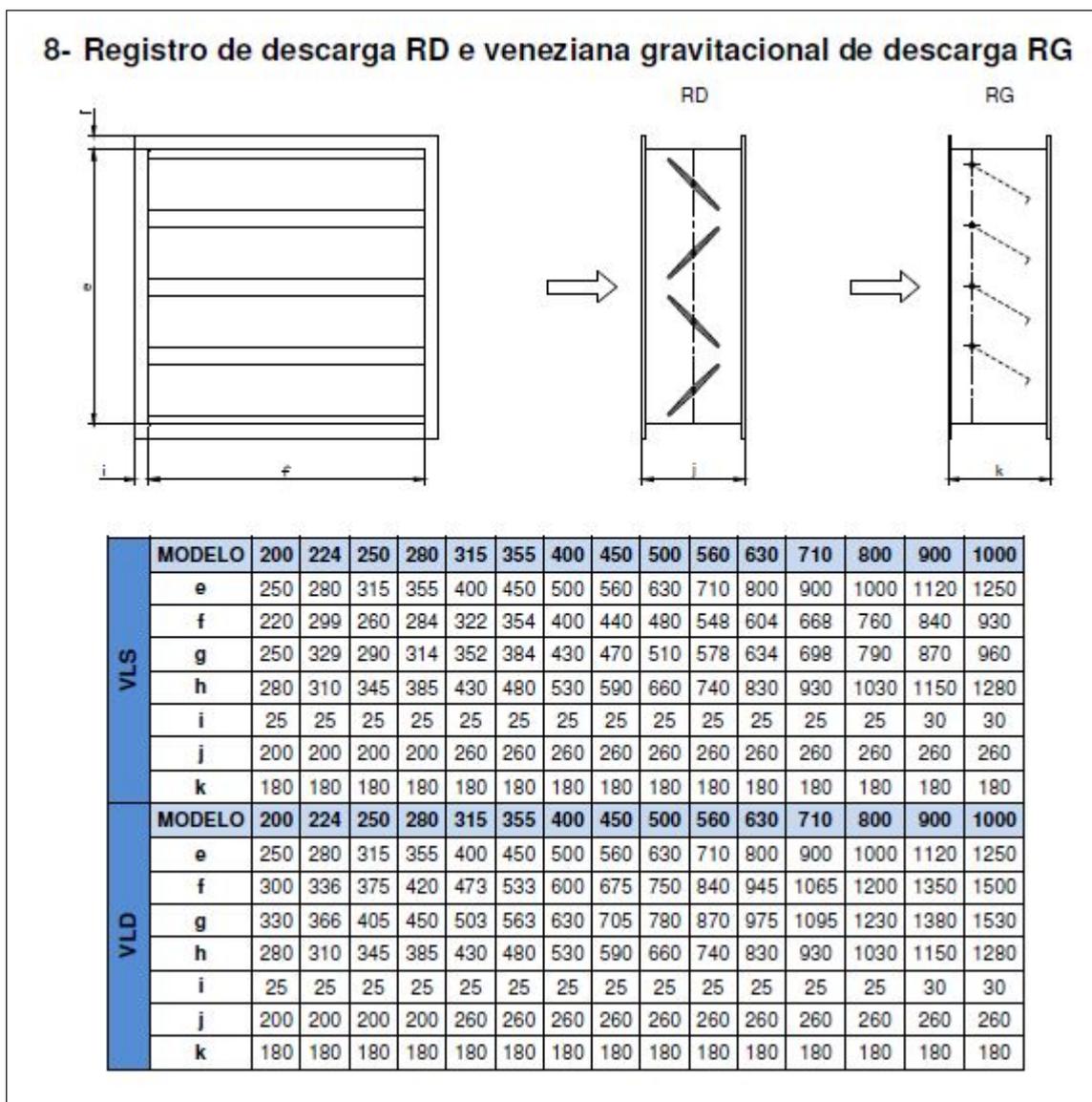
Fonte: Adaptado do Catálogo (VIBRA STOP).

Figura 39 – Curva de desempenho do ventilador pás voltadas para trás D280 da TERMODIN.



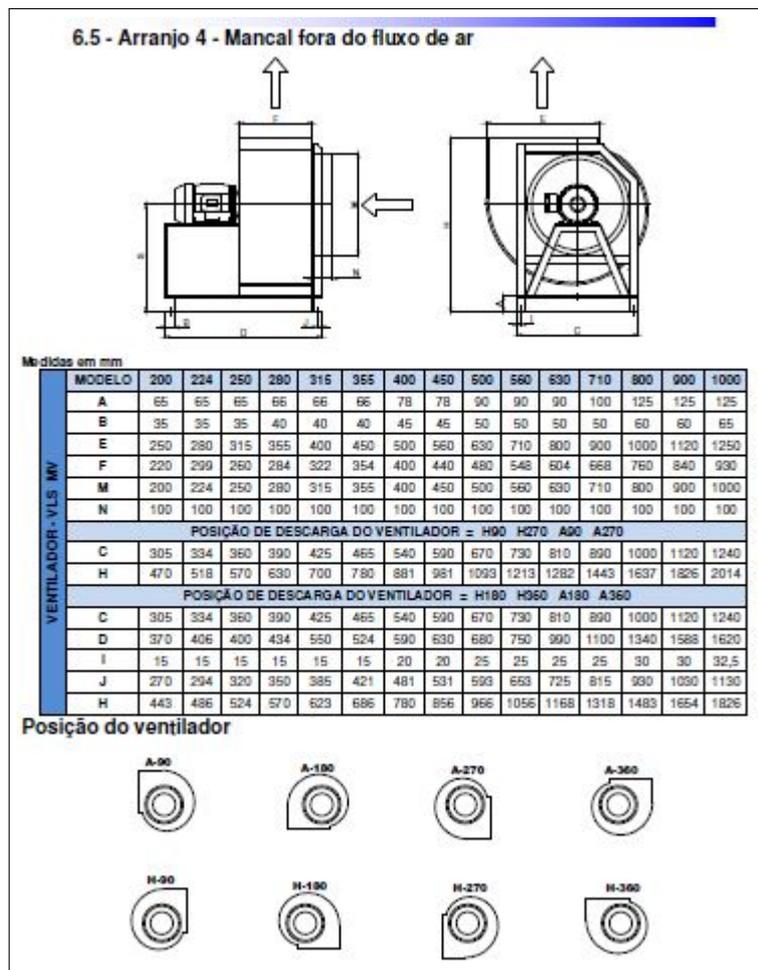
Fonte: Adaptado do Catálogo (TERMODIN).

Figura 40 – Características do Damper.



Fonte: Adaptado do Catálogo (TERMODIN).

Figura 41 – Arranjo do Ventilador.



Fonte: Adaptado do Catálogo (TERMODIN).

Figura 42 – Tela selecionada para o meio cone invertido.

 **A Futura**  
TECIDOS METÁLICOS  
TABELA DE ABERTURAS

MALHA	DIÂMETRO DO ARAME		ABERTURA DA MALHA	PESO POR METRO QUADRADO		ÁREA ABERTA	MALHA	DIÂMETRO DO ARAME		ABERTURA DA MALHA	PESO POR METRO QUADRADO		ÁREA ABERTA	
	Inglês 25,40mm	BWG		mm	Ferro Galv. Inox			Cobre Latão	Inglês 25,40mm		BWG	mm		Ferro Galv. Inox
<b>2</b>	14	2,11	10,59	4,16	4,70	69,30	<b>15</b>	24	0,56	1,13	2,80	3,16	44,8	
	16	1,65	11,05	2,56	2,89	75,70		25	0,50	1,19	1,88	2,38	49,7	
	18	1,24	11,46	1,52	1,72	81,40		26	0,46	1,23	1,54	1,74	53,0	
	20	0,89	11,81	0,80	0,90	86,30		28	0,36	1,34	1,00	1,03	62,0	
<b>2 ½</b>	14	2,11	8,05	3,50	6,22	62,80	30	0,30	1,40	0,70	0,79	67,7		
	16	1,65	8,51	3,20	3,62	70,20	<b>16</b>	24	0,56	1,03	2,43	2,75	41,9	
	18	1,24	8,92	1,75	1,98	77,00		26	0,46	1,13	1,64	1,85	50,4	
	19	1,04	9,12	1,28	1,45	80,60		28	0,36	1,23	1,07	1,20	59,8	
20	0,89	9,27	1,00	1,13	83,30	30		0,30	1,29	0,70	0,85	65,8		
<b>3</b>	14	2,11	6,36	6,24	7,05	56,40	32	0,23	1,36	0,40	0,45	73,1		
	16	1,65	6,81	4,33	4,90	64,80	<b>18</b>	24	0,56	0,85	2,74	3,10	36,4	
	18	1,24	7,22	2,24	2,60	72,80		26	0,46	0,95	1,85	2,08	45,4	
	19	1,04	7,42	1,54	1,74	76,90		28	0,36	1,05	1,10	1,30	55,5	
	20	0,89	7,57	1,20	1,36	80,00		30	0,30	1,11	0,78	0,90	62,0	
21	0,81	7,65	0,96	1,08	81,80	32		0,23	1,18	0,44	0,49	70,0		
<b>4</b>	14	2,11	4,24	8,32	10,18	44,60	26	0,46	0,81	2,05	2,32	40,7		
	16	1,65	4,70	5,48	6,20	54,80	28	0,36	0,91	1,33	1,50	51,3		
	18	1,24	5,11	2,85	3,22	64,80	30	0,30	0,97	0,93	1,05	58,4		
	19	1,04	5,31	2,05	2,32	69,90	32	0,23	1,04	0,48	0,54	67,1		
	20	0,89	5,46	1,60	1,81	73,90	<b>20</b>	28	0,36	0,80	1,46	1,65	47,4	
	21	0,81	5,54	1,28	1,45	76,10		30	0,30	0,85	1,02	1,15	54,8	
	22	0,71	5,64	1,02	1,16	78,90		32	0,23	0,92	0,53	0,60	64,2	
23	0,63	5,72	0,75	0,85	81,10	<b>24</b>		28	0,36	0,70	1,46	1,80	43,5	
16	1,65	3,43	6,40	7,28	45,60			30	0,30	0,76	1,08	1,20	51,3	
18	1,24	3,84	3,76	4,25	57,20		32	0,23	0,83	0,60	0,65	61,3		
19	1,04	4,04	2,56	2,89	69,20		<b>26</b>	30	0,30	0,68	1,21	1,36	48,0	
20	0,89	4,19	1,84	2,10	68,00			32	0,23	0,75	0,63	0,71	58,5	
21	0,81	4,27	1,60	1,81	70,60	<b>28</b>		30	0,30	0,61	1,30	1,47	44,8	
22	0,71	4,37	1,20	1,36	74,00			32	0,23	0,68	0,73	0,76	55,7	
23	0,63	4,45	0,93	1,05	76,70			<b>30</b>	30	0,30	0,55	1,35	1,60	40,8
24	0,56	4,52	0,76	0,86	79,20		32		0,23	0,62	0,75	0,85	53,0	
<b>6</b>	18	1,24	2,99	4,86	4,93		50,00		33	0,20	0,65	0,60	0,68	58,3
	19	1,04	3,18	3,07	3,47	56,90	<b>35</b>		32	0,23	0,50	0,84	0,95	46,7
	20	0,89	3,34	2,40	2,71	62,40			33	0,20	0,53	0,70	0,79	52,5
	21	0,81	3,42	1,92	2,17	65,40		<b>40</b>	32	0,23	0,41	1,05	1,15	40,7
	22	0,71	3,52	1,48	1,68	69,30			33	0,20	0,44	0,80	0,90	47,0
	23	0,63	3,60	1,18	1,40	72,30			<b>45</b>	33	0,20	0,364	0,90	1,08
	24	0,56	3,67	0,91	1,03	75,30								

Fonte: Adaptado do Catálogo (A FUTURA).