

Universidade Federal do Pampa

Rafael Brito Solane

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA NOZ PECÃ E PROJETO DO DECORTICADOR

Alegrete

2015

Rafael Brito Solane

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA NOZ PECÃ E PROJETO DO DECORTICADOR

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: Dr. Wang Chong

Coorientador: Dr. Marco Antonio Durlo Tier

Alegrete

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S684c Solane, Rafael Brito
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA NOZ PECÃ E PROJETO DO
DECORTICADOR / Rafael Brito Solane.
153 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2015.

"Orientação: Wang Chong".

1. Projeto de Máquinas. 2. Caracterização Mecânica. 3.
Materiais Orgânicos. I. Título.

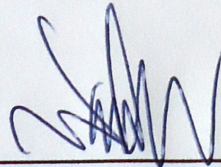
Rafael Brito Solane

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA NOZ PECÃ E PROJETO DO DECORTICADOR

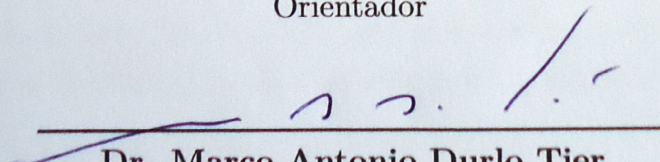
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 11 de 12 de 2015

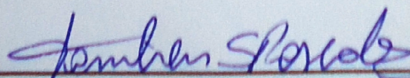
Banca examinadora:



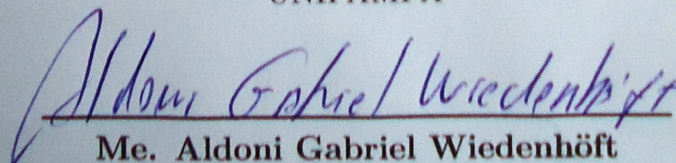
Dr. Wang Chong
Orientador



Dr. Marco Antonio Durlo Tier
Co-orientador
UNIPAMPA



Dr. Tonilson de Souza Rosendo
UNIPAMPA



Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft
UNIPAMPA

Este trabalho é dedicado a todas as pessoas que por algum motivo não tiveram a mesma oportunidade de estudo que a mim foi conferida. Mais do que uma formação recebo a partir deste trabalho uma responsabilidade social com todas essas pessoas.

Agradecimentos

Em primeiro lugar e sempre, quero agradecer Aquele(a) Que É Todas as Coisas, a Fonte de tudo, tudo que é vida - e a própria vida.

Aos mestres espirituais, que incluem os santos e sábios de todas as religiões.

À minha mãe, Maria João, a qual tenho enorme admiração pela força de superação e muito amor.

Ao meu pai, João Carlos (em lembrança), que apesar de não ter recordações, levo-o sempre no meu coração e sangue.

À minha avó, "Vó Beta", que com fala mansa e doce, ajudou e muito em minha criação.

Ao meu avô (em lembrança), Vô Brito, que foi meu exemplo de homem e pai, foi com ele que aprendi a fazer minha primeira pipa, ou papagaio para alguns (rsrsrsrs).

Ao tio Decko, o qual sempre admirei sua capacidade de assimilação e tenho como exemplo de determinação.

Não menos importante, quero agradecer também as minhas duas irmãs, Leticia e Ana Carolina, as quais tenho profundo amor e respeito, e que me deram dois sobrinhos lindos, Pedro Henrique e João Lucas.

À minha namorada, companheira e grande amor Alana pela compreensão e paciência durante este período da graduação, o qual este trabalho de conclusão marca o início de uma nova fase em nossas vidas.

Também gostaria de agradecer ao meu tio Luis Henrique, pois se não fosse por ele a minha permanência na universidade teria sido muito mais difícil. Agradeço a todos os meus familiares que se fizeram presentes na vida minha, seja em momentos pontuais ou constantes.

Agradeço a todas as pessoas que me acolheram em Alegrete-RS, em especial a família do Srº Antônio Siqueira, e a família da Zilda Serwatka. Agradeço também aos meus colegas do grupo PET-CTC.

Agradeço a todos os meus amigos em especial Robison Gomes, Anderson Souza, Erick Medeiros e Felipe Bueno e também aos meus inimigos (se é que existem), pois são forças impulsionadoras para o sucesso.

Ao meu orientador Wang Chong, que em momento algum negou transmitir seus conhecimentos de forma clara e concisas, sempre me mostrando o caminho da ciência mais coerente para a conclusão deste trabalho.

Ao meu tutor e coorientador Marco Tier pelas oportunidades de aprendizado, motivação e incentivo na realização deste e outros trabalhos, foi por sua motivação e incentivo que este trabalho começou a ser desenvolvido e continuará até se tornar um empreendimento.

A UNIPAMPA pela oportunidade e todo o Centro de Tecnologia de Alegrete, principalmente aos professores que deram a base para minha formação, são eles: Tonilson Rosendo, José Wagner, Carlos Dilli, Marco Tier, Paulo César, Renato Silva, Daniel Gamarra, Aldoni Gabriel, Fátima Cibele, Jorge Arpasi, Ricardo Schenato, Rodrigo Machado, Gustavo Fuhr, Luis Kostaski, Vicente Puglia, Fladimir Fernandes, Leandro Tesing, Alexandre Oliveira, Luis Armas, Wang Chong, Maurício França, Roca Bruno, Ana Paula, Felipe Denardin, Vilnei Dias e Leonel Delatorre.

A empresa Odonto Arruda, pois foi através dela que consegui fabricar os principais componentes do modelo em escala utilizado neste trabalho.

Por fim quero agradecer a todos os cidadãos pagantes de impostos, por financiarem a existência dessa e todas as outras universidades públicas do país.

*“É necessário sempre acreditar que um sonho
é possível, que o céu é o limite e você
truta é imbatível.”*

(509 – e)

Resumo

Na atual indústria de beneficiamento de nozes nota-se que as dificuldades encontradas durante o processo se devem principalmente às decorticadoras utilizadas, onde não se tem equipamentos eficientes por se tratar de um fruto anisotrópico e com alta resistência mecânica. O desenvolvimento de um sistema adequado para o descasque da noz pecã, exige conhecimento e aplicação das características mecânicas associadas ao fruto. Neste contexto o trabalho se propõe a investigar algumas destas características, tais como: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e resistência à flexão da amêndoa. Investigou-se também o perfil de espessura, módulo de elasticidade e fragilidade do endocarpo. A partir dos dados obtidos nas investigações, desenvolveu-se um modelo em escala do decortificador bem como o projeto detalhado, cujo princípio de funcionamento é por meio de compressão radial associado ao cisalhamento do endocarpo. A metodologia deste projeto está estruturada em quatro etapas, sendo a identificação da necessidade do equipamento a primeira etapa, seguida de ensaios mecânicos dos frutos e concepções do decortificador, na terceira etapa, o projeto detalhado é realizado de forma a caracterizar as concepções e por fim a etapa de análise e seleção, cuja função é qualificar as demais etapas do projeto. Os resultados são expressos por meio da descrição do memorial de projeto. Os ensaios de compressão dos frutos, mostraram diferença na resistência mecânica entre os frutos *in natura* e secos. Nos ensaios de compressão do endocarpo obteve-se 316,87 MPa para o módulo de elasticidade, já as amêndoas apresentaram 11,07 MPa e 0,36 para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson respectivamente. O modelo em escala do decortificador apresentou uma eficiência de 53,81% para amêndoas inteiras, totalizando entre amêndoas inteiras e pela metade 81,61% de desempenho. O efeito de secagem e corte das extremidades do fruto, não foram testados no modelo.

Palavras-chave: Decortificador de Noz Pecã, Propriedades Mecânicas, Beneficiamento e Noz Pecã.

Abstract

Nowadays it has been noticed that there are some difficulties in processing industries due especially to the use of common nut peelers. This is owed to the lack of efficient equipment since the nut is an anisotropic fruit with high mechanical resistance. The development of a suitable system to peel the fruit requires knowledge and application of mechanical characteristics of the fruit. In this context, the study aims to investigate some of these features, such as Poisson's coefficient and nut bending resistance. Thickness profile Young's modulus and fragility of the endocarp have also been investigated. From the data obtained in these investigations, a nut peeler in model scale was developed, as well as a detailed design whose principle of operation is by radial compression associated with cored shear. The methodology of this project is outlined in four stages: first, the identification of equipment needed; second, mechanical tests of fruits and peeler conceptions; third, the detailed design is performed in order to characterize the conceptions; and finally, the analysis and selection whose function is to qualify the project's remaining stages. Results are expressed by design memorial description. The fruit compression test showed difference in mechanical resistance between the fruits in nature and dry for different breaking speeds. The compression test showed 316.87 *MPa* for Young's modulus, and kernels have presented 11.07 *MPa* and 0.36 for the Young's modulus and Poisson's coefficient respectively. The nut peeler scale model showed an efficiency of 53.81% for whole nuts, summing between whole almonds and half 81.61% of performance. The effect of drying and cutting the ends of fruits has not been tested in the model.

Key-words: Pecan nut Peeler, Mechanical Properties, Beneficiation and Pecan nut.

Lista de ilustrações

Figura 1 – A)Nogueira-pecã. B)Noz pecã.	31
Figura 2 – Endosperma.	32
Figura 3 – Quebrador de noz macadâmia - (A) Cilindro, (B) Placa estacionária, (C) Pistão, (D) Mola, (E) Ar comprimido e (e) Deformação máxima.	34
Figura 4 – Quebrador de noz karitê.	35
Figura 5 – Descascador de amendoim.	35
Figura 6 – Quebrador de noz pecã.	36
Figura 7 – Diagrama tensão <i>versus</i> deformação.	37
Figura 8 – Espiral de projeto.	43
Figura 9 – Estrutura do fruto.	47
Figura 10 – Fluxograma de distribuição das amostras.	48
Figura 11 – Perfil de espessura do endocarpo.	48
Figura 12 – Padronização para ensaio de compressão axial. (A) Extremidade li- xada. (B) Extremidade intacta. (C) Eixo de compressão.	49
Figura 13 – Shimadzu.	50
Figura 14 – Combinação dos fatores do experimento.	51
Figura 15 – (A) Planos de corte. (B) Corpo de prova com membrana. (C) Corpo de prova sem membrana.	54
Figura 16 – Comportamento típico dos ensaios.	55
Figura 17 – Amostras com membrana.	55
Figura 18 – Amostras sem membrana.	56
Figura 19 – Compressão radial do endocarpo com membrana paralela ao eixo de deslocamento.	57
Figura 20 – Compressão radial do endocarpo para amostras sem membranas.	58
Figura 21 – (A) Simulação do corpo de prova. (B) Representação de uma barra curvada.	59
Figura 22 – Corpos de prova extraídos da amêndoa.	60
Figura 23 – Ensaio de compressão das amêndoas.	61
Figura 24 – Representação esquemática do ensaio de flexão	62
Figura 25 – Comportamento dos corpos de prova durante ensaio de flexão de 3 pontos.	63
Figura 26 – Simulação do ensaio de flexão.	64
Figura 27 – Representação do indentador conônico.	66
Figura 28 – Indentadores cônicos usinados.	67
Figura 29 – Etapas dos ensaios	68
Figura 30 – Comportamento dos indentadores durante o processo de ruptura do endocarpo.	69

Figura 31 – Granulometria das amêndoas resultante dos ensaios.	70
Figura 32 – Granulometria das cascas resultantes dos ensaios.	70
Figura 33 – Frutos secos e com corte nas extremidades de 5,5 <i>mm</i>	71
Figura 34 – (A)Ação do indentador nos frutos com corte de 4 <i>mm</i> . (B)Ação do indentador nos frutos com corte de 5,5 <i>mm</i>	71
Figura 35 – Ilustração do decortificador após otimizações.	72
Figura 36 – A) Modelo em CAD. B) Modelo fabricado.	73
Figura 37 – Granulometria das amêndoas após a classificação do material recolhido.	74
Figura 38 – Granulometria das cascas após a classificação do material recolhido.	74
Figura 39 – Direção e sentido da força gerada em função do momento tursor e perfil do helicóide.	75
Figura 40 – Representação esquemática do sistema de transmissão e as solicitações envolvidas.	76
Figura 41 – Componentes do cilindro mestre.	78
Figura 42 – Diagrama de corpo livre.	79
Figura 43 – Curvas de falha.	82
Figura 44 – Dimensionamento dos cordões de solda.	83
Figura 45 – Configuração para análise do cilindro mestre.	85
Figura 46 – Coeficiente de segurança em fadiga do cilindro mestre.	85
Figura 47 – Simulação do cilindro mestre. (a) Tensão equivalente de von Mises (<i>MPa</i>). (b) Deformação total (<i>mm</i>).	86
Figura 48 – Configuração de trabalho dos dedinhos.	86
Figura 49 – Representação da configuração dos dedinhos (vista superior) e impacto com a amêndoa.	87
Figura 50 – Viga em balanço carregada	88
Figura 51 – Carcaça do decortificador.	89
Figura 52 – Simulação da tampa superior. (a)Tensão equivalente de von Mises (<i>MPa</i>). (b)Deformação total (<i>mm</i>).	89
Figura 53 – Simulação da tampa inferior. (a) Tensão equivalente de von Mises (<i>MPa</i>). (b)Deformação total (<i>mm</i>).	90
Figura 54 – Simulação do cone recalçado. (a) Tensão equivalente de von Mises (<i>MPa</i>). (b)Deformação total (<i>mm</i>).	90
Figura 55 – Simulação do cone recalçado com aletas de reforço. (a) Tensão equiva- lente de von Mises (<i>MPa</i>). (b) Deformação total (<i>mm</i>).	91
Figura 56 – Estrutura do decortificador.	91
Figura 57 – A) Tensão equivalente de von Mises (<i>MPa</i>). B) Deformação total da estrutura (<i>mm</i>).	92
Figura 58 – 2º e 3º modo de vibração.	93
Figura 59 – A) Conjunto decortificador de noz pecã. B) Detalhe decortificador.	95

Figura 60 – Principais componentes do decortificador de noz pecã.	96
Figura 61 – Coeficientes para fator de acabamento superficial, k_a	113
Figura 62 – Fator de geometria k_b e fator de carregamento k_c	113
Figura 63 – Fator de temperatura, k_d	114
Figura 64 – Fator de confiabilidade, k_e	114

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos decorticadores	34
Tabela 2 – Características geométricas (<i>mm</i>).	49
Tabela 3 – Combinações para ensaios.	50
Tabela 4 – Algumas Propriedades Físicas da Noz Pecã.	51
Tabela 5 – Quadro Análise de Variância (ANOVA) para experimentos 2^2 , n réplicas.	52
Tabela 6 – Efeitos do Experimento.	52
Tabela 7 – Quadro ANOVA para a significância dos efeitos sobre à força.	53
Tabela 8 – Quadro ANOVA para a significância dos efeitos sobre à deformação	53
Tabela 9 – Amostras com membrana	56
Tabela 10 – Amostras sem membrana.	56
Tabela 11 – Quadro ANOVA dos ensaios de compressão axial do endocarpo.	57
Tabela 12 – Quadro ANOVA dos ensaios de compressão radial do endocarpo.	58
Tabela 13 – Dados colhidos para determinação do módulo de elasticidade.	62
Tabela 14 – Dados dos ensaios de flexão das amêndoas	63
Tabela 15 – Modos de vibração.	93
Tabela 16 – Parafusos.	93
Tabela 17 – Relatório de custos.	98
Tabela 18 – Coeficiente em função da qualidade da solda	117

Lista de siglas e abreviaturas

ANOVA Análise de Variância

ANSI *American National Standards Institute*

b.s. Base Seca

b.u. Base Úmida

C.P. corpo de prova

CAE *Computer Aided Engineering*

CS coeficiente de segurança

ISO *International Organization for Standardization*

NR Norma Regulamentadora

NSF/ANSI NSF International/American National Standards Institute

Lista de símbolos

U	Teor de Umidade
L	Comprimento
L_0	Comprimento inicial
n	Numero de Repetições
ϵ	Deformação convencional
σ_{ad}	Tensão admissível do material sob tensões axiais
σ_a	Componente de amplitude
σ_{eq}	Tensão equivalente
τ_{ad}	Tensão admissível do material sob tensões tangenciais
ϱ_1	Tensão no cordão submetido a tração, compressão ou cisalhamento.
ϱ_2	Tensão no cordão submetido a flexão
ϱ_{ad}	Tensão admissível
ϱ_a	Tensão cíclica no cordão
a	Garganta do cordão de solda
A_i	Área do i^{esimo} componente
E	Módulo de Elasticidade
k	Número de fatores
K_{fs}	Fator de concentração de tensão de fadiga para o cisalhamento
K_f	Fator de concetração de tensão de fadiga para flexão.
l_n	Comprimento do cordão
M_f	Momento fletor
n	Tamanho da entrada
P	Força
S_D	Soma de quadrados totais

S_R	Soma de quadrados de resíduos
S_{us}	Limite de resistência ao cisalhamento
S_{ut}	Limite de resistência a tração
S_{ys}	Limite de resistência ao escoamento (cisalhamento)
S_y	Limite de resistência ao escoamento (tração)
W_n	Módulo de resistência do cordão
Y	Módulo de Young

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Justificativa	28
1.2	Objetivos	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Aspectos Botânicos: Nogueira-Pecã	31
2.2	Teor de Umidade	32
2.3	Decorticadores: Princípios e Rendimentos	33
2.4	Propriedade dos Materiais	36
2.5	Fundamentos de Projeto de Máquinas	38
2.5.1	Teoria de Falhas Estáticas	40
2.5.2	Fadiga	40
3	METODOLOGIA	43
4	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	47
4.1	Caracterização da Noz Pecã	47
4.1.1	Fruto <i>in natura</i>	49
4.1.2	Endocarpo	54
4.1.3	Amêndoa	60
5	PROJETO DO DECORTICADOR	65
5.1	Escopo	65
5.2	Indentador Cônico Cortante - 1ª Conceção	65
5.2.1	Dimensionamento do Indentador Cônico e Ensaio	65
5.2.2	Resultados e Discussão	68
5.3	Cone Recalcado de Compressão Radial - 2ª Conceção	71
5.3.1	Fabricação e Teste com o Modelo	72
5.3.2	Sistema de Acionamento	76
5.3.3	Dimensionamento do Cilindro Mestre	78
5.3.4	Dimensionamento dos Dedinhos	86
5.3.5	Verificação do Estado de Solicitação da Carcaça	88
5.3.6	Dimensionamento da Estrutura	91
5.3.7	Dimensionamento dos Elementos de Máquinas	93
5.3.8	Montagem Final	95
5.3.9	Procedimentos de Operação e Manutenção	96

5.3.10	Estimativa de Custos	97
6	CONCLUSÕES	99
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS	103
	ANEXOS	107
	ANEXO A – CURVAS DE SENSIBILIDADE AO ENTALHE	109
	ANEXO B – FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO DE FA- DIGA	111
	ANEXO C – FATORES DE CORREÇÃO PARA O LIMITE DE FA- DIGA	113
	ANEXO D – TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS SEUS RESPECTI- VOS COEFICIENTES	116

1 Introdução

A fruticultura tem sido uma das alternativas mais procuradas por produtores de grãos e pecuária pelo alto retorno econômico por hectare e a possibilidade de consórcio com outras culturas. O Rio Grande do Sul possui clima e solo excelentes para o plantio de culturas de clima temperado, neste contexto destaca-se o cultivo de noz pecã, que depois de duas décadas esquecido retoma como alternativa de aumento de renda para pequenos produtores (BUENO, 2006).

Os últimos dados do IBGE (2010) apontam que produção brasileira de noz dobrou desde o ano de 2008, a quantidade é de aproximadamente 5.315 *toneladas*, sendo o Rio Grande do Sul o maior produtor (cerca 2.600 *toneladas*) seguida pelos estados do Paraná e Santa Catarina. Juntos os três estados somam aproximadamente 79% da produção nacional. Entre os 186 municípios gaúchos produtores de noz pecã, Cachoeira do Sul é o destaque com 27% da safra do estado, acompanhado de Anta Gorda, Rio Pardo e Sananduva.

De fato o país apresenta um potencial produtivo promissor com solos e clima aptos para este tipo de cultura, com isso o número de importação de noz pecã para o consumo interno poderá cair, visto que nos últimos anos *US\$167 milhões* foram gastos na importação do produto. Assim como o Brasil, a China e outros países da Ásia e Europa também apresentam uma produção insuficiente para suprir a demanda interna (Paralelo 30, 2015; GOUVEIA; ABATI, 2013).

As descobertas e o avanço significativo no campo da nutrição também impulsionam o aumento da produção, pois sugerem um consumo diário deste fruto, que fornece os macro, micronutrientes e outros componentes bioativos que fazem parte de uma dieta saudável e que podem diminuir os riscos de doenças do coração, mau-colesterol dentre outros benefícios (ORO, 2007; PITOL, 2008; DIVINUT, 2015). Outro fator que tem forte influência sobre o aumento da produção é a presença de cooperativas, associações e indústrias beneficiadoras, principalmente no Rio Grande do Sul, as quais visam recuperar os pomares em situação de abandono, enquanto outras visam expandir ou implementar essa cultura.

Entretanto um dos grandes gargalos na cadeia produtiva da noz é sem dúvida o beneficiamento. Segundo Ferreira (1993) o termo beneficiamento é “utilizado para designar um conjunto de intervenções que visam melhorar ou reparar determinados aspectos do produto”. O desenvolvimento do setor agroindustrial tem promovido o aumento do número de indústria de processamento, porém ainda se tem poucos estudos e disponibilidade tecnológica para este tipo de cultura (ORO, 2007). O processamento varia de acordo

com tipo de oleaginosa, entretanto a maioria das etapas são realizadas manualmente ou com pouca automatização.

Na indústria o processo inicia-se pela quebra e descascamento; a seguir, faz-se a classificação de acordo com tamanho e aspecto, dando início à fase de revisão, onde as amêndoas são repassadas para garantir a ausência de sujeiras ou impureza nos frutos já classificados. A fase de moagem é específica, e determinada pela necessidade do cliente, logo a seguir, é feita secagem, para remoção da umidade, a fim de aumentar o prazo de validade das amêndoas. Por fim o produto é embalado e enviado para a comercialização ou estocagem (PITOL, 2011). Para Ortiz (2000) o processo inicia-se pela remoção de impureza, lavagem e separação dos frutos por diferentes tamanhos e só depois é submetido a quebra e descasque, entretanto isso pode variar de acordo com a indústria e o grau de tecnologia empregado no beneficiamento.

A maior dificuldade encontrada entre as empresas que realizam essas intervenções é a obtenção de amêndoas inteiras no final do processo de quebra e descasque. Isso se deve a forma geométrica, anisotropismo nas dimensões e alta resistência da casca, o que torna uma tarefa ainda mais complexa (LIANG; CHIN; MITCHELL, 1984).

O trabalho está estruturado a partir de uma introdução sobre a noz pecã e seu beneficiamento, expondo suas potencialidades como alternativa produtiva aos pequenos agricultores e a possibilidades de comercialização. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, abordando-se aspectos botânicos da noz pecã e os princípios e rendimentos de decorticadoras para frutos similares. Os fundamentos de projeto de máquinas são abordados mostrando os aspectos mais relevantes. No terceiro capítulo é descrita a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho. Os capítulos 4 e 5 mostram o desenvolvimento do estudo, apresentando todas as considerações utilizadas e resultados obtidos. Por fim, as considerações finais apresentam uma breve discussão acerca dos objetivos estabelecidos como ponto de partida para a efetivação do presente estudo.

1.1 Justificativa

A noz é considerada um alimento de altíssimo valor nutricional e seu cultivo se adéqua ao clima do Rio Grande do Sul. A região Centro Oriental Rio Grandense é responsável pela maior parcela da produção do estado, entretanto o Sudoeste gaúcho apresenta um bom potencial produtivo, onde as cidades de Uruguaiana e Itaqui são pioneiras na produção do fruto. A perspectiva para aumento da produção é decorrente da demanda interna e externa juntamente com percepção da potencialidade do país por parte das cooperativas e produtores. A baixa disponibilidade de tecnologia e literatura técnica para o cultivo e industrialização, ainda são uns dos grandes fatores que desestimulam os produtores a investirem, visto que do plantio a comercialização o processo é quase que manual

ou semi automatizado.

O beneficiamento tem a etapa de quebra e descasque como sendo a chave para o desenvolvimento de toda a cadeia produtiva. A integridade da amêndoa ao final do processo sugere ao consumidor um produto de qualidade, além de que amêndoas danificadas mecanicamente apresentam teores de minerais, ácidos graxos e aminoácidos menores em relação às amêndoas intactas (SILVA; ASCHERI; SOUZA, 2010).

As linhas de beneficiamento de outros países oferecem maior tecnologia do que as encontradas no Brasil, onde se têm equipamentos praticamente manuais e para pequenas produções. Assim, o conhecimento das propriedades mecânicas dos frutos e as etapas de quebra e descasque mais eficientes e totalmente automatizadas irão fornecer ao consumidor um produto com maior qualidade, além de incentivar o desenvolvimento da cultura no Brasil, potencializar a geração de renda e trabalho no meio rural, em especial ao pequeno produtor, além de potencializar o desenvolvimento de tecnologia nacional.

1.2 Objetivos

Na atual indústria de beneficiamento da noz pecã nota-se que as dificuldades encontradas durante o processo se devem principalmente às decorticadoras utilizadas. Não se tem equipamentos eficientes por se tratar de um fruto anisotrópico e com alta resistência mecânica.

Nisso se baseia a definição dos objetivos gerais deste trabalho como:

- Caracterizar as propriedades mecânicas da noz pecã;
- Desenvolver o projeto de um decortificador de noz pecã

Já como objetivos específicos tem-se:

- Ensaiar mecanicamente o endocarpo e o endosperma;
- Dimensionar a estrutura do equipamento;
- Desenvolver um mecanismo que opere de forma contínua e para diferentes características geométricas dos frutos
- Realizar a caracterização granulométrica obtida ao final do descasque.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Aspectos Botânicos: Nogueira-Pecã

A nogueira pecã (*Carya illinoensis* (Wangenh) Koch) (Figura 1) é uma grande árvore frutífera pertencente à família Juglandaceae (PRADO, 2008; DIVINUT, 2015), nativa da América do Norte onde cresce a beira de rios, desde o Estado de Nebraska e Iowa, nos Estados Unidos, até Oaxaca, no sul do México. No Brasil foi com os imigrantes norte americanos em especial Ezekiel Pyles, que surgiram as primeiras plantações de nogueira localizadas na cidade de Santa Bárbara D'Oeste no estado de São Paulo (KIMATI et al., 1997).

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



Fonte: Prado (2008, p. 42)

Nos Estados Unidos existem mais de mil variedades de noz pecã (VENKATACHALAM, 2004). As mais comuns no Brasil são Mahan, Frotscher, Schley, Success, Moneymaker, Barton, Shawnee, Cape Fear, Chickasaw, Choktaw, Desirable, Melhorada, Imperial, Importada, Burkett, Chpecear, Shoshone (POLETTTO et al., 2012).

Os frutos (Figura 1-B) são do tipo drupa, agrupando-se em pequenos cachos de três a sete unidades envolta em uma casca verde e espessa, cujo nome é epicarpo, que se torna marrom e se abre quando madura, dividindo-se em quatro partes, aproveitando-se 40 a 60% do fruto (DIVINUT, 2015). A noz pecã possui coloração marrom e formato aproximado de um elipsoide, uma proteção externa muito dura, lisa e com algumas manchas pretas. A parte interna do fruto, denominada endosperma, consiste numa amêndoa frágil, com sabor exótico, doce e amanteigado.

O endosperma (Figura 2) é extraído no processamento da noz pecã e pode ser consumido *in natura* ou ser submetido ao processo de prensagem da noz. Na prensagem o principal produto é o óleo extra-virgem de noz pecã, rico em ácidos graxos (91,5%) monoinsaturados e polinsaturados e como subproduto tem-se a torta. A torta por sua vez possui um valor calórico de $5,364 \frac{kcal}{g}$ e comparado à noz inteira apresenta alto teor de lipídios (36,2%) e proteínas (22,1%), bem como quantidades significativas de carboidratos (16,3%), fibra total (14,3%), umidade (7,9%) e minerais (3,2%), que fazem da torta um alimento com excelentes características nutricionais (ORO, 2007).

Figura 2 – Endosperma.



Outro composto da noz também aproveitado é a casca da noz pecã, que representa de 40 a 50% da massa do fruto. Caracterizada como subproduto do processamento, a casca vem sendo bastante comercializada para o preparo de chás e farinha, por apresentar elevados teores de fibras (48,6%) e quantidades significativas de fenólicos totais e taninos condensados, que elevam o seu poder antioxidante (PRADO, 2008). Testes em laboratório ainda comprovam os efeitos benéficos no tratamento contra o tabagismo, aumentando a defesa antioxidante em casos de exposição à fumaça e na redução dos sintomas de ansiedades provocados pela retirada do cigarro (RECKZIEGEL, 2011)

2.2 Teor de Umidade

O fato dos produtos agrícolas serem compostos de substâncias sólidas e de certa quantidade de água retida sob várias formas, dá origem ao conceito de umidade. Nessa perspectiva, nas operações agrícolas considera-se que grãos são constituídos basicamente de matéria seca e água. Assim, o teor de umidade é a quantidade relativa de matéria líquida que está presente na estrutura celular (SILVA; AFONSO; FILHO, 2000).

A qualidade no armazenamento está diretamente associada ao teor de umidade dos produtos agrícolas. Assim a umidade das sementes oleaginosas é um dos principais

parâmetros para se controlar a ação biológica e alterações químicas e físicas ocorridas no período de pós-colheita (GONELI et al., 2007). O teor de umidade ideal para a conservação da noz pecã é entorno de 3,5 a 4,0% (SHAHIDI; MIRALIAKBARI, 2005; ERICKSON; SANTERRE; MALINGRE, 1994).

O conteúdo de água é normalmente determinado pelo método da estufa, onde as amostras são pesadas em balança de precisão e colocadas em estufa a uma temperatura ideal até obter a massa constante. A quantificação do teor de umidade, geralmente é expressa em porcentagem. Existem dois modos de expressar a umidade presente num produto: Base Úmida (b.u.) e Base Seca (b.s.).

As Equação 2.1 e Equação 2.2 são utilizadas para determinar a porcentagem em base úmida (%b.u.) e em base seca(%b.s.) respectivamente.

$$U(\%b.u.) = \frac{\text{massa inicial} - \text{massa final}}{\text{massa inicial}} * 100 \quad (2.1)$$

$$U(\%b.s.) = \frac{\text{massa inicial} - \text{massa final}}{\text{massa final}} * 100 \quad (2.2)$$

O período de permanência na estufa para atingir o estado “seco” varia com as características de cada material. Para a maioria dos grãos, são necessárias 24 horas, já as hortaliças necessitam apenas 6 horas de permanência na estufa (COLESTINO, 2010).

Bart-Plange et al. (2012) afirmam que todas as propriedades de engenharia estudadas para a castanha de caju são dependentes do teor de umidade.

Silva et al. (1998) expõe a influência do teor de umidade sobre a eficiência de um descascador de amendoim.

Oloso e Clarke (1993) observaram durante os estudos de compressão em castanha de caju, que a deformação e a energia absorvida pelo fruto aumentaram com o teor de umidade, já a força de ruptura apresentou um decréscimo.

2.3 Decorticadores: Princípios e Rendimentos

Segundo a literatura as decorticadoras de frutos oleaginosos possuem diferentes princípios de funcionamento e apresentam rendimentos diferentes. A classificação destes princípios é apresentada na Tabela 1:

O rendimento de uma decorticatora é avaliado pela qualidade de extração do endosperma, ou seja, quanto mais integra a amêndoa chegar ao final do processo, maior é o rendimento da máquina. Liang (1977), concluiu que no processo de ruptura da noz macadâmia, é onde ocorre grande parte das perdas na obtenção de amêndoas inteiras.

Tabela 1 – Classificação dos decortecedores

	Grau de mecanização	Força	Direcionamento da força
Decortecedor	manual	impacto	direcionada
	semimecanizada	compressão	aleatória
	mecanizada	tração	

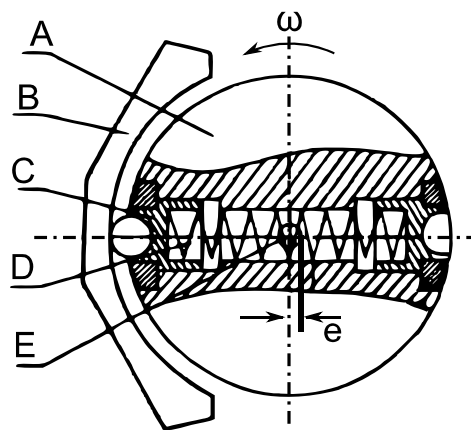
Na tentativa de aumentar o rendimento das decortecedoras, principalmente de noz macadâmia e castanha de caju, vários trabalhos sugerem diferentes mecanismos e rendimentos.

No processo de descasque manual da castanha de caju, os frutos são apoiados em uma placa plana e partidos com um martelo. O tempo médio de descasque é de 10 castanhas por minuto. Já o rendimento pode chegar a 90% de amêndoas inteiras (RUSSEL, 1979).

Koyuncu, Ekinici e Savran (2004) relatam que as nozes (variedade Yalova-3) solicitadas axialmente resultam numa qualidade superior de extração do endosperma.

Sarig, Grosz e Rasis (1980) expõem que os experimentos com noz macadâmia utilizando mecanismo de compressão a uma taxa de deformação constante (Figura 3), mostraram que em média 75% das amêndoas foram extraídas inteiras ou pela metade.

Figura 3 – Quebrador de noz macadâmia - (A) Cilindro, (B) Placa estacionária, (C) Pistão, (D) Mola, (E) Ar comprimido e (e) Deformação máxima.

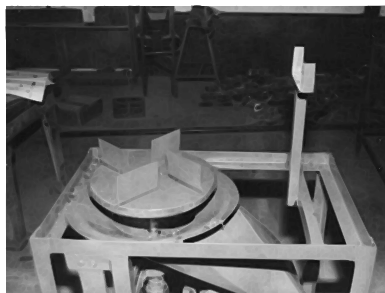


Fonte: Sarig, Grosz e Rasis (1980, p. 370)

Oluwole, Aviara e Haque (2004) utilizando o princípio de impacto aleatório gerado pela força centrífuga através de um disco rotativo, descreveu que 100% das nozes de Karitê ensaiadas sofreram a ruptura, sendo que o equipamento (Figura 4) apresentou 97% de eficiência na separação entre a amêndoa e a casca.

Silva et al. (1998) apresentou um descascador de amendoim semimecanizado (Figura 5), com o qual obteve rendimento de 94% e uma diminuição no custo de operação

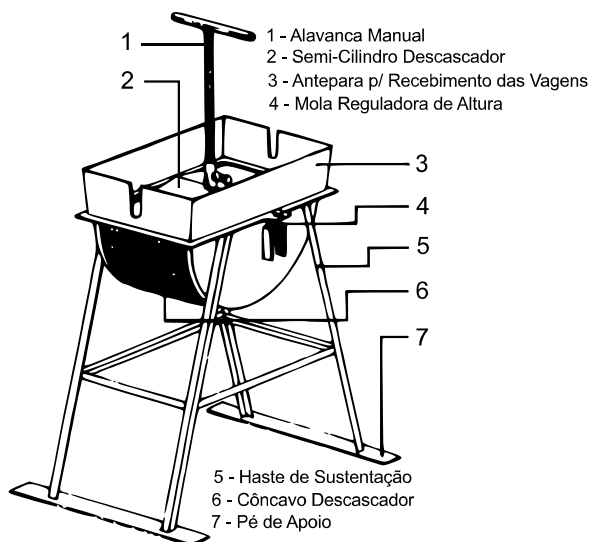
Figura 4 – Quebrador de noz karitê.



Fonte: Oluwole, Aviara e Haque (2004, p. 119)

de 83%, comparado ao processo puramente manual.

Figura 5 – Descascador de amendoim.



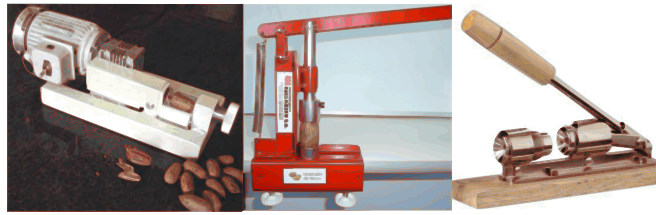
Fonte: Silva et al. (1998, p. 81)

É muito comum encontrarmos equipamentos manuais para descascar noz pecã, no entanto é inviável sua aplicabilidade na indústria de beneficiamento, em função do baixo volume de descascamento. A literatura para projeto de decortecedores de noz pecã ainda é muito escassa, no entanto a classificação segue as demais oleaginosas. A Figura 6, sugere alguns tipos encontrados no mercado brasileiro.

Os equipamentos para este tipo de cultivo apresentam normalmente seu funcionamento por compressão direcionada e descasque unitário. Sendo assim, o volume da produção e rendimento do equipamento depende da destreza do operador.

Para Solane, Bueno e Tier (2014) a prioridade no projeto de descascadoras de nozes, é a elaboração de mecanismos que apresentem alto desempenho e confiabilidade atendendo as premissas básicas de quebrar as nozes e liberar as amêndoas da casca, além

Figura 6 – Quebrador de noz pecã.



Fonte: Adaptado e disponível em <<https://www.google.com.br/search?q=Descascadores+de+Noz+Pecã>> Acesso 05 de julho de 2015

disso o equipamento deve ser automatizado e possuir autonomia com baixo custo de operação.

2.4 Propriedade dos Materiais

O conhecimento das propriedades dos materiais é parte integrante do projeto de máquinas e seleção dos materiais, pois possibilita a aplicação correta, visando o melhor desempenho. A resistência, rigidez e custo são, tipicamente, fatores determinantes a serem considerados na seleção de um material (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

Diversos são os ensaios para caracterização de um material, cada um com sua peculiaridade e vantagem, mas o teste mais comumente utilizado é o ensaio de tração onde os resultados são expressos por meio de um diagrama de tensão-deformação (NORTON, 2004).

A aplicação de carga de compressão no eixo axial de um corpo de prova é o que caracteriza os ensaios de compressão. Para materiais de baixa ductilidade o ensaio de compressão permite quantificar o comportamento mecânico. Normalmente o ensaio é executado em máquina universal, que possibilita tanto a realização de ensaios de tração como de compressão. Para ensaios de compressão deve haver adaptação de duas placas lisas perpendiculares ao eixo de aplicação da carga. As variáveis que exercem influência sobre o resultado são: temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho do grão, porcentagem de impurezas, condições ambientais e teor de umidade no caso de materiais orgânicos (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Os parâmetros medidos são força e deslocamento, mas os representados no diagrama são tensão e deformação específica. A tensão (σ) para um corpo de prova sob compressão é calculada pela Equação 2.3.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.3)$$

onde F é a força aplicada em determinado instante e A_0 é a área inicial da seção transversal

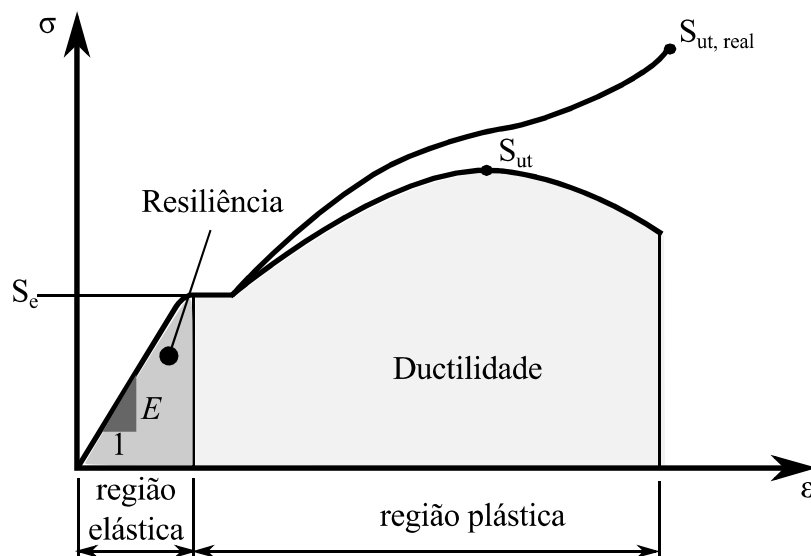
do corpo de prova. Já a deformação específica (ϵ) representa a mudança do comprimento em relação ao comprimento inicial e é obtida através da Equação 2.4 (NORTON, 2004).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.4)$$

onde: L_0 é o comprimento inicial; L é o comprimento sob a ação da força F . Como a equação é dada pela razão entre comprimentos (mm), a deformação é expressa em mm/mm .

Expressando graficamente, pode-se observar o chamado diagrama tensão *versus* deformação (Figura 7). Neste diagrama, ficam claras as regiões que os materiais apresentam: região elástica e plástica. Na primeira, é evidente a proporcionalidade entre tensão e deformação e a energia armazenada nesta fase é denominada resiliência. Na segunda fase, toda a deformação é permanente, o que caracteriza o escoamento em materiais dúcteis, já para os materiais frágeis o diagrama não apresenta ponto de escoamento. O total de energia armazenado durante as duas fases é denominado tenacidade (CUNHA, 2005).

Figura 7 – Diagrama tensão *versus* deformação.



O comportamento mecânico de um material é dependente da sua resposta a solicitação à que é submetido. À propriedade que relaciona linearmente a deformação elástica com a tensão atuante é atribuído o nome de módulo de elasticidade (E) ou módulo de Young (Y) cuja relação pode ser interpretada como a resistência à deformação elástica, ou seja, quanto maior o módulo mais rígido é o material. Essa proporção é expressa pela Equação 2.5 e é denominada lei de Hooke (CALLISTER; SOARES, 2008).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.5)$$

A lei de Hooke mostrada anteriormente estabelece a relação somente para o estado uniaxial de tensão. A equação que relaciona os casos onde se tem um estado complexo de tensões em um material isotrópico é denominada Lei de Hooke generalizada e é expressa pela Equação 2.6, 2.7 e 2.8 (BEER; JOHNSTON, 1982).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}[-\nu\sigma_x + \sigma_y - \nu\sigma_z] \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[-\nu\sigma_x - \nu\sigma_y + \sigma_z] \quad (2.8)$$

Para materiais homogêneos e isotrópicos, suas propriedades mecânicas são iguais independente da direção ou posição. Tem-se daí um coeficiente que interfere no comportamento da deformação, chamado coeficiente de Poisson (ν), expresso por:

$$\nu = \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (2.9)$$

onde: ϵ_{lat} é a deformação lateral; ϵ_{long} é a deformação longitudinal, ou seja, no sentido de aplicação da força (BEER; JOHNSTON, 1982).

A relação entre o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson (Equação 2.10), fornece o módulo de elasticidade transversal do material, caracterizado quando submetido a torção.

$$G = \frac{E}{2 \times (1 - \nu)} \quad (2.10)$$

2.5 Fundamentos de Projeto de Máquinas

O desígnio do projeto de máquinas é definir e estudar os movimentos de componentes, adequando os materiais e processos produtivos, de modo a dar forma aos elementos de máquinas, que por sua vez devem atender as solicitações estáticas e dinâmicas. O equipamento deve ser projetado de forma a prevenir falhas, para tal, uma análise de tensão e deformação deve ser feita para cada peça (NORTON, 2004).

Ao se examinarem alguns pontos de projeto de máquinas, verifica-se que para o dimensionamento correto e adequado deve-se identificar primeiro o tipo de solicitação a que o componente está sujeito, em seguida determinar a tensão atuante, cuja resposta deve satisfazer os limites de resistência do material (CUNHA, 2005).

Existem diferentes tipos de resistência dos materiais, porém é fundamental entender quais são as mais importantes, levando em consideração a aplicação do projeto. O limite de resistência a tração S_{ut} indica a máxima tensão que o material pode suportar antes da ruptura e é bastante empregado nos caso em que se utiliza materiais frágeis. Em materiais dúcteis, usa-se o limite de escoamento S_y , pois tensão além indica a deformação permanente do material. Outra característica importante é a resistência mecânica ao cisalhamento S_{us} e limite de escoamento também em função de tensões cisalhantes S_{ys} (CUNHA, 2005) (NORTON, 2004).

No desenvolvimento de projetos é muito comum trabalhar-se com tensões admissíveis σ_{ad} , cujo valor é calculado a partir da tensão de escoamento (para materiais dúcteis) ou a partir da tensão de ruptura, no caso de materiais frágeis (CUNHA, 2005) (BUDYNAS; NISBETT, 2011b). As expressões matemáticas para as tensões admissíveis axiais são dadas por:

$$\sigma_{ad} = \frac{S_y}{CS}, \quad (2.11)$$

$$\sigma_{ad} = \frac{S_{ut}}{CS} \quad (2.12)$$

Analogamente para as tensões tangenciais tem-se a Equação 2.13 e Equação 2.14.

$$\tau_{ad} = \frac{S_y}{CS} \quad (2.13)$$

$$\tau_{ad} = \frac{S_{us}}{CS} \quad (2.14)$$

A tensão tangencial (τ) relaciona-se matematicamente com a tensão normal (σ) de acordo com a Equação 2.15

$$\tau = (0,6 \text{ a } 0,8)\sigma \quad (2.15)$$

Diversos são os fatores que influenciam a determinação do coeficiente de segurança (CS). Em ultima análise a seleção é feita com base na experiência do engenheiro ou através de normas específicas, no entanto os eventos descritos abaixo devem ser considerados na escolha do coeficiente (NORTON, 2004).

- Grau de incerteza com relação ao carregamento;
- Grau de incerteza com relação à resistência do material;
- Consequência da falha;

- O custo de se utilizar um alto coeficiente de segurança.

Segundo Norton (2004) o CS pode variar de 1,25 para materiais extremamente confiáveis a 4 onde tem-se materiais não testados sob condições médias de ambiente, cargas e de solicitações.

2.5.1 Teoria de Falhas Estáticas

Durante o desenvolvimento de projetos mecânicos é muito comum encontrar esforços combinados agindo sobre os diversos componentes. Assim a tensão atuante na peça será a resultante de um estado múltiplo de tensões, e seu valor dependerá do critério de falha adotado.

Para materiais que apresentam fraturas frágeis as teorias mais indicadas são: Tensão normal Máxima (Rankine) e Mohr modificada. Já as teorias de falha de von Mises e da Tensão cisalhante máxima são recomendadas para materiais com comportamento dúctil.

Também chamada de teoria da energia de distorção máxima, o critério de von Mises baseia-se no fato de que qualquer material elástico sujeito a um estado de tensão sofre uma pequena variação de forma e (ou) volume. Sabe-se que a energia necessária para provocar essas distorções são armazenadas na forma de energia elástica. Assim o componente falhará quando a energia de deformação de distorção exceder o limite suportado pelo material. Portanto a tensão equivalente σ_{eq} é dada pela Equação 2.16 (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2} \quad (2.16)$$

Como σ_x , σ_y e τ_{xy} são mais fáceis de serem determinadas. Uma forma análoga da tensão equivalente é apresentada na Equação 2.17

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.17)$$

Quando obtida a tensão equivalente, ela é confrontada com a resistência ao escoamento fornecida pelo ensaio de tração padronizado. Caso $\sigma_e > S_y$ a falha do material pode ser prevista.

2.5.2 Fadiga

O fenômeno comportamental de peças que ao serem solicitadas ciclicamente rompiam-se num valor de carga mais baixo que o limite suportado estáticamente, foi denominado *fadiga*. Dois regimes de carregamento são considerados: fadiga de baixo ciclo, cujo número

total de oscilações de tensão durante a vida da peça é menor do que aproximadamente 1000, e fadiga de alto ciclo, a qual considera vida infinita (10^7 ciclos) do componente (CUNHA, 2005) (NORTON, 2004).

A fadiga é iniciada pela aparição de uma pequena fratura em consequência das solicitações repetidas ou da fabricação. A progressão da fratura é induzida por meio de tensões de tração até que atinja um tamanho tal, ocorrendo a ruptura por sobrecarga (CUNHA, 2005).

O limite de fadiga S_e pode ser determinado por meio de um ensaio de flexão alternado padronizado. Para utilização no projeto de máquinas o limite de fadiga recebe a aplicação de alguns fatores de correção, cuja finalidade é considerar alguns pontos como: acabamento superficial (k_a); tamanho (k_b); carregamento (k_c); temperatura (k_d); confiabilidade (k_e) e efeitos diversos (k_f). Assim, o limite de fadiga corrigido é dado pela Equação 2.18 (CUNHA, 2005) (BUDYNAS; NISBETT, 2011b).

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (2.18)$$

O componente real pode ainda ter uma concentração de tensão geométrica (K_f e K_{fs}) por meio da qual o comportamento à fadiga depende do fator de concentração de tensão estática k_t e k_{ts} e da sensibilidade da peça ao entalhe.

Analogamente ao carregamento multiaxial, a combinação de tensões flutuantes, tais como torção e flexão, podem ser combinadas por meio da energia de distorção permitindo assim a aplicação e determinação do CS através dos critérios de falhas por fadiga.

Dentre os 5 critérios destacados pela literatura, a linha de Goordman modificada é a mais utilizada por projetistas conservadores e pelo fato de ser facilmente traçada - a qualquer tempo, para qualquer problema. Já a parábola de Gerber é o critério menos conservador e é um bom ajuste aos dados experimentais, o que torna viável para análise de falhas de peças (NORTON, 2004) (BUDYNAS; NISBETT, 2011b). A curva de falha de Gerber é definida por:

$$\sigma_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma_m^2}{S_{ut}^2} \right) \quad (2.19)$$

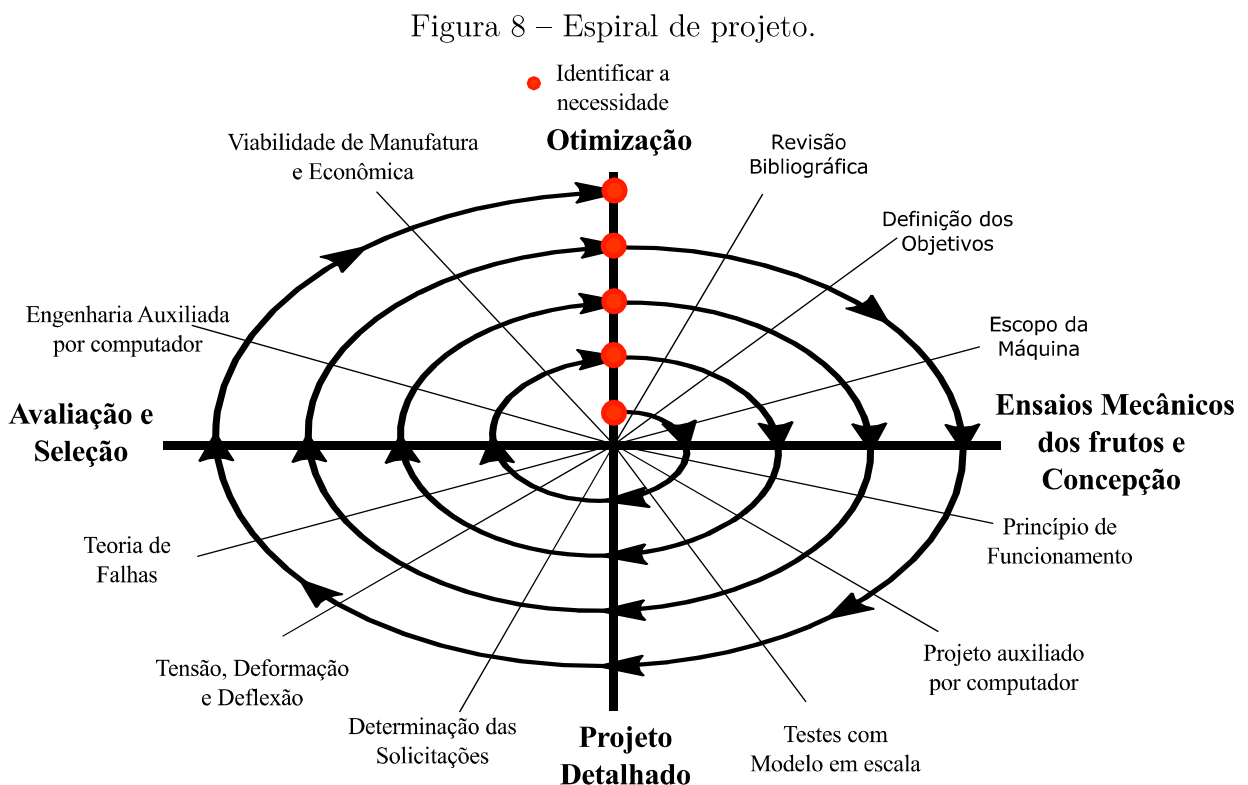
onde: σ_a é a componente de amplitude de tensão; σ_m é a tensão média. Consequentemente o coeficiente de segurança em fadiga (N_f), segundo o critério de Gerber é:

$$\frac{N_f \sigma_a}{S_e} + \left(\frac{N_f \sigma_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1 \quad (2.20)$$

Os dados de resistência à fadiga são, na sua maioria, particulares para cada material e aplicação. Assim, Norton (2004) afirma que a melhor maneira de adquirir informações de casos particulares, é promovendo ensaios com montagens reais ou modelos em escala dos dispositivos.

3 Metodologia

O presente trabalho está baseado em sobreposições metodológicas, ou seja, diversas ferramentas essenciais com caráter específicos para cada fase do desenvolvimento do estudo. A Figura 8 ilustra a espiral de projeto que consiste nas etapas necessárias para o desdobramento do trabalho em questão.



É importante ressaltar que a quantidade de espiras não é fixa, enquanto houver a necessidade de otimização, uma nova espira deve ser implementada e conseqüentemente as atividades e tarefas pertinentes devem ser cumpridas durante o caminho. A seguir é feita a descrição detalhada de cada fase da espiral mostrada anteriormente.

(a) Identificar a Necessidade

O projeto se inicia com a fase de identificação da necessidade de aumentar o nível de automação no setor de beneficiamento da noz pecã, cujo cultivo no Brasil vem aumentando, como já foi abordado na seção 1.1 deste trabalho.

Neste contexto o estudo caminha para atividade de revisão bibliográfica, onde os objetivos foram identificar os aspectos botânicos associados às nogueiras-pecã, bem como investigar os princípios e rendimentos dos equipamentos utilizados no processo

de descasque de frutos similares à noz. Também foram abordados itens como: teor de umidade, propriedade dos materiais e fundamentos de projeto de máquinas.

Posteriormente a definição dos objetivos e as funções da decorticadora foram determinadas de acordo com a proposta do trabalho e necessidade da indústria.

(b) Ensaios Mecânicos dos Frutos e Concepção

Nesta fase buscou-se criar alternativas que atendessem as funções e objetivos determinados anteriormente. Inicialmente procurou-se definir o princípio de funcionamento, tipo de acionamento e características geométricas de cada concepção. Posteriormente foram feitos vários croquis a fim de exibir proporções geométricas realistas fornecendo subsídios para a construção de um modelo computacional. A modelagem 3D permitiu a obtenção prévia das propriedades de inércia das peças, assim como a verificar possíveis interferências entre os mecanismos.

A fim de fornecer subsídios à próxima etapa do projeto, o comportamento mecânico da noz pecã foi determinado sob diferentes condições. O primeiro ensaio realizado foi o de compressão entre placas paralelas, cujo objetivo era investigar o comportamento do fruto sob ação de uma força axial.

Para o segundo ensaio, o comportamento mecânico das amêndoas, bem como do endocarpo foram determinados por meio de ensaios de compressão e flexão sob 3 pontos. Ambos os ensaios foram realizados utilizando o princípio de funcionamento das concepções geradas.

Os dados obtidos foram submetidos a um experimento fatorial do tipo 2^2 e posteriormente utilizou-se a ANOVA para testar a significância dos efeitos. Também foi realizada a análise de regressão linear para definir o coeficiente de determinação entre a força e as propriedades geométricas da noz. As análises estatísticas foram realizadas de forma analítica e por meio de softwares como MatLab e Excel.

(c) Projeto Detalhado

Nesta etapa a magnitude das forças dinâmicas e estáticas foi determinada, bem como os esforços provenientes das solicitações vibratórias e seus efeitos na estrutura, obtendo assim a configuração geral do sistema mecânico

Posteriormente o estado tensional de todos os componentes da máquina foram determinados, analogamente as deformações e deslocamentos, a fim de obter-se uma estrutura estável e extremamente rígida.

Com intuito de dar confiabilidade ao projeto, sem superdimensionar os componentes, a teoria das falhas estáticas e por fadiga, foram utilizadas como ferramentas a fim de prever a combinação de cargas não analisadas anteriormente. Os coeficientes de segurança foram estabelecidos numa faixa de 1,5 a 4, quando possível. Assim os

componentes dimensionados com um grau maior de incerteza receberam um maior coeficiente de segurança.

Para a seleção dos materiais empregados em cada componente, os fatores resistência e rigidez foram tradicionalmente considerados, no entanto outros fatores como: custo, disponibilidade e usinabilidade também foram levados em consideração. Alguns componentes foram especificados de acordo com as normas que regem as indústrias alimentícias.

(d) Avaliação e Seleção

Por meio de sistema *Computer Aided Engineering* (CAE) todos os componentes foram individualmente avaliados a fim de checar os resultados obtidos durante o projeto detalhado. Componentes cujas geometrias eram complexas, foram dimensionados essencialmente por elementos finitos. Uma análise global da máquina também foi realizada. A simulação contou com as características reais de cada componente, ou seja, o material e a geometria foram fielmente reproduzidas no software.

Outra atividade realizada nesta etapa foi em termos de manufatura, onde cada componente foi avaliado a nível de processo produtivo. Basicamente o seguinte questionamento foi realizado: Os atuais métodos produtivos são capazes de fabricar os componentes dentro das especificações de projeto? Da mesma forma a viabilidade econômica em termos de fabricação do equipamento foi avaliada.

Para a finalização da etapa, a concepção selecionada teve um modelo em escala fabricado, para avaliação de rendimento do equipamento e identificação de possíveis falhas ocasionadas por fatores externos, não previstos durante o desenvolvimento do projeto.

(e) Otimização

Por fim, a etapa de otimização só é necessária se durante a avaliação e seleção for identificadas necessidades não contempladas até o momento. Havendo algum ponto identificado, como já mencionado anteriormente, uma nova espira de projeto deve ser criada, se não o memorial do projeto já pode ser realizado.

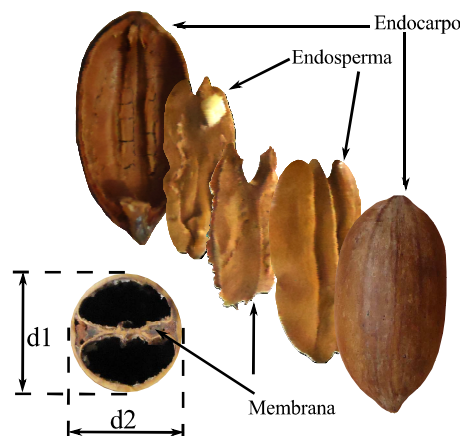
4 Desenvolvimento e Resultados

A seguir será apresentado o desenvolvimento da caracterização das nozes pecã por meio da determinação da resistência mecânica do fruto "*in natura*", perfil de espessura e módulo de Young do endocarpo, bem como a resistência à flexão, módulo de Young e coeficiente de Poisson das amêndoas. Os resultados experimentais, analíticos e os provenientes das simulação por elementos finitos, serão confrontados a fim de estabelecermos um paralelo entre eles.

4.1 Caracterização da Noz Pecã

Para o desenvolvimento do decorticação é de fato essencial que se conheça as características do material a ser processado principalmente suas propriedades mecânicas, pois é a partir dessas características que se determinam as solicitações no equipamento. A estrutura básica do fruto é mostrada na Figura 9.

Figura 9 – Estrutura do fruto.

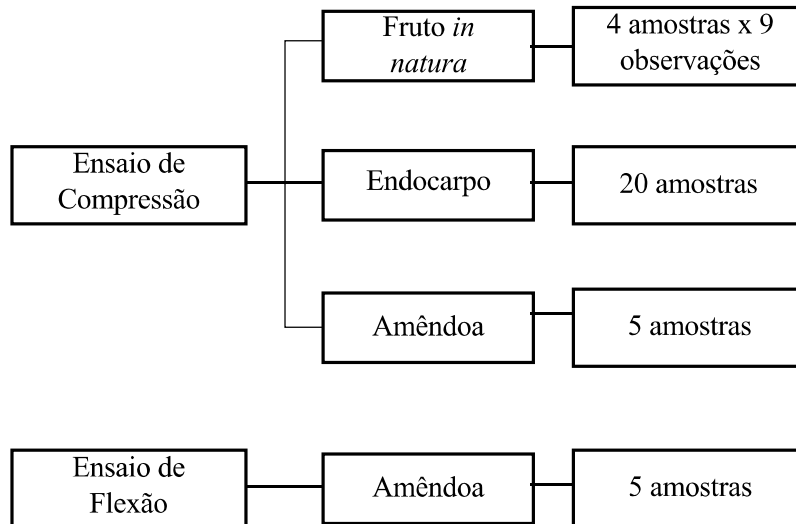


Diferente da grande maioria das oleaginosas, a noz pecã tem seu endosperma subdividido por uma membrana ligada a superfície interna do endocarpo, a amêndoa é interligada apenas em uma de suas extremidades. O fato do fruto possuir uma geometria aproximadamente elíptica, uma membrana intermediária e extremidades bem espessas, torna o processo de beneficiamento bem complexo, dificultando principalmente a decorticação.

Em plantios de noqueira-pecã, localizados em Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, no mês de maio de 2015 foram adquiridos 3 kg de frutos do cultivar existente. Os frutos foram levados para o Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS. Após, foram colocados em bandejas e mantidos a temperatura

ambiente. Uma semana depois, foi iniciada a amostragem aleatoriamente para realização dos ensaios. A distribuição das amostras para os ensaios, pode ser vista na Figura 10.

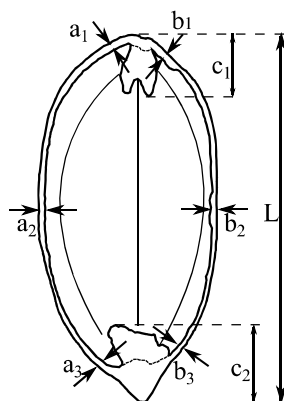
Figura 10 – Fluxograma de distribuição das amostras.



Para a determinação do perfil de espessura do endocarpo, foram utilizadas 5 amostras. Filho et al. (2015) sugere o dimensionamento amostral para avaliação do diâmetro e massa do fruto para diversos níveis de significância, isso nos fornece um subsídio para determinar o cultivar de onde vieram as amostras.

A Figura 11 mostra um corte longitudinal paralelo à membrana, cuja ideia principal é apresentar o perfil e as principais dimensões referentes ao endocarpo. Os cortes longitudinais foram feitos utilizando uma micro retífica, tomando-se os devidos cuidados para que fossem estabelecidos bem no plano médio do fruto.

Figura 11 – Perfil de espessura do endocarpo.



Os pontos a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 e b_3 , foram os locais onde realizou-se as medições da espessura. A medição foi realizada no sentido normal à tangente da superfície na casca com auxílio de um paquímetro digital com resolução de $0,01 \text{ mm}$. As variáveis c_1 e c_2 , representam os comprimentos das extremidades do endocarpo até o início da amêndoa.

Tabela 2 – Características geométricas (mm).

Amostras	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	c_1	c_2
1	1,21	1,21	0,96	1,27	1,05	1,15	6,14	3,67
2	1,09	1,28	0,89	1,27	0,90	1,12	5,06	4,81
3	0,97	1,26	1,00	0,77	0,71	0,81	5,15	4,04
4	1,17	1,22	1,12	1,00	1,09	0,75	5,32	5,01
5	1,24	1,12	0,93	0,71	1,22	0,69	4,65	4,14
Média	1,14	1,22	0,98	1,00	0,99	0,90	5,26	4,33
Desvio Padrão	0,11	0,06	0,09	0,27	0,20	0,22	0,55	0,56

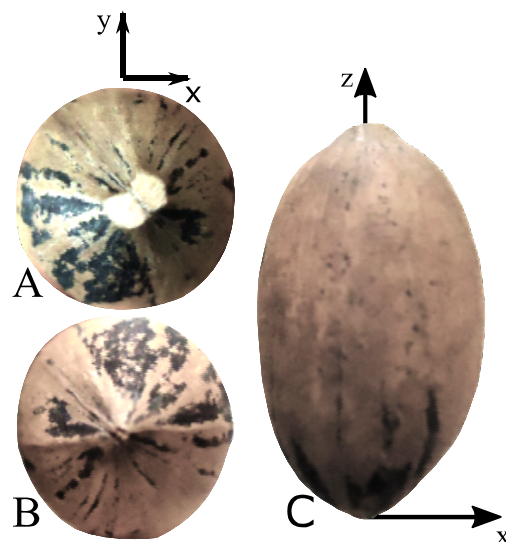
A Tabela 2 apresenta os valores referentes as dimensões mencionadas anteriormente e apresentadas na Figura 11, assim podemos notar que o endocarpo apresenta uma espessura que varia entre de $0,90\text{ mm}$ a $1,22\text{ mm}$ para as amostras ensaiadas.

O fato das dimensões c_1 e c_2 serem relativamente maiores as demais, caracterizam esses pontos como sendo pontos críticos para o processo de descasque, pois são extremamente resistentes. Em virtude disso uma operação de corte ou lixamento das extremidades mostra-se bastante pertinente de forma a facilitar o descasque da amêndoa, visto que também durante o descasque manual estes são pontos problemáticos. No entanto a viabilidade de se introduzir essa etapa deve ser avaliada com cautela.

4.1.1 Fruto *in natura*.

Todos os frutos separados para o ensaio tiveram suas extremidades submetidas ao processo de lixamento como mostrado na Figura 12-A para a remoção de possíveis pontas agudas, possibilitando o posicionamento para realização da compressão axial

Figura 12 – Padronização para ensaio de compressão axial. (A) Extremidade lixada. (B) Extremidade intacta. (C) Eixo de compressão.



Posteriormente, metade das amostras passaram por um processo de secagem, o

qual se utilizou o método da estufa. A estufa utilizada é fabricada pela empresa SPLabor, modelo *SP – 104/12*, com capacidade de 12 *litros* e controle digital de temperatura. A função vácuo da estufa não foi acionada durante a secagem dos frutos.

Os frutos permaneceram na estufa a uma temperatura de $60 \pm 3^\circ \text{Celsius}$, até a massa se tornar constante. A medição da massa foi realizada a cada 24 *horas*, através de uma balança de precisão (0,1 *g*), modelo *Jy50001*, fabricada pela empresa Bioprecisa.

Para realização dos ensaios de compressão utilizou-se uma máquina universal de ensaios do fabricante Shimadzu, modelo *AutographAGS – X*, com capacidade de carga de 5 *kN*.

Figura 13 – Shimadzu.



A Figura 13 mostra a máquina equipada com placas paralelas, pronta para a realização dos ensaios de compressão. Para prática do ensaio, as amostras foram divididas de forma a garantir todas as combinações possíveis. A Tabela 3 mostra a ordem de execução dos testes.

Tabela 3 – Combinações para ensaios.

Velocidade de avanço (<i>mm/min</i>)	Fruto	
	Seco	<i>in natura</i>
500	3º ensaio	2º ensaio
1000	4º ensaio	5º ensaio

Após a divisão, as características geométricas de cada noz foram obtidas com o auxílio de um paquímetro digital da marca DIGIMESS com resolução de 0,01 *mm*. Inicialmente a medição do comprimento (*L*) foi realizada no eixo *z* das nozes. Posteriormente o diâmetro (*d*) foi mensurado em duas direções defasadas em 90° , ambas as medidas foram tomadas a partir do ponto central do eixo *z*. A Figura 12 ilustra como os eixos cartesianos foram estabelecidos em relação ao fruto.

De forma a garantir a qualidade do ensaio, as nozes escolhidas estavam isentas de trincas ou fissuras no endocarpo e foram colocadas perpendicularmente entre as placas de

compressão, ou seja, o eixo z do fruto coincidia com o eixo de deslocamento da máquina. Após o ensaio uma inspeção visual nos frutos foi realizada de modo a verificar a integridade física da amêndoa.

A Tabela 4 apresenta os principais aspectos geométricos dos frutos utilizados durante os experimentos, bem como as principais informações referentes ao ensaio de compressão axial. Os resultados do ensaio de compressão de cada amostra podem ser vistos na ??(página ??).

Tabela 4 – Algumas Propriedades Físicas da Noz Pecã.

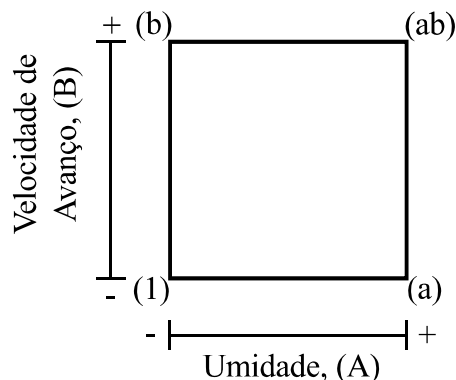
	L (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_m (mm)	Força (N)	Deformação
Média	36,41	20,82	19,55	20,17	659,51	0,04
Máximo	42,72	22,64	21,57	22,08	953,90	0,05
Mínimo	33,77	19,53	18,19	18,92	287,80	0,02
Desvio Padrão	1,87	0,74	0,85	0,76	153,90	0,01

A partir das características, diâmetro médio (d_m) e comprimento (L), a literatura sugere que as nozes utilizadas para os experimentos, são semelhantes às encontradas nos cultivares Moneymaker e Importada.

Para análise e avaliação dos dados, utilizou-se um experimento fatorial do tipo 2^2 e posteriormente aplicou-se ANOVA para testar a significação dos efeitos. Também foi realizada a análise de regressão linear para definir o coeficiente de determinação entre a força e as propriedades geométricas da noz. Foi considerado ruptura do endocarpo, o ápice do primeiro grande pico.

O delineamento do experimento fatorial é representado pela Figura 14 onde cada vértice corresponde a uma combinação. O Fator A está subdividido em dois níveis sendo eles "seco (-)" e "*in natural* (+)", da mesma forma o fator B é expresso por $500 \frac{mm}{min}$ (-) e $1000 \frac{mm}{min}$ (+).

Figura 14 – Combinação dos fatores do experimento.



Os efeitos de A, B e interação AB, são calculados de acordo com as Equação 4.1, Equação 4.2 e Equação 4.3 respectivamente. O valores encontrados tratam dos efeitos

sobre as variáveis de saída, ou seja, força e deformação (MONTGOMERY, 1984).

$$A = \bar{y}_A^+ - \bar{y}_A^- = \frac{ab + a}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} = \frac{ab + a - b - (1)}{2n} \quad (4.1)$$

$$A = \bar{y}_B^+ - \bar{y}_B^- = \frac{ab + b}{2n} - \frac{a - (1)}{2n} = \frac{ab + b - a - (1)}{2n} \quad (4.2)$$

$$AB = \frac{ab + (1)}{2n} - \frac{a + b}{2n} = \frac{ab + (1) - a - b}{2n} \quad (4.3)$$

A Tabela 5 é denominada de quadro da ANOVA do tipo 2^2 , ela foi utilizada para determinar a significância dos efeitos. A razão F indica o tamanho da diferença entre as amostras, em função do tamanho dentro das amostras. Os valores foram analisados a 95% de confiabilidade.

Tabela 5 – Quadro ANOVA para experimentos 2^2 , n réplicas.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F
B	S_B	$B - 1$	S_B^2	$\frac{S_B^2}{S_R^2}$
A	S_A	$A - 1$	S_A^2	$\frac{S_A^2}{S_R^2}$
<i>Interação</i> AB	S_{AB}	$(a - 1)(a - 1)$	S_{AB}^2	$\frac{S_{AB}^2}{S_R^2}$
<i>Resíduo</i>	S_R	$2^k(n - 1)$	S_R^2	
<i>Total</i>	S_D	$n2^k - 1$		

Fonte: Adaptado de Carpinetti (2010, p.176)

(a) Efeitos da umidade (A) e da velocidade de avanço (B) sobre a força de ruptura do endocarpo.

Para as combinações propostas, obtiveram-se os efeitos sobre a força de ruptura, que são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Efeitos do Experimento.

	Efeitos sobre a Deformação	Efeitos sobre a Força
A	0,0031	A -128,56
B	0,0026	B -13,68
AB	-0,0009	AB 15,96

Com respeito à força, o efeito A negativo indica que o aumento da mesma ocorre com a diminuição da umidade. Já os valores de B e AB são muito pequenos comparados à A, por isso foram negligenciados. A significância das variáveis umidade e velocidade de avanço sobre a força são apresentadas através da Tabela 7.

Tabela 7 – Quadro ANOVA para a significância dos efeitos sobre à força.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F	valor-p	F crítico
<i>B</i>	1685,1	1	1685,1	0,08	0,779	4,149
<i>A</i>	148751,6	1	148751,6	7,04	0,012	4,149
<i>AB</i>	2292,8	1	0,11	0,744	4,149	
<i>Resíduo</i>	676302,3	32	21134,45			
<i>Total</i>	829031,8	35				

Tabela 8 – Quadro ANOVA para a significância dos efeitos sobre à deformação

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F	valor-p	F crítico
<i>B</i>	$6,17E - 05$	1	$6,17E - 05$	1,19	0,284	4,149
<i>A</i>	$8,42E - 05$	1	$8,42E - 05$	1,62	0,213	4,149
<i>AB</i>	$6,72E - 06$	1	$6,72E - 06$	0,13	0,722	4,149
<i>Resíduo</i>	0,001665	32	$5,2E - 05$			
<i>Total</i>	0,001818	35				

Através da ANOVA os efeitos sobre a força foram testados, no entanto pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que apenas o fator A exerce influência sobre a variável força.

(b) Efeitos da Umidade e da velocidade de avanço sobre a deformação da noz.

Para a deformação (Tabela 6), o efeito A positivo, sugere que o aumento da umidade gera uma maior deformação. O efeito B, também positivo, indica que aumentando a velocidade de avanço aumenta-se também a deformação. Já o efeito de interação é relativamente pequeno aos demais e por isso foi desprezado.

Através da análise de variância, Tabela 8, nota-se que os fatores A e B têm significância sobre a deformação em um intervalo de confiança de 78 e 71% respectivamente.

(c) Aspectos Globais da Inspeção Visual.

Num âmbito global de influências, notou-se que a extração da amêndoa foi facilitada pelo aumento da velocidade de avanço e diminuição da umidade. Porém, quando se refere à qualidade, ou seja, coloração, integridade e sabor da amêndoa, o fator umidade foi mais relevante, pois as amêndoas secas perderam o tom natural de cor, passando para um tom mais forte de marrom, tornaram-se mais quebradiças, ou seja, frágeis.

Como o nível de consumo é função direta da qualidade associado ao produto, na concepção e projeto de decorticadoras, o fator de umidade dos frutos exercem um papel fundamental durante o processo de beneficiamento e pós-beneficiamento. Dessa forma os resultados apresentados fazem com que para projeto dos decorticadores

sejam adotados as maiores taxas de avanço possível. Já a umidade deve ser estabelecida de forma a não atingir a amêndoa, ou seja, é interessante que se consiga retirar umidade somente do endocarpo.

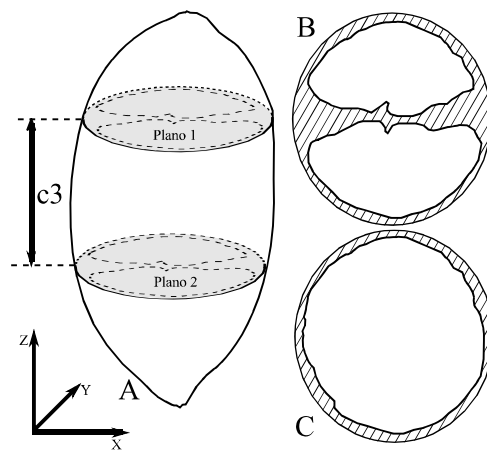
4.1.2 Endocarpo

1. Ensaio de compressão Axial

Com as características encontradas na seção 4.1 e os parâmetros velocidade de avanço e umidade estabelecidos no Item (c), um segundo ensaio de compressão foi realizado a fim de estabelecer a influência da membrana no comportamento mecânico do fruto, bem como determinar o módulo de Young do endocarpo.

A Figura 15-A ilustra os planos de corte, onde o comprimento c_3 foi determinado de modo a se obter um corpo de prova o mais cilíndrico possível. Para a realização dos ensaios foram preparadas 10 amostras *in natura*, ou seja, com um teor de umidade em torno de 7% b.u., sendo que 5 amostras tiveram a amêndoa retirada sem danificar a membrana (Figura 15-B) e as demais tiveram a membrana e a amêndoa retiradas, ficando apenas o endocarpo como representado na Figura 15-C.

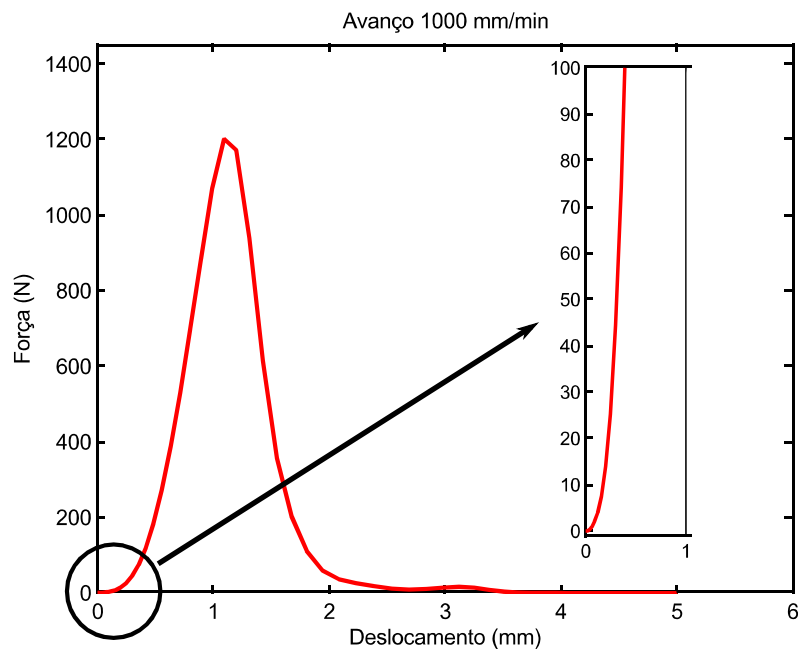
Figura 15 – (A) Planos de corte. (B) Corpo de prova com membrana. (C) Corpo de prova sem membrana.



Os cortes foram feitos utilizando uma micro retifica e posteriormente os corpos de prova tiveram as seções lixadas de modo a se obter uma superfície plana e perpendicular ao eixo (z) de revolução. A metodologia de execução dos ensaios foi semelhante a apresentada na subseção 4.1.1, apenas modificando os corpos de prova.

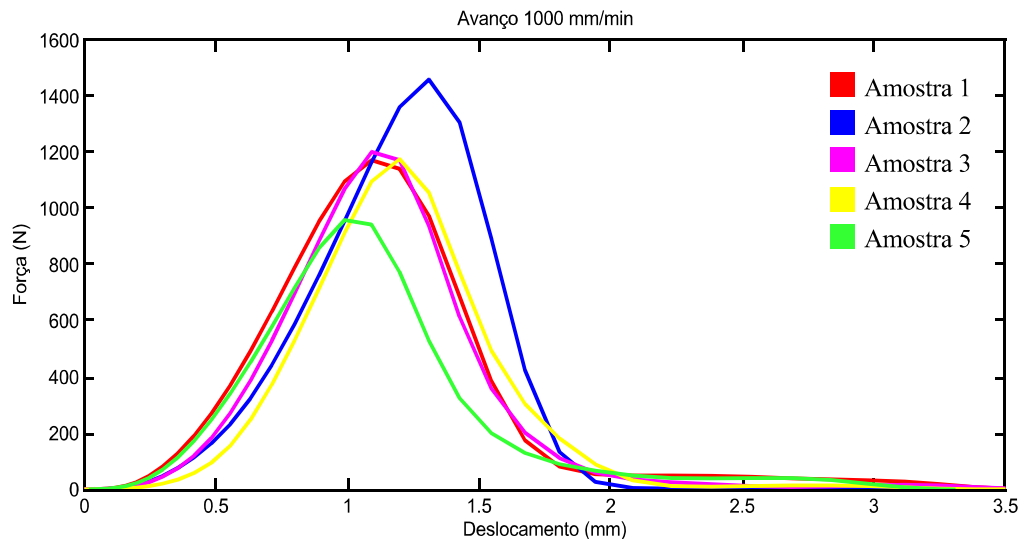
O comportamento comumente encontrado durante os ensaios está representado pela Figura 16, onde os primeiros instantes do gráfico são denominados região de acomodação e seu comportamento pode ser visto na ampliação feita no local. Essa região explica-se pelo fato das amostras serem irregulares e possuírem uma certa flexibilidade quando não solicitadas mecanicamente.

Figura 16 – Comportamento típico dos ensaios.



A Figura 17 apresenta os resultados dos ensaios de compressão das amostras com membrana, onde o maior pico está associado com força de ruptura do endocarpo e consequentemente com o deslocamento.

Figura 17 – Amostras com membrana.



A Tabela 9 apresenta as características de cada amostra ensaiada juntamente com a área de compressão e tensão de compressão associada aos ensaios. A área (A) foi obtida através Equação 4.4, onde d_m é o diâmetro médio da amostra e e é a espessura média do endocarpo determinando na seção 4.1 (página 47).

$$A = \Pi d_m e \quad (4.4)$$

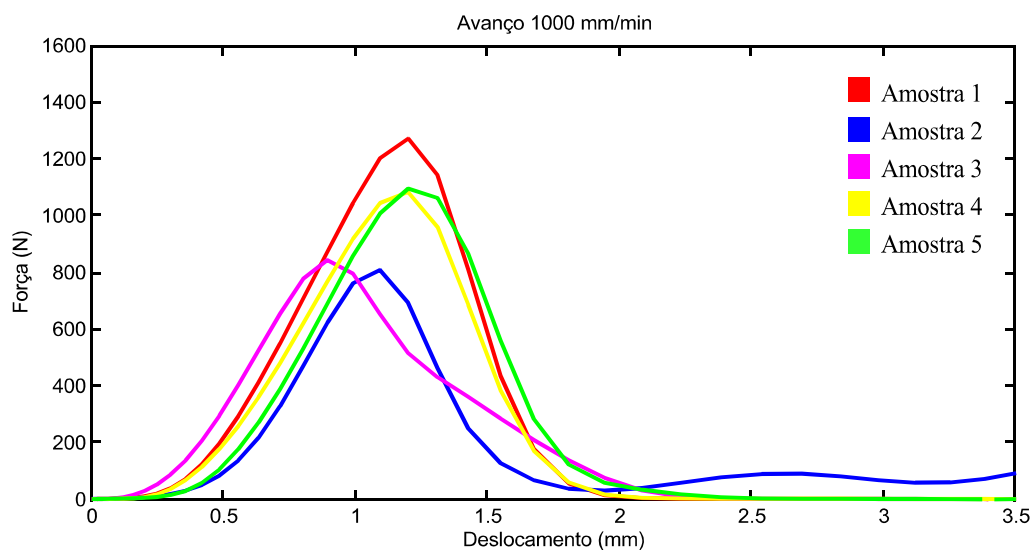
Tabela 9 – Amostras com membrana

Amostras	c_3	d_2	d_1	Força (N)	Área (mm)	σ_c (MPa)
1	15,10	19,62	20,75	1172,00	65,89	17,79
2	15,19	20,37	21,74	1460,00	68,73	21,24
3	15,00	20,12	22,21	1202,00	69,08	17,14
4	15,03	19,44	20,83	1177,00	65,72	17,91
5	15,10	20,61	21,34	959,40	68,46	14,01
Média	15,08	20,03	21,37	1194,08	67,58	17,67
Desvio Padrão	0,07	0,49	0,62	177,93	1,63	2,56

Tabela 10 – Amostras sem membrana.

Amostras	c_3	d_2	d_1	Força (N)	Área (mm)	σ_c (MPa)
1	14,94	19,45	20,98	1271,00	65,98	19,26
2	14,85	19,32	20,17	806,90	64,45	12,52
3	15,13	19,68	21,67	842,20	67,49	12,48
4	15,05	19,82	20,97	1082,00	66,57	16,25
5	15,27	21,03	22,51	1094,00	71,06	15,40
Média	15,05	19,86	21,26	1019,22	67,11	15,18
Desvio Padrão	0,16	0,68	0,88	193,22	2,47	2,84

Figura 18 – Amostras sem membrana.



A tensão de compressão (σ_c) foi obtida através da Equação 2.3

Uma análise de variância entre as tensões máxima de compressão suportada pelos corpos de prova mostra que a 93% de confiabilidade não existe diferença para a resistência mecânica à compressão entre os corpos de prova com membrana e sem a membrana. Assim tem-se que para esforços axiais de compressão a membrana não contribui para aumento da resistência mecânica.

Estudando a região elástica dos gráficos plotados na Figura 18 é possível determinar o módulo de elasticidade dos corpos de prova, utilizando Equação 2.5. Portanto

Tabela 11 – Quadro ANOVA dos ensaios de compressão axial do endocarpo.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F	valor-p	F crítico
Entre tratamentos	30,96	1	30,96	4,23	0,07	5,32
Dentro tratamento	58,52	8	7,31			

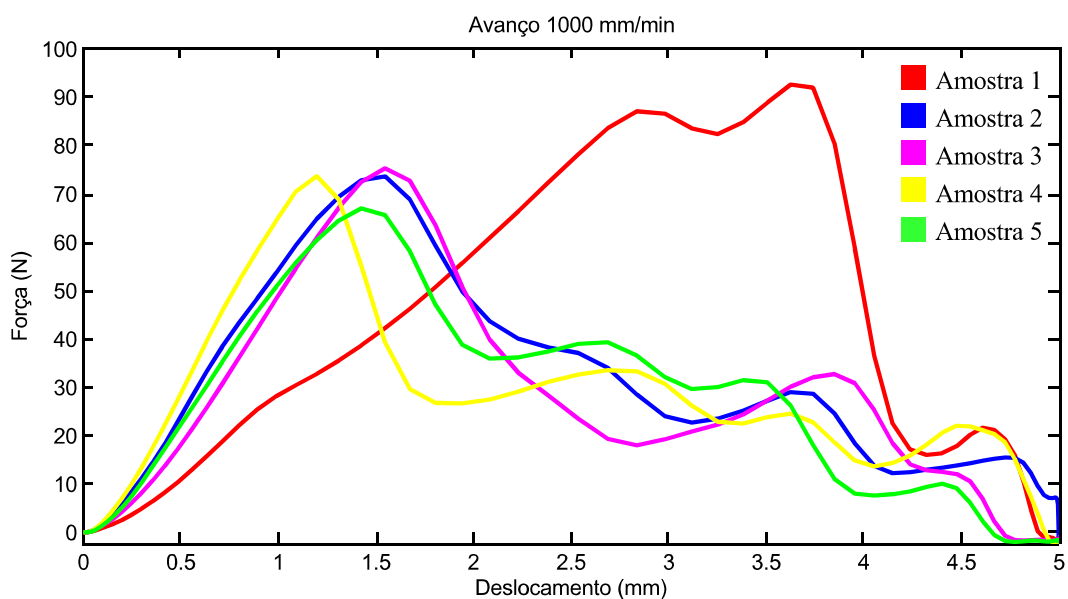
através da média aritmética dos valores encontrados tem-se que o módulo de elasticidade do endocarpo é aproximadamente $316,87 \text{ MPa}$.

2. Ensaio de compressão radial

A possibilidade de utilizar um mecanismo de compressão radial no projeto de desenvolvimento da decortadora, induz a realização deste tipo de ensaio. Para isso foram utilizados os corpos de prova com as dimensões semelhantes aos descrito no item anterior.

Para execução de 5 (cinco) ensaios, os corpos de prova foram posicionados com a membrana paralela ao eixo de deslocamento da máquina e com o endocarpo tangencial a placa de compressão. A Figura 19 mostra o comportamento das amostras ensaiadas.

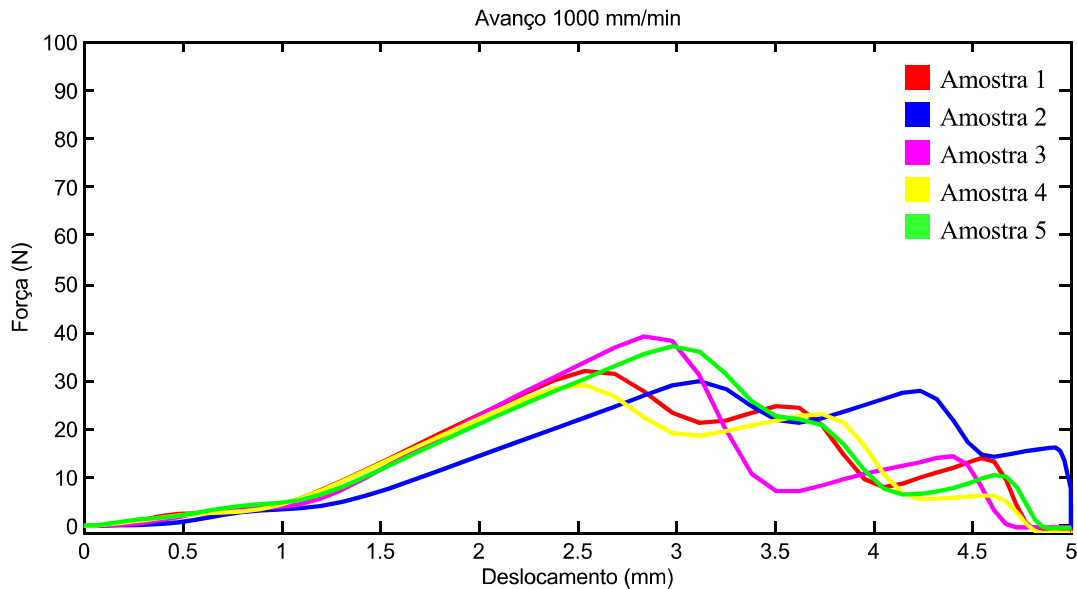
Figura 19 – Compressão radial do endocarpo com membrana paralela ao eixo de deslocamento.



As demais amostras tiveram a membrana retirada e somente o endocarpo foi submetido ao ensaio. O posicionamento foi feito de tal forma a neutralizar ou minimizar

o efeito de concentrador de tensões dos pontos onde a membrana é inserida no endocarpo. Assim os resultados são apresentados na Figura 20

Figura 20 – Compressão radial do endocarpo para amostras sem membranas.



Mesmo posicionando o corpo de prova de maneira conveniente, temos uma região inicial dos gráficos que não prevê o comportamento do endocarpo sobre esforços radiais. A explicação para o ocorrido é que no momento em que há uma mudança na angulação da reta temos uma ruptura no local onde há concentradores de tensões, no entanto o fato do endocarpo se romper não tira a validade dos ensaios. Assim para efeitos de cálculos foram utilizados os valores a partir do ponto onde ocorre a mudança na inclinação da reta.

Tabela 12 – Quadro ANOVA dos ensaios de compressão radial do endocarpo.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Razão F	valor-p	F crítico
Entre tratamentos	6815,05	1,00	6815,05	395,32	0,00	5,59
Dentro tratamento	120,68	7,00	17,24			

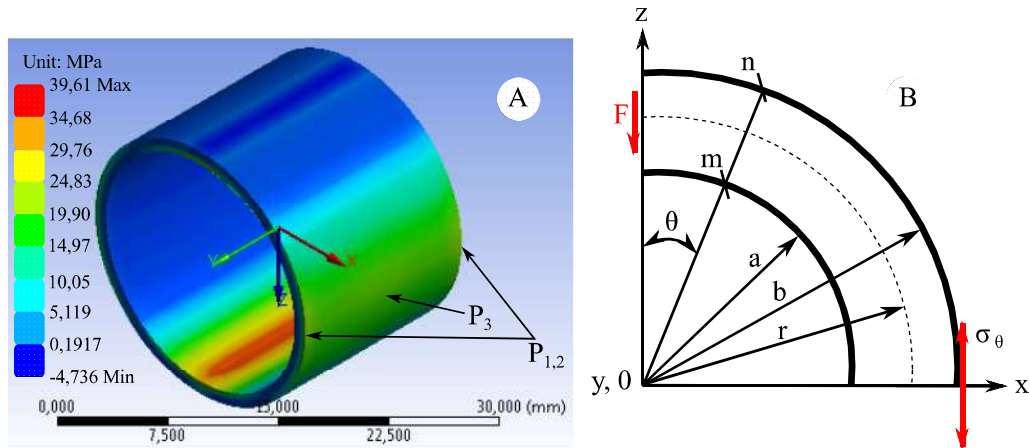
Diferente do ensaio axial, a membrana exerce influência sobre a resistência a compressão radial do endocarpo, como mostra os resultados da Tabela 12, onde a razão F é bem maior do que 1. Portanto para o desenvolvimento de decortidores deve-se considerar as maiores forças de solicitações, ou seja, no sentido paralelo a membrana, pois é extremamente difícil de se prever a posição exata da membrana no momento do descasque.

Com os ensaios de compressão radial foi possível determinar a força máxima suportada pelo endocarro, no entanto as tensões desenvolvidas na casca foram determinadas através de análise por elementos finitos e posteriormente comparadas com os resultados gerados analiticamente.

Na análise do endocarro através da simulação por elementos finitos, a primeira condição de contorno foi carregar o modelo com uma força de 33,5 N no sentido radial (eixo z). A segunda condição estabelecida, presume que o ponto de fixação/reacção é na mesma direção do carregamento porém no sentido oposto. Para análise dos resultados os pontos de aplicação de carga e fixação não foram levados em consideração, pois são locais utilizados como condições de contorno para o modelo.

Assim na Figura 21-A os pontos de máxima tensão são localizados no plano médio (x-y) do cilindro e na extremidade do raio, onde os pontos $P_{1,2}$ e P_3 apresentam 22,2 MPa e 20,6 MPa respectivamente. Nestas condições o deslocamento máximo se deu no eixo z, no local de aplicação da carga, com uma magnitude de 9,67 mm.

Figura 21 – (A) Simulação do corpo de prova. (B) Representação de uma barra curvada.



Fonte: Adaptado de Timoshenko e Goodier (1951, p. 73)

Já pela teoria da elasticidade, o corpo de prova estudado pode ser aproximado a uma barra curvada de secção retangular, cuja representação está dada pela Figura 21-B. Timoshenko e Goodier (1951) diz que a tensão normal, σ_θ , para $\theta = \frac{\pi}{2}$, desenvolvida devido uma força (F) aplicada na extremidade no sentido radial da curva é dado pela Equação 4.5.

$$\sigma_\theta = \frac{F}{N} \left[3r - \frac{a^2 b^2}{r^2} - (a^2 + b^2) \frac{1}{r} \right] \quad (4.5)$$

onde

$$N = a^2 - b^2 + (a^2 + b^2) \log\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.6)$$

substituindo os valores na Equação 4.6 e Equação 4.5 tem-se

$$N = 9,025^2 - 10,085^2 + (9,025^2 + 10,085^2) \log\left(\frac{10,085}{9,025}\right) = -11,417$$

$$\sigma_\theta = \frac{2,23}{-11,417} \left[3 \times 9,555 - \frac{9,025^2 \times 10,085^2}{9,555^2} - (9,025^2 + 10,085^2) \frac{1}{9,555} \right] = 15,89 \text{ MPa}$$

Nota-se que entre há uma discrepância entre os valores encontrados através da simulação e pela forma analítica. Tal divergência é aceitável e justificada pelo fato da teoria da elasticidade levar em consideração apenas pequenas deformações, o que de fato não ocorre na análise por elementos finitos, onde o comportamento da modelagem tende a se aproximar mais fielmente da realidade.

4.1.3 Amêndoa

O foco principal do processo de descasque do fruto é justamente a obtenção de uma amêndoa integra, para isso é necessário determinar suas propriedades mecânicas, permitindo assim estabelecer limites nos esforços atuantes na casca de forma a preservar à amêndoa. A caracterização das amêndoas foi efetuada por meio de ensaios de compressão e flexão nos corpos de prova.

A partir da amêndoa os corpo de prova (C.P.) foram extraídos e as dimensões foram determinadas de forma a obter-se um corpo de prova com ausência de imperfeições. Inicialmente cortou-se as amêndoas em forma de um paralelepípedo, posteriormente com uma lixa as imperfeições foram acertadas até a superfície se tornar regular e plana. A Figura 22 ilustra a amêndoa integra, bem como os corpos de prova padrão para os ensaios de compressão e flexão da amêndoa.

Figura 22 – Corpos de prova extraídos da amêndoa.

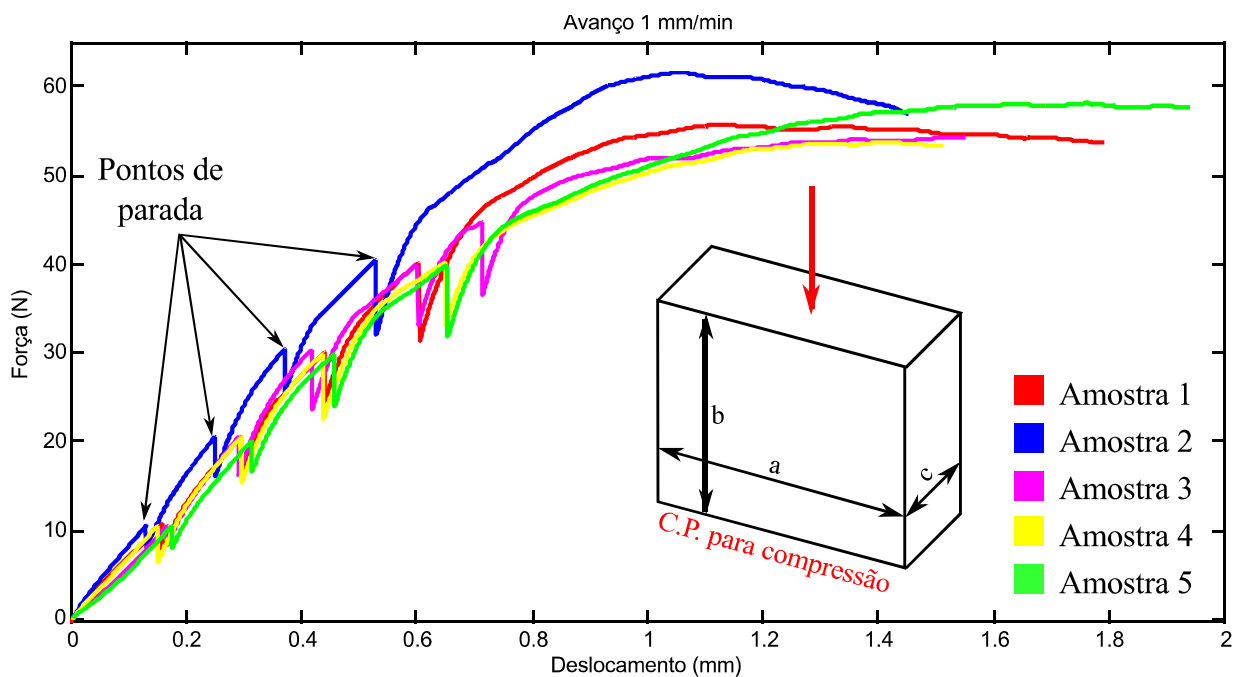


Na Figura 23 está representado esquematicamente o corpo de prova para os ensaios de compressão, juntamente com a direção de carregamento e suas dimensões, sendo que $a = 13 \pm 0,38 \text{ mm}$, $b = 10,45 \pm 0,22 \text{ mm}$ e $c = 5,43 \pm 0,18 \text{ mm}$. A direção do carregamento foi escolhida de modo a evitar o fenômeno de flambagem, mas que permitisse a medição das dimensões durante os ensaios.

Para realização dos ensaios de compressão adotou-se os mesmos procedimentos utilizados nos ensaios anteriores, diferindo apenas no parâmetro de avanço, que neste caso foi utilizado 1 mm/min . Durante a realização dos ensaios, pequenas pausas foram feitas a fim de obter-se as variações geométricas com o decorrer do ensaio. Com um paquímetro mediu-se a dimensão c em cada ponto de pausa.

A partir das dimensões registradas (ver ??), para o cálculo do coeficiente de Poisson (ν) usou-se a Equação 2.9, onde ε_z é a deformação longitudinal no sentido de compressão e ε_y é a deformação lateral calculada à partir das dimensões registradas.

Figura 23 – Ensaio de compressão das amêndoas.



O comportamento em compressão dos C.P. estão plotados na Figura 23. Nos trechos lineares foram escolhidos e avaliados dois pontos, a fim de determinar o módulo de elasticidade das amostras (Lei de Hooke). Os valores de todos os pontos escolhidos estão apresentados no Tabela 13.

Tabela 13 – Dados colhidos para determinação do módulo de elasticidade.

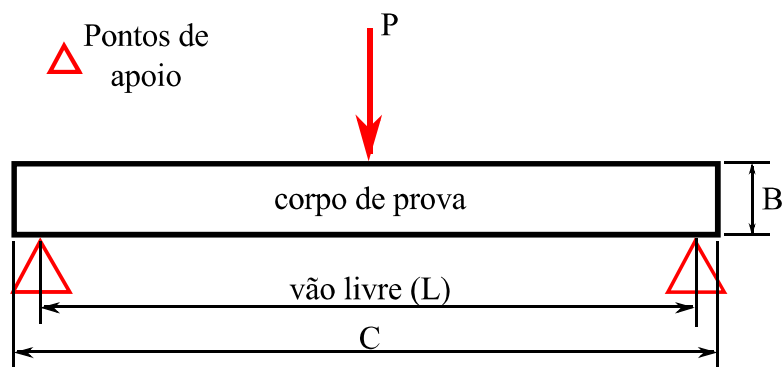
Amostra	Deslocamento (mm)	Deformação específica (mm/mm)	Força (N)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)	<i>E</i> MPa
1	0,3796	$4,198 \times 10^{-4}$	26,00	67,138	$4,468 \times 10^{-3}$	10,64
	0,384		26,30			
2	0,33	$1,882 \times 10^{-3}$	27,26	67,777	$2,198 \times 10^{-2}$	11,68
	0,3494		28,75			
3	0,3677	$1,339 \times 10^{-3}$	26,61	70,703	$1,570 \times 10^{-2}$	11,72
	0,3814		27,72			
4	0,377	$1,301 \times 10^{-3}$	25,76	72,240	$1,412 \times 10^{-2}$	10,85
	0,3907		26,78			
5	0,3865	$2,634 \times 10^{-3}$	25,27	71,182	$2,754 \times 10^{-2}$	10,46
	0,4146		27,23			
média		$1,515 \times 10^{-3}$			$1,676 \times 10^{-2}$	11,06

A deformação específica foi calculada a partir da razão entre o deslocamento (diferença entre os dois pontos escolhidos) e o comprimento inicial, ou seja, a dimensão B dos corpos de prova. A área foi obtida por: $\text{Área} = a \times c$, sendo a e c as dimensões dos corpos de prova. As dimensões geométricas podem ser vistas na ??

Em consequência disso, simplificada e assume-se o comportamento linear elástico. Assim, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson das amêndoas foram obtidos sendo 11,06 MPa e 0,36 respectivamente.

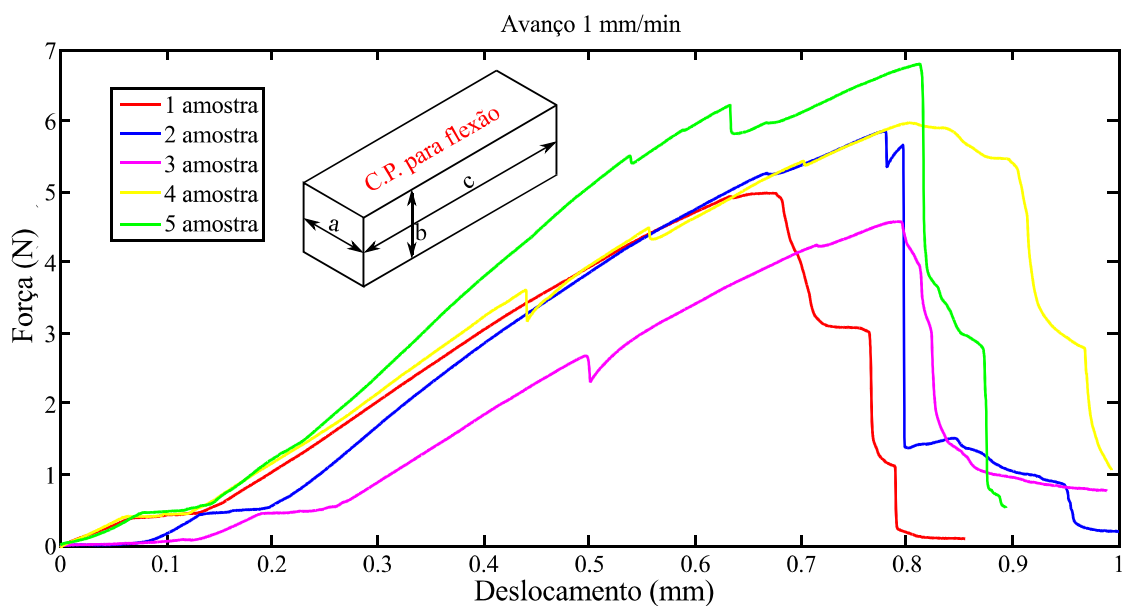
Na sequência, para os ensaios de flexão ao invés de placas paralelas, usou-se um dispositivo de 3 pontos, ou seja, a base com 2 pontos de apoio e na célula de carga mais 1 ponto de aplicação da carga. A representação esquemática pode ser vista na Figura 24, onde também é possível observar o posicionamento dos corpos de prova durante os ensaios.

Figura 24 – Representação esquemática do ensaio de flexão



Os corpos de prova foram obtidos a partir das amêndoas, como mostra a Figura 22, suas características geométricas estão representadas na Figura 25 juntamente com seu comportamento sob flexão. As principais dimensões são: $a = 5 \pm 0,16 \text{ mm}$; $b = 4 \pm 0,18 \text{ mm}$ e $c = 16 \pm 0,23 \text{ mm}$.

Figura 25 – Comportamento dos corpos de prova durante ensaio de flexão de 3 pontos.



O objetivo principal dos ensaios de flexão foi determinar o momento fletor a que estavam submetidos os C.P. e em consequência estimar a tensão desenvolvida por tais esforços. Estes parâmetros permitirão determinar qual o valor aproximado de impacto que as amêndoas aguentam sofrer sem acarretar danos, isso porque umas das concepções propostas utiliza o mecanismo de impacto para induzir a liberação das amêndoas.

Dessa forma, a Tabela 14 apresenta as características médias das amostras, bem como o momento de inércia I , a posição da fibra mais distante solicitada y e a força P cujo carregamento provocou a falha do C.P.

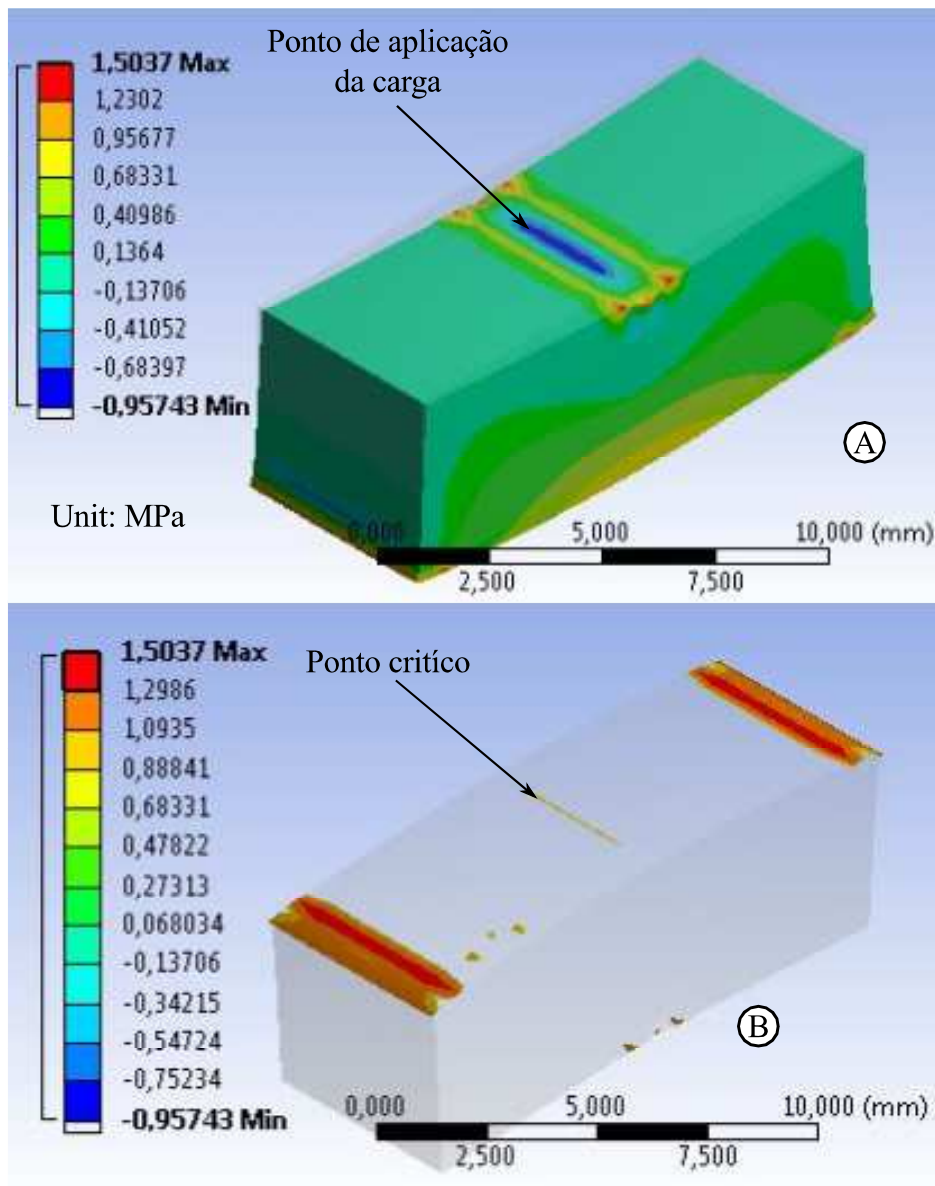
Tabela 14 – Dados dos ensaios de flexão das amêndoas

Amostra	$a(mm)$	$b(mm)$	$c(mm)$	$I(mm^4)$	$y(mm)$	$P(N)$	$M_f(N.mm)$	$\sigma(MPa)$
1	4,74	4,18	16,54	28,85	2,37	4,98	17,37	1,43
2	5,14	4,76	16,55	46,20	2,38	5,86	20,42	1,05
3	4,95	4,40	16,45	35,14	2,20	4,58	15,98	1,00
4	4,92	4,73	16,63	43,39	2,37	5,98	20,84	1,14
5	5,09	4,85	16,06	48,39	2,43	6,81	23,74	1,19
média	4,97	4,58	16,45	42,04	2,29	5,64	19,67	1,07
Desvio Padrão	0,16	0,28	0,23	5,73	0,14	0,88	3,06	0,09

Utilizando o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson determinados anteriormente, uma simulação por elementos finitos foi realizada a fim de comparar com os ensaios de flexão. Os resultados são apresentados na Figura 26 e fazem referência a tensão máxima principal.

Na Figura 26-B é possível ver o ponto crítico para este tipo de carregamento. A

Figura 26 – Simulação do ensaio de flexão.



tensão neste ponto é de $0,987 \text{ MPa}$. Comparando com os resultados apresentados na Tabela 14, os ensaios se mostraram bastante satisfatórios, por sua vez os coeficientes de Poisson e o módulo de elasticidade também forneceram uma boa aproximação.

5 Projeto do Decortificador

O desenvolvimento conceitual do projeto do decortificador é apresentado neste capítulo sendo fragmentado em escopo da máquina, concepções, determinação das solicitações, dimensionamento analítico, análise por elementos finitos, sistemas de acionamento e por fim a montagem final do sistema.

5.1 Escopo

A decortificadora de noz pecã deve ter como funções e premissas de projeto os seguintes itens:

- (a) descascar noz pecã com diferentes características geométricas;
- (b) autonomia mínima de $100 \frac{kg}{h}$;
- (c) operação em regime contínuo;
- (d) atender os itens da NSF International/American National Standards Institute (NSF/ANSI)-2, NSF/ANSI-51 e Norma Regulamentadora (NR)-12.

5.2 Indentador Cônico Cortante - 1ª Concepção

O conceito consiste na penetração de um elemento cortante, cuja conicidade provoca uma deformação controlada na casca, de modo a estabelecer uma deformação constante até a ruptura do endocarpo. Outra característica da ferramenta é a geometria cortante conferida por meio da afiação da ponta, cuja finalidade é cortar a membrana presente no meio do fruto, permitindo a liberação das amêndoas.

O mecanismo é composto por um elemento rotativo onde são presos atuadores eletromagnéticos equipados com os indentadores. O acionamento dos atuadores é realizado por meio de um sensor indutivo localizado numa posição conveniente para realização da quebra dos frutos. Após o descasque, o material resultante da quebra passa por um dispositivo capaz de promover pequenos impactos de modo a liberar as amêndoas que por ventura não tenham sido extraídas.

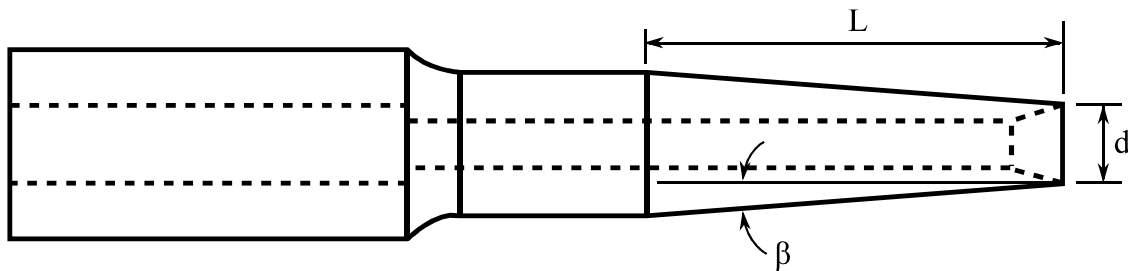
5.2.1 Dimensionamento do Indentador Cônico e Ensaio

Para validar a concepção proposta, investigar o processo de ruptura da casca da noz pecã e determinar o rendimento quanto a extração das amêndoas, foram fabricados

3 indentadores de modo a trabalharem individualmente.

O dimensionamento do indentador foi realizado em função da deformação máxima suportada pelo endocarpo, em que os valores de tensão e deformação estão apresentados na subseção 4.1.2 O formato do indentador pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Representação do indentador cônico.



O comprimento (L) é referente ao comprimento médio dos frutos, já o diâmetro (d) é baseado no diâmetro resultante após o corte das extremidades do fruto, ambos são valores fixos uma vez que já foram pré estabelecidos. Assim para encontrar o ângulo β tem-se a Equação 5.1.

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{D - d_m}{2L}\right) \quad (5.1)$$

Isolando D na Equação 2.4, encontrou-se $21,60 \text{ mm}$, substituindo na Equação 5.1 juntamente com as demais variáveis, o ângulo mínimo para o cone é $1^{\circ}57'$. Dessa forma tem-se as principais dimensões do indentador.

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{21,60 - 20,17}{2 \times 26}\right) \cong 1^{\circ}57'$$

A equação acima nos fornece o valor mínimo para o ângulo do cone de modo a provocar a ruptura do endocarpo. Como já mencionado optou-se por fabricar 3 ferramentas (Figura 28) cuja única diferenciação entre as elas é a forma do ângulo de ataque dos indentadores. Um foi fabricado com 2° de conicidade, o outro, com $3^{\circ}30'$ e o último com $4^{\circ}40'$. Todos os indentadores foram usinados em aço 1045 e receberam na ponta, a qual ia penetrar no fruto, uma têmpera localizada e posteriormente foram afiadas a fim de conferir corte à ferramenta.

O formato cônico dos indentadores é devido ao fato deste tipo de geometria facilitar a penetração e simultaneamente permitir uma deformação gradual na casca e o corte da membrana. As demais dimensões dos indentadores podem ser vistas no ??.

Portanto, para os ensaios utilizou-se uma máquina fabricada pela Shimadzu, modelo *Autograph AGS-X*, com uma célula de carga do tipo "S" com capacidade de 500 N . A velocidade de avanço do travessão durante a penetração foi estabelecida em 1000 mm/min .

Figura 28 – Indentadores cônicos usinados.



Os indentadores foram adaptados na célula de carga, localizada no travessão superior do equipamento, de modo a captar os esforços sofridos pelo indentador devido a penetração imposta por um avanço pré estabelecidos na máquina universal de ensaios.

Com objetivo de acomodar bem o fruto durante os ensaios uma base em madeira com um furo passante foi fabricada, conferindo confiabilidade e estabilidade no posicionamento dos frutos.

Para os ensaios foram selecionados 25 frutos, os quais não apresentavam nenhum tipo de anormalidade, ou seja, trincas e deformações no endocarpo. Posteriormente foram medidas as principais dimensões dos frutos, comprimento¹ e diâmetro médio. Para determinação do diâmetro médio duas medidas perpendiculares entre si foram tomadas. As medidas foram realizadas aleatoriamente por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

Os ensaios foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa determinou-se qual ferramenta apresentou um melhor desempenho no processo de ruptura do endocarpo e corte da membrana devido a penetração. Já a segunda etapa o objetivo foi verificar a influência do teor de umidade e a característica de corte das extremidades no processo de penetração. Utilizou-se o indentador com melhor desempenho na primeira etapa.

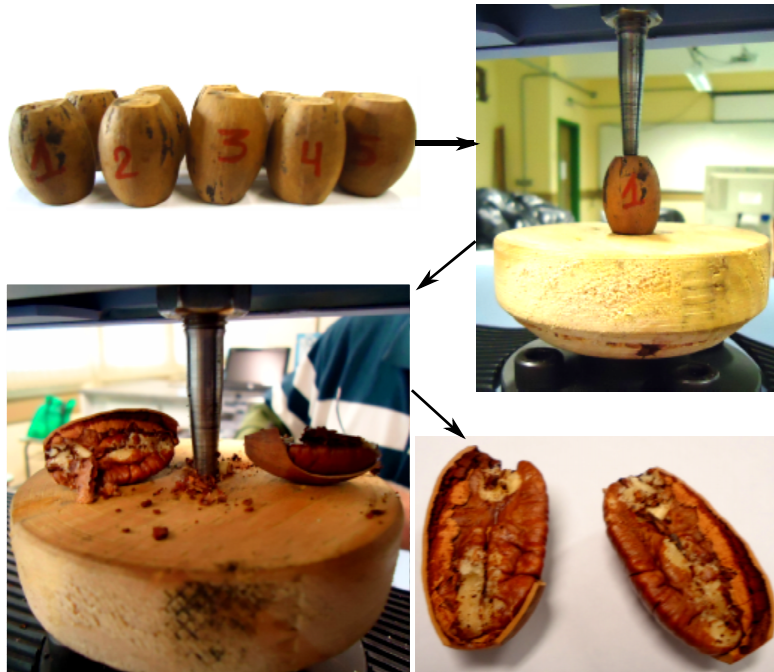
Para a primeira etapa, utilizou-se cinco repetições para cada ferramenta, totalizando 15 nozes, todos os frutos foram ensaiados *in natura* e tiveram cerca de 4 mm cortados em cada extremidade. Para a segunda etapa, utilizou-se 15 repetições, sendo que em 5 delas os frutos estavam *in natura* e tiveram cerca de 5,5 mm cortados em cada extremidade. Outras 5 nozes foram submetidas a secagem e receberam também 5,5 mm de corte nas extremidades. Por fim, 5 nozes foram submetidas a secagem e tiveram cerca de 4 mm de suas extremidades cortadas.

A secagem dos frutos foi feita através de um estufa onde os mesmos permaneceram

¹ O comprimento foi medido após o corte das extremidades.

cerca de 2 h a uma temperatura de 90°C. É importante salientar que as amostras foram submetidas ao processo de secagem, com todas as suas dimensões já anotadas.

Figura 29 – Etapas dos ensaios



A Figura 29 apresenta a sequência básica de realização dos ensaios, onde inicialmente os frutos tiveram suas extremidades cortadas e lixadas de modo a obter-se superfícies paralelas entre si e ortogonais com o eixo de revolução do fruto. Posteriormente a amostra foi posicionada sob uma base de madeira com um furo passante e em seguida foi feito o acionamento da máquina. Após o ensaio, todo o material resultante foi separado e classificado em 5 grupos de interesse, amêndoa inteira², amêndoas quebradas ao meio, pedaços³, farelos⁴ e cascas. O grupo "cascas" ainda foi subdividido em 4 granulometrias, metade, pedaços, lascas e farelos.

5.2.2 Resultados e Discussão

Os frutos utilizados apresentaram dimensões médias de 28,34 mm de comprimento e 19,78 mm de diâmetro. As nozes submetidas ao processo de secagem apresentaram uma redução em sua massa entorno de 7%.b.u. O fato dos frutos estarem com as extremidades cortadas facilitou o processo de secagem, principalmente das amêndoas.

O conjunto máquina universal e indentador, mostrou-se apropriado para a simulação do funcionamento do conceito proposto. Uma vez que, após o posicionamento do

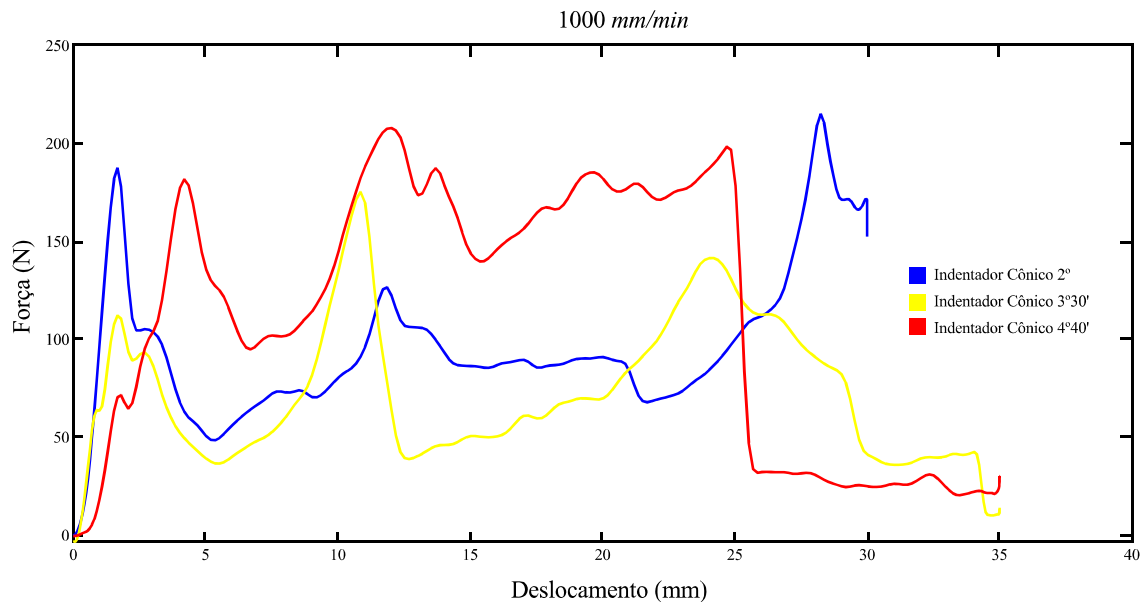
² De uma noz pecã é possível extrair duas amêndoas inteiras

³ Atribui-se ao grupo "pedaços" partículas maiores do que 5,55 mm e menores que as do grupo quebradas ao meio

⁴ Partículas menores que 5,55 mm

fruto, o mesmo permaneceu em sua posição durante todo o tempo de duração dos ensaios. A Figura 30 ilustra o comportamento típico e as relações de esforços com o passar do tempo durante o processo de penetração do indentador.

Figura 30 – Comportamento dos indentadores durante o processo de ruptura do endocarpo.



Ao analisar as curvas dos gráficos da Figura 30, nota-se que há três pontos de máxima e logo em seguida uma queda abrupta na força. Esses pontos representam a ruptura do endocarpo em locais distintos, o que de certa forma facilita a extração do endosperma. Os ensaios em que os gráficos não tiveram este comportamento, foi identificado algum problema, como no caso de frutos que as amêndoas já estavam em estado de decomposição.

Os resultados da primeira etapa dos ensaios, mostraram que 100% dos frutos ensaiados apresentaram ruptura no endocarpo, no entanto a ferramenta com maior conicidade apresentou um melhor desempenho quanto a separação do frutos, ou seja, todos os frutos ensaiados com o indentador de 4°40' tiveram o endocarpo ao menos subdividido em duas partes, de modo que as amêndoas foram liberadas mais facilmente.

Os frutos ensaiados na primeira etapa apresentavam uma massa de 90,3 g. Após os ensaios, o material recolhido foi separado e novamente pesado de onde obteve-se 34,2 g de cascas e 45,3 g de amêndoas, das quais 30 g eram do grupo de amêndoas inteiras. A Figura 31 apresenta os 3 grupos de amêndoas mencionados anteriormente. Os frutos que não tiveram as amêndoas totalmente liberadas, passaram por extração manual. As cascas também foram separadas conforme os grupos mencionados anteriormente e estão apresentadas na Figura 32.

Na segunda etapa dos ensaios, alguns pontos cruciais para o desenvolvimento do decortificador utilizando indentadores cônicos foram observados.

Figura 31 – Granulometria das amêndoas resultante dos ensaios.



Figura 32 – Granulometria das cascas resultantes dos ensaios.

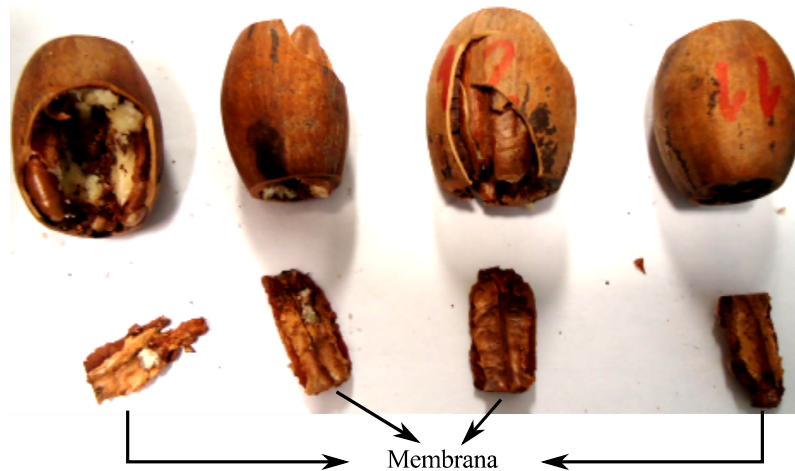


A Figura 33 apresenta o padrão de comportamento dos frutos que tiveram um corte de $5,5 \text{ mm}$ e foram submetidos a secagem. Nota-se que houve um bom desempenho do indentador quanto ao corte e extração da membrana, no entanto não houve a ruptura total do endocarpo, sendo observado apenas o arrancamento de lascas. Esse comportamento não é de fato interessante para o descasque, pois dificulta a extração da amêndoa.

A Figura 34 apresenta o desenvolvimento das forças em função do tamanho de corte das extremidades. O excesso de corte das extremidades (Figura 34-B) faz com que não haja um contato direto entre o cone indentador e a casca do fruto, resultando no esmagamento excessivo das amêndoas.

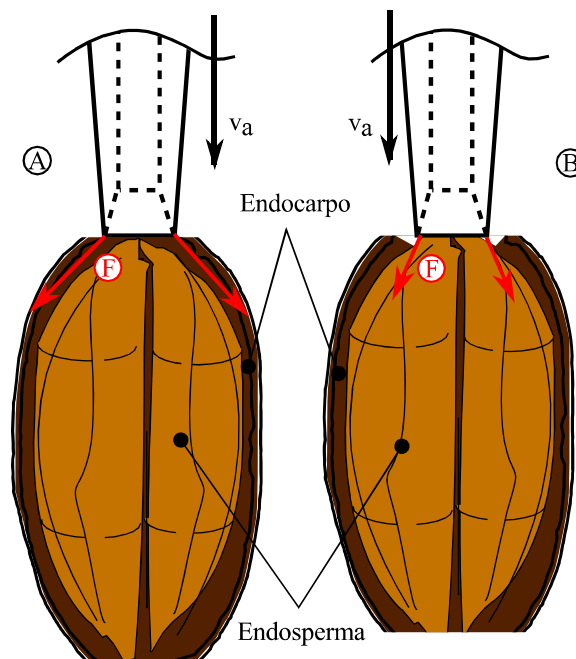
Já os frutos cujas extremidades foram cortadas apenas 4 mm e passaram pelo processo de secagem, apresentaram uma ótima ruptura do endocarpo, pois além do processo de secagem promover a fragilização da casca, este tipo de corte favorece o contato entre a casca e o indentador, possibilitando a aplicação direta da força sobre o endocarpo

Figura 33 – Frutos secos e com corte nas extremidades de 5,5 mm.



(Figura 34-A), ocasionando num esmagamento quase nulo das amêndoas.

Figura 34 – (A) Ação do indentador nos frutos com corte de 4 mm. (B) Ação do indentador nos frutos com corte de 5,5 mm.



A combinação entre os parâmetros de corte das extremidades e secagem facilitaram a liberação das amêndoas, mas como já mencionado na página 53 - Item (c) a secagem fragiliza também as amêndoas, tornando-as mais quebradiças. Fato que observou-se também durante os ensaios com os indentadores.

5.3 Cone Recalcado de Compressão Radial - 2ª Conceção

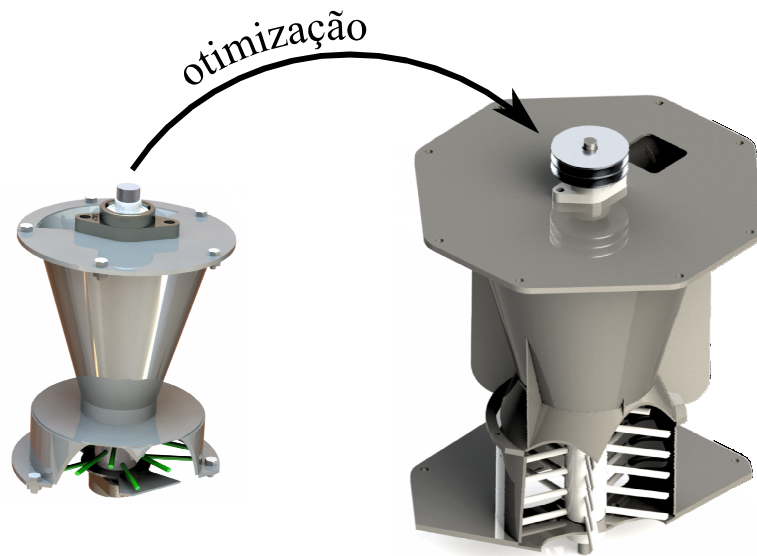
Este conceito para decorticação da noz pecã foi baseado no princípio de aplicação de cisalhamento através de um impacto angular que desenvolve forças de compressão

radial no fruto, fazendo com que a casca seja rompida e assim possibilitando a liberação da amêndoa.

O mecanismo consiste em um cilindro rotativo com 5 perfis helicoidais usinados e um cone estático obtido por conformação, dispostos concentricamente de forma a receber o fruto. A distância entre os elementos mencionados é tal que possibilita a ruptura de uma faixa ampla de diâmetro do fruto. A alimentação da máquina é dada por um fluxo contínuo, o qual é proveniente de um reservatório de alimentação. Após a quebra da casca um sistema denominado, dedinhos rotativos, ocasiona leves impactos nos frutos de modo a garantir que a amêndoa seja liberada da casca.

Durante o desenvolvimento desta concepção e ensaios com o modelo, notou-se alguns pontos negativos, por isso de acordo com a metodologia proposta, ciclos de otimizações foram realizados de forma a corrigir tais falhas. A figura Figura 35 ilustra o decortificador antes e após os ciclos de otimização.

Figura 35 – Ilustração do decortificador após otimizações.



A seguir será descrita a fabricação e os testes com o modelo, juntamente com as falhas e aspectos positivos da concepção.

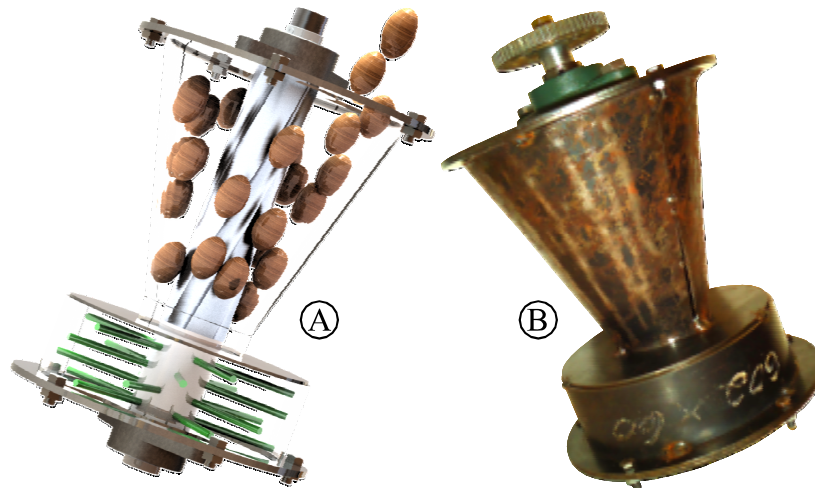
5.3.1 Fabricação e Teste com o Modelo

Em projetos mecânicos é quase que imprescindível a fabricação de modelos em escala e(ou) protótipo para que se consiga avaliar de fato o comportamento do equipamento em serviço.

Neste trabalho o modelo em escala foi utilizado para que com base nas experimentações e na análise dos resultados fossem encontrados relações ideais entre o ângulo do cone, rotação e quantidade de dedinhos, de forma a garantir um bom rendimento do

equipamento. A Figura 36-A e B apresentam o modelo em CAD e o fabricado respectivamente.

Figura 36 – A) Modelo em CAD. B) Modelo fabricado.



De acordo com as dimensões dos desenhos técnicos e disponibilidade de matéria prima, montou-se o modelo em escala (1 : 2) no Laboratório de Soldagem da Unipampa, Alegrete-RS. Os principais processos de fabricação utilizados foram: conformação de chapas, soldagem e usinagem.

Para avaliar o desempenho do modelo, foram utilizadas noz pecã da mesma procedência. A alimentação do equipamento foi feita de forma manual e o material resultante do processo de interação no interior do equipamento foi coletado e utilizou-se o mesmo critério para avaliação, descrito na página 68 . A fonte de potência utilizada nos ensaios era proveniente de uma furadeira de coluna.

Os testes foram realizados com os frutos *in natura*, com diâmetro e geometria variados. A alimentação da máquina foi verificada como sendo muito prática, não necessitando o posicionamento preciso dos frutos, pois a função principal do cone recalado é justamente permitir que o fruto se auto posicione.

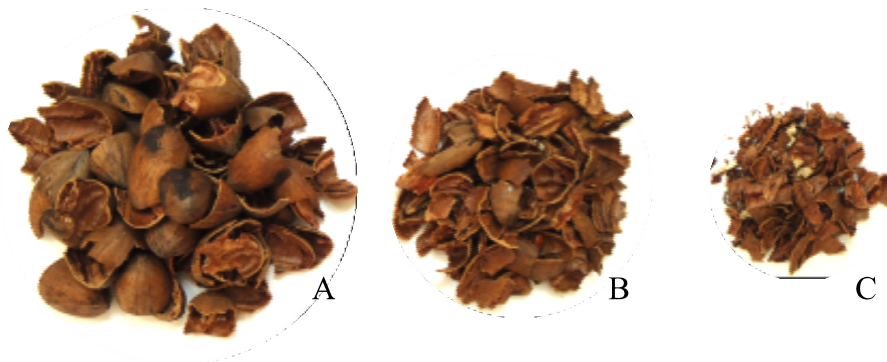
Todos os frutos ensaiados sofreram ruptura do endocarpo, salvo aqueles com diâmetro médio abaixo de 16 *mm*. Após os testes o material resultante foi classificado e os resultados da classificação podem ser vistos na Figura 37 e Figura 38, as quais mostram a granulometria das amêndoas e das cascas respectivamente. Os poucos frutos que não tiveram a amêndoa liberada, passaram pelo processo de extração manual.

De acordo com os critérios estabelecidos, o grupo de cascas pela metade não foi identificado, restando apenas pedaços (Figura 38-A), lascas (Figura 38-B) e farelos (Figura 38-C).

Figura 37 – Granulometria das amêndoas após a classificação do material recolhido.



Figura 38 – Granulometria das cascas após a classificação do material recolhido.



No total foram descascados 28 frutos, dos quais extraíram-se 53,81% de amêndoas inteiras, 27,80% de amêndoas pela metade e 18,39% entre os demais grupos. Portanto o modelo apresentou uma eficiência⁵ de 53,81%. Para o processo de separação das cascas e amêndoas, as granulometrias obtidas foram bem satisfatórias pois facilitam o processo de separação, principalmente pelo método de aspiração.

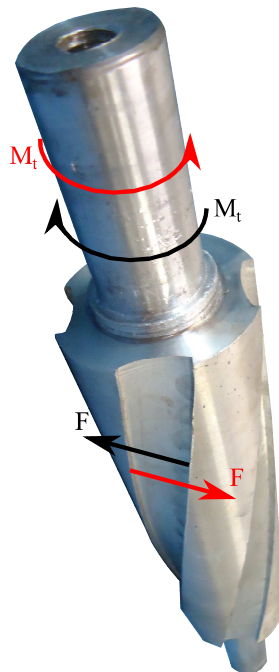
Durante o processo de descasque, observou-se a necessidade de mudanças para o desenvolvimento do projeto nos seguintes itens:

- Cone recalçado: A angulação do cone recalçado deve ser menos íngreme, de modo que o eixo de revolução do fruto fique o mais paralelo possível em relação ao cilindro mestre, tornando o processo mais efetivo.

⁵ Percentual de amêndoas inteiras extraídas no processo de descasque

- Dedinhos: Os dedinhos apresentaram um ótimo desempenho, cumprindo sua função de promover pequenos impactos sem quebrar as amêndoas. No entanto a quantidade presente no modelo, em alguns casos não foi suficiente para induzir a liberação completa de todas as amêndoas.
- Cilindro Mestre: O perfil helicoidal deve apresentar um sentido de giro anti-horário, ou seja, equivalente a uma rosca esquerda, quando a rotação for no sentido horário, pois assim o fruto a ser descascado tende a ser "transportado" para baixo forçando o compressão uma única vez.

Figura 39 – Direção e sentido da força gerada em função do momento torsor e perfil do helicóide.



Nota-se na Figura 39, que em função do momento torsor (M_t), o desenvolvimento da força (F) que será aplicada ao fruto e conseqüentemente empurrá-lo muda. Caso essa força esteja sendo desenvolvida para cima, o fruto tende a ser jogado também para cima, o que aumentam as chances desse fruto receber novamente uma compressão e ter as amêndoas trituradas.

A fabricação e testes com o modelo foram bem satisfatórios, fornecendo resultados cruciais para a próxima etapa. Do ponto de vista operacional e financeiro, o modelo não tem grandes necessidades tecnológicas agregadas, permitindo assim o fácil manuseio e um baixo custo de implantação e manutenção.

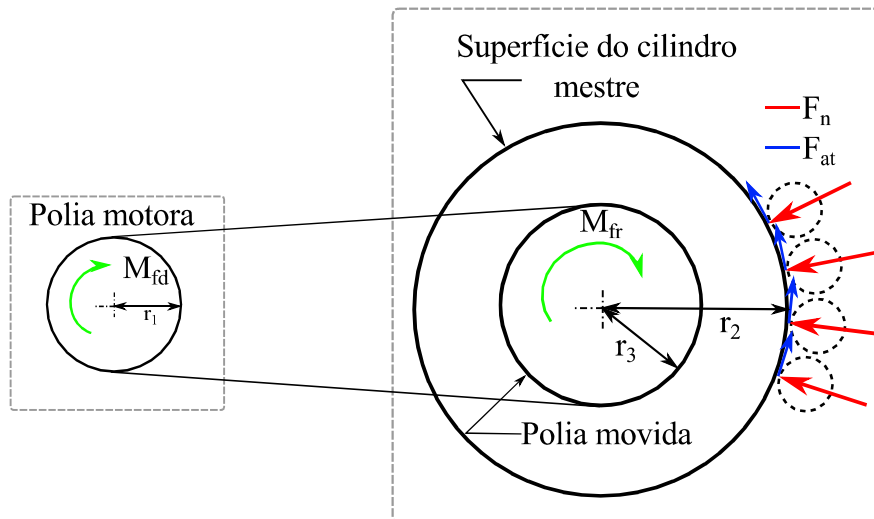
A seguir será exposto o projeto detalhado do decortificador de noz pecã, cujo princípio de funcionamento utilizado é compressão radial e cisalhamento associados.

5.3.2 Sistema de Acionamento

Por se tratar de um maquinário cuja aplicação é na indústria alimentícia, a fonte de potência deve ser proveniente de propulsores "limpos", ou seja, não é recomendado que se tenha queima de gases ou fluidos tóxicos como parte do sistema. Dessa forma, após uma análise de custo x benefícios, chega-se a conclusão de que os motores elétricos são os equipamentos mais recomendados para esse tipo de operação, por serem equipamentos compactos com alta capacidade de carga e eficiência.

Para a seleção do motor é necessário conhecer o momento requerido (M_{fr}) do equipamento a ser acionado. Para isso, a Figura 40 traz uma representação esquemática da transmissão e dos esforços atuantes no cilindro mestre.

Figura 40 – Representação esquemática do sistema de transmissão e as solicitações envolvidas.



Considerando um intervalo de tempo muito pequeno, o máximo de nozes a serem quebradas simultaneamente são 4. Assim a força normal (F_n) desenvolvida contra a superfície do cilindro mestre é análoga a força média de ruptura do endocarpo na posição radial, determinada na seção 4.1 - Item 2 (página 57). Adotando um atrito cinético, $\mu_c = 0,6$, tem-se através da Equação 5.2 a força de atrito desenvolvida entre a superfície do cilindro mestre e os frutos.

$$F_{at} = F_n \mu_c = 134 \text{ N} \times 0,6 = 80,4 \text{ N} \quad (5.2)$$

Como a força de atrito é tangencial à face do cilindro mestre, temos o surgimento de um momento dado pela Equação 5.3.

$$M_{fr} = F_{at} r_2 = 6,03 \text{ N m} \quad (5.3)$$

Onde $r_2 = 0,075 \text{ m}$. Considerando a relação de transmissão 1:1, para que haja o acionamento do cilindro mestre é necessário satisfazer a Equação 5.4.

$$M_{fr} = M_{fd} \quad (5.4)$$

Onde M_{fd} é o momento tursor ou conjugado nominal fornecido pelo motor. Portanto o motor escolhido para equipar a decorticadora foi um Voges modelo *VTOP – 80b – 4 pólos – 380 V – 1,5 cv – 1705 rpm – $M_t = 6,18 \text{ N m}$*

Para transmissão de energia e rotação foi utilizado um sistema de polias e correias do tipo *V*. Os parâmetros necessários para o dimensionamento e escolha dos componentes do sistemas estão descritos por Provenza (1996) e Budynas e Nisbett (2011a) e utilizados neste trabalho.

Inicialmente determinou-se o perfil da correia, através de um ábaco que relaciona a potência do motor com a velocidade da polia motora, sendo esse do tipo A. O fator de serviço adotado foi de 1,2, sendo o mais recomendado pela bibliografia. Já a velocidade da correia (V_c) foi obtida através da Equação 5.5, onde d_1, n_1, d_2 e n_2 são diâmetro e rotação da polia motora e movida respectivamente.

$$V_c = \pi D_1 n_1 = \pi D_2 n_2 \quad (5.5)$$

$$V_c = \frac{\pi 0,110 * 1705}{60}$$

$$V_c \cong 9,82 \text{ m/s}$$

Relacionando a velocidade (V_c) com diâmetro, obteve-se que cada correia do tipo A é capaz de transportar cerca de 4 *HP*. Assim a determinação da quantidade de correias ($N_{correia}$) foi realizada através da Equação 5.6

$$N_{correias} = \frac{Pot_{motor} * Fator \ de \ serviço}{Pot_{correia} * Fator \ de \ correção \ do \ arco \ de \ contato} \quad (5.6)$$

O fator de serviço e o fator de correção do arco de contato são 1,1 e 0,99 respectivamente. É importante a inserção destes valores, pois os mesmos adequam as condições de laboratório para a condição real.

$$N_{correias} \cong \frac{1,48 * 1,1}{0,95 * 0,99} \cong 1,73 \cong 2 \text{ correias}$$

A distância entre centros (I) é de 362 mm, assim o comprimento da correia foi obtido através da Equação 5.7.

$$l = 2I + 1,57(D_2 + D_1) + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4I} \quad (5.7)$$

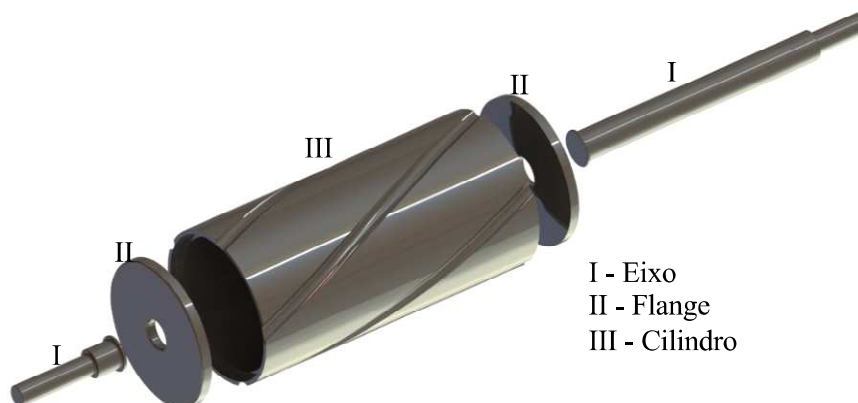
Como o comprimento nominal da correia encontrado foi de 1062,4 mm, a correia adotada para equipar a decortificadora é referenciada por A – 42, onde A é o padrão de perfil da seção transversal e o numeral que o acompanha, faz referência ao comprimento nominal da correia, sendo então 1092 mm.

Como já mencionado a transmissão de potência será feita através de polias e correias. Para este equipamento, em função de suas características optou-se por utilizar 2 polias de alumínio em V para o perfil de correia A, sendo uma acoplada no motor e a outra no cilindro mestre da máquina.

5.3.3 Dimensionamento do Cilindro Mestre

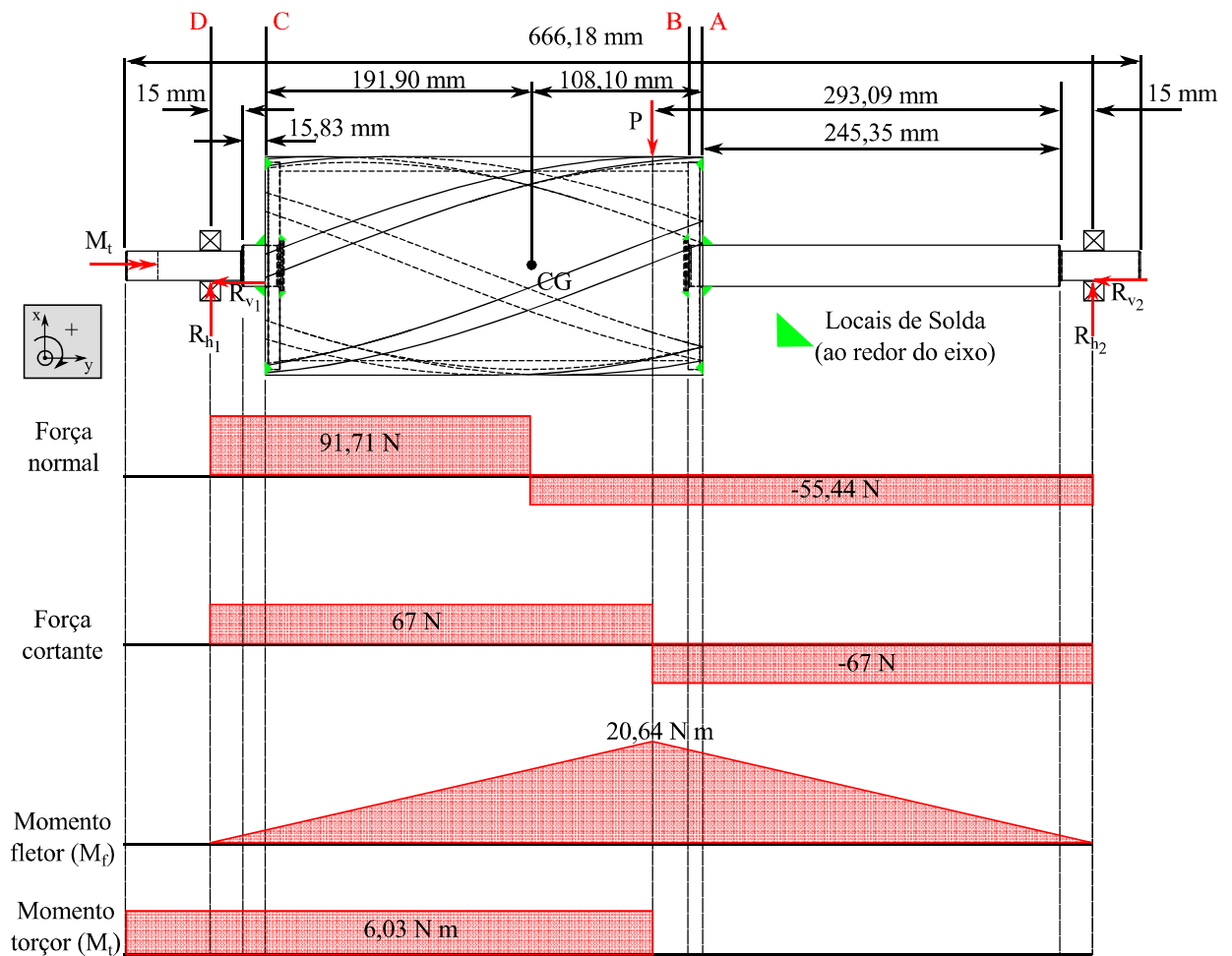
O cilindro mestre é o principal componente deste conceito, ou seja, é devido a sua geometria que o fruto receberá uma força cisalhante e uma compressão radial contra o cone recalado. A Figura 41 ilustra as peças que compõem o cilindro mestre. As características geométricas dos componentes podem ser encontrados no ??.

Figura 41 – Componentes do cilindro mestre.



As forças atuantes sobre os componentes são apresentadas na Figura 42 na forma de um diagrama de corpo livre (D.C.L) e as forças resultantes são apresentadas através de um diagrama de esforços. Para uma análise inicial foi considerado o cilindro mestre como sendo uma peça inteira, portanto neste momento o componente seria isento de uniões (soldas). A ideia de um componente inteiro foi descartada devido ao excesso de peso e alto custo do material.

Figura 42 – Diagrama de corpo livre.



Para o desenvolvimento do diagrama, inicialmente determinou-se as reações de apoio ($\sum F_x = 0$ e $\sum F_y = 0$). Para o cálculo das reações na direção y , considerou-se um caso hiperestático. A próxima fase foi determinar a força cortante, para isso um corte na seção ao longo do cilindro mestre foi realizada e através do equilíbrio estático, tais forças foram determinadas e apresentadas no diagrama de esforços. Outra condição de equilíbrio foi utilizada para plotar o diagrama, $\sum M_p = 0$ (somatório de momentos no ponto de aplicação da carga P), neste caso o momento interno resistente deve agir na direção oposta, de forma a satisfazer o equilíbrio estático. Por fim, o diagrama do momento torsor foi traçado em função da carga sendo aplicada pelo motor e consequentemente o momento torsor de reação gerado na superfície do cilindro mestre.

Analisando os diagramas de momento torsor e fletor verifica-se que as seções A, B e a de aplicação da carga, são consideradas como seções potencialmente críticas. Visto que o componente se trata de um eixo rotativo, foi feita uma análise do ponto de vista cíclico, ou seja, utilizando um critério de falha por fadiga. As tensões axiais não foram consideradas, uma vez que estas são constantes e desprezivelmente pequenas comparadas às tensões de flexão e torção. As tensões cíclicas atuantes no cilindro mestre devido à

flexão e torção são dadas pela Equação 5.8 e Equação 5.10 respectivamente.

$$\sigma_a = K_f \frac{32M_f}{\pi d^3} \quad (5.8)$$

$$\sigma_m = 0 \quad (5.9)$$

$$\tau_m = K_{fs} \frac{16M_t}{\pi d^3} \quad (5.10)$$

$$\tau_a = 0 \quad (5.11)$$

em que: K_f e K_{fs} são fatores de concentração de tensão de fadiga para flexão e torção respectivamente; M_f é o momento fletor e M_t é o momento torsor no ponto a ser analisado.

Os fatores de concentração de tensão de fadiga são dados por:

$$K_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (5.12)$$

$$K_{fs} = 1 + q_{\text{cisalhamento}}(k_t - 1) \quad (5.13)$$

onde q e $q_{\text{cisalhamento}}$ são fatores de sensibilidade ao entalhe, k_t e k_{ts} são fatores que relacionam os ressaltos presentes no eixo. Todos os fatores mencionados anteriormente foram extraídos dos gráficos disponíveis no ANEXO A e ANEXO B.

Iniciando pela seção A tem-se que:

$$\sigma_a = 1,246 \frac{32 \times 17,44}{\pi 0,0282^3} = 9,87 \text{ MPa} \quad \tau_a = 0 \quad (5.14)$$

$$\tau_m = 0 \quad \sigma_m = 0 \quad (5.15)$$

Por se tratarem de cargas combinadas e alternadas aplicadas a um material dúctil, a teoria da energia de distorção foi aplicada, quando necessário, a fim de prever a falha por fadiga. A amplitude alternada equivalente e a tensão média equivalente são dadas pela Equação 5.16 e Equação 5.17 respectivamente.

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} \quad (5.16)$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} \quad (5.17)$$

O fato da seção A não estar sofrendo esforços combinados, não há necessidade de se aplicar a teoria da energia de distorção.

Como mencionado anteriormente, existem três seções potencialmente críticas no componente em questão. Uma vez que já foi verificado o ponto "A", o próximo passo foi determinar o estado de tensão no ponto "B" a fim de garantir a integridade física e funcional do componente.

Analogamente ao ponto "A", verificou-se as tensões flutuantes devido à flexão e torção as quais são apresentadas a seguir.

$$\sigma_a = K_f \frac{M_f c}{I} \quad (5.18)$$

$$\tau_m = K_{fs} \frac{M_t c}{J} \quad (5.19)$$

Para a seção B, $c = 0,075 \text{ m}$ é o ponto radialmente mais distante sendo solicitado, $I = 2,27 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ é o momento de inércia da seção (obtida através de software CAD) e $M_f = 67 \times 0,270 = 18,11 \text{ Nm}$ é o momento fletor atuante. Assim aplicando os valores na Equação 5.18 e Equação 5.19, tem-se:

$$\sigma_a = \frac{18,11 \times 0,075}{2,27 \times 10^{-6}} \approx 0,6 \text{ MPa} \quad \tau_a = 0$$

$$\tau_m = 0 \quad \sigma_m = 0$$

Por fim a seção onde está sendo aplicada a carga "P" foi verificada. Pelo fato do cilindro mestre possuir perfis helicoidais usinados, durante os cálculos considerou-se apenas o diâmetro do cilindro no qual não se tinha tais perfis, portanto foi utilizado um cilindro com diâmetro de 142 mm . Como $\tau_a = 0$ e $\sigma_m = 0$ as tensões desenvolvidas na seção são dadas pela :

$$\sigma_a = \frac{32 \times 20,64}{\pi(0,142^3 - 0,130^3)} \approx 0,316 \text{ MPa} \quad \tau_a = 0 \quad (5.20)$$

$$\tau_m = \frac{16 \times 6,03}{\pi(0,142^3 - 0,130^3)} \approx 0,0461 \text{ MPa} \quad \sigma_m = 0 \quad (5.21)$$

Aplicando a teoria da energia de distorção (Equação 5.16 e Equação 5.17) tem-se:

$$\sigma'_a = 0,316 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{3 \times 0,0461^2} \approx 0,08 \text{ MPa}$$

O material estabelecido para a fabricação do cilindro mestre, trata-se de um aço inoxidável austenítico 304L, cujas propriedades preveem a utilização de processos de soldagem, assim evitando a corrosão intragranular. Juntamente com as tensões equivalentes, foi possível determinar o limite de resistência à fadiga dado por:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e' \quad (5.22)$$

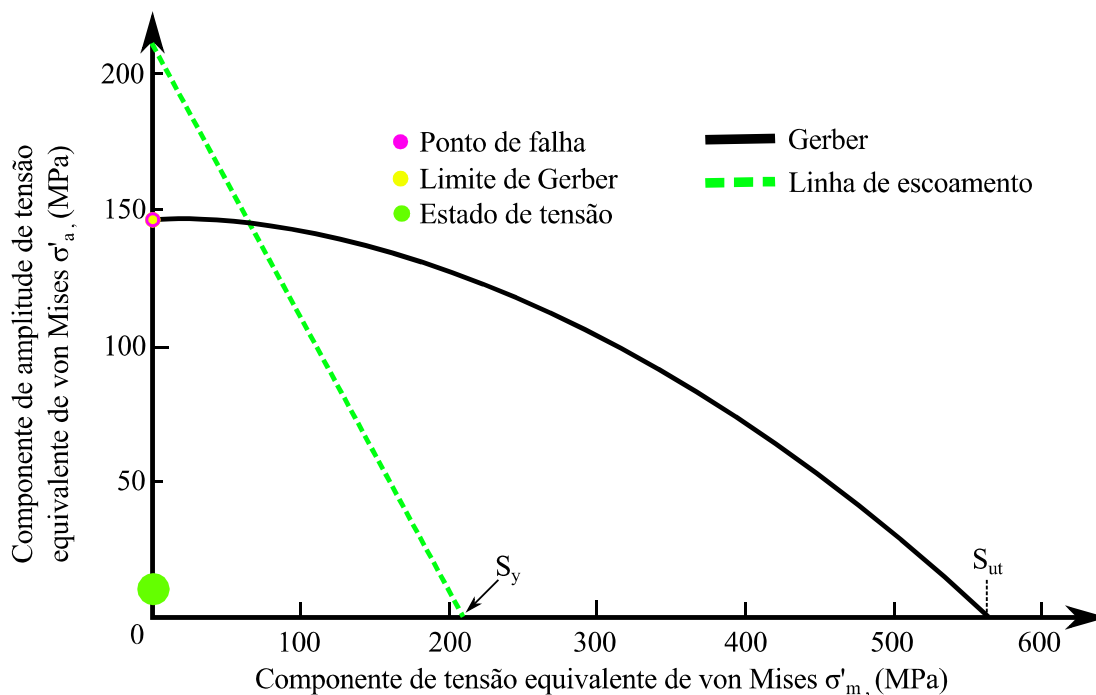
onde $S_e' = 0,5S_{ut}$, sendo $S_{ut} = 564 \text{ MPa}$ a tensão de ruptura do material. Os 6 fatores relacionados à estimativa do limite de resistência a fadiga podem ser verificados no ANEXO C.

Assim substituindo os valores na Equação 5.22, tem-se que:

$$S_e = 0,841 \times 0,874 \times 1 \times 1,005 \times 0,702 \times 1 \times 282 = 146,23 \text{ MPa}$$

Visto que a seção A é a mais crítica, aplicou-se o critério de Gerber para determinar os coeficientes de segurança. A linha de carregamento apresentada na Figura 43 juntamente com a curva de fadiga, ilustra o estado de carregamento em função das tensões desenvolvidas no componente.

Figura 43 – Curvas de falha.



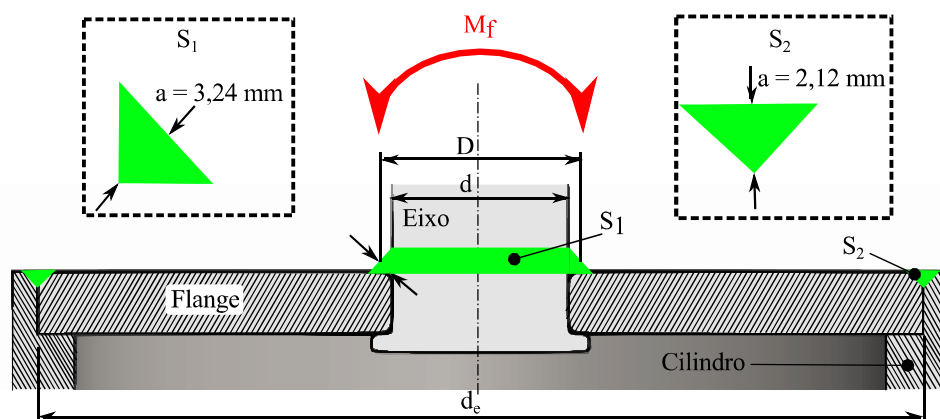
Neste caso, como não se tem a componente de tensão média, o coeficiente de segurança em fadiga segundo a curva de Gerber, é dado pela Equação 5.23.

$$N_f = \frac{S'_e}{\sigma'_a} = \frac{146,23}{9,87} = 14,82 \quad (5.23)$$

Quanto ao escoamento no primeiro ciclo, o coeficiente de segurança é dado por: $N_{fy} = \frac{S_y}{\sigma'_a} = 21,27$. Isso mostra que o componente está apto para desempenhar sua função em operação.

Ainda convém lembrar que o cilindro mestre foi projetado como sendo uma única peça, porém agora será apresentado o desenvolvimento e dimensionamento dos cordões de solda que irão unir os componentes que compõem o cilindro mestre. Os locais a serem soldados, estão representados em destaque na Figura 44.

Figura 44 – Dimensionamento dos cordões de solda.



Utilizando a metodologia descrita por NIEMANN (1971), a tensão ϱ nos cordões de solda é calculada em função do tipo de solicitação a que estão submetidos e é dado pelas seguintes expressões:

- (a) Para cordões submetidos a tração, compressão ou cisalhamento.

$$\varrho_1 = \frac{P}{a \times l_n} \leq \varrho_{ad} \quad (5.24)$$

onde P é a força, a é a garganta do cordão, l_n é o comprimento do cordão e ϱ_{ad} é a tensão admissível do metal base.

- (b) Para cordões submetidos a flexão.

$$\varrho_2 = \frac{M_f}{W_c} \leq \varrho_{ad} \quad (5.25)$$

onde M_f é o momento fletor e W_c é o módulo de resistência do cordão.

(c) Cordões submetidos a amplitude de variação de tensão.

$$\varrho_a = \varrho - \varrho_m \leq \varrho_{a,ad} \quad (5.26)$$

Dessa forma, o cordão S_1 representado na Figura 44 está submetido a flexão, portanto aplicando a Equação 5.25 foi possível determinar a tensão. Assumindo o menor momento de inércia (do eixo) e a maior distância até a linha neutra, tem-se:

$$W_c = \frac{\pi(d^4)}{32D} = \frac{\pi 0,0282^4}{32 \times 0,03278} = 1,89 \times 10^{-6} m^3 \quad (5.27)$$

$$\varrho_2 = \frac{17,44}{1,89 \times 10^{-6}} = 9,23 \text{ MPa} \quad (5.28)$$

Como se trata de um componente cujas solicitações são cíclicas, a tensão admissível nos cordões é dada pela Equação 5.29.

$$\varrho_{ad} = v_1 v_2 S'_e \quad (5.29)$$

em que: v_1 e v_2 são coeficientes relativos a tensão admissível em função do tipo de junta e estão disponíveis no Apêndice D. Já S'_e é o limite de fadiga corrigido do metal base

$$\varrho_{ad} = 0,7 \times 0,5 \times 146,23 = 51,18 \text{ MPa} \quad (5.30)$$

a razão entre ϱ_{ad} e ϱ_2 fornece um CS 5,54, tendo em vista que os valores v_1 v_2 e S'_e foram adotados de maneira a prevalecer a segurança, o CS calculado está adequado para o projeto.

O dimensionamento da solda S_2 foi feito de forma análoga a S_1 , diferindo apenas no tipo de junta e cordão, que neste caso foi utilizado uma junta de topo com cordão em "V" (Figura 44). Assim a tensão atuante no cordão é dado por:

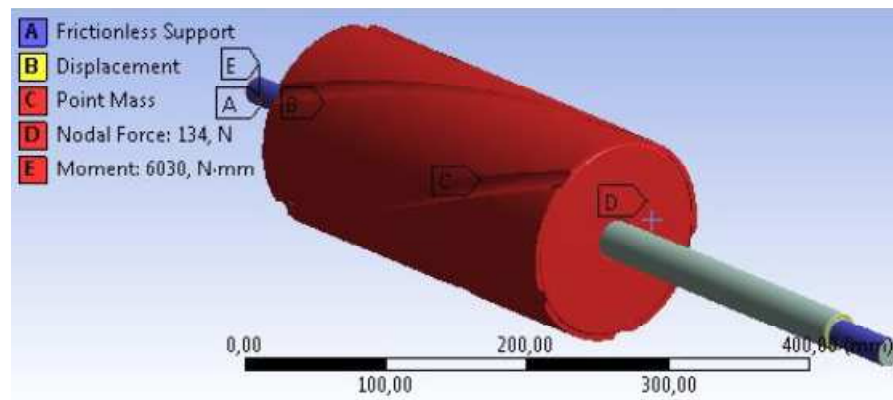
$$W_c = \frac{\pi(d_e^4)}{32d_e} = \frac{\pi 0,142^4}{32 \times 0,142} = 2,81 \times 10^{-4} m^3 \quad (5.31)$$

$$\varrho_2 = \frac{17,44}{2,81 \times 10^{-4}} = 0,062 \text{ MPa} \quad (5.32)$$

e a $\varrho_{ad} = 1,1 \times 0,5 \times 146,23 = 80,43 \text{ MPa}$, portanto $\varrho_2 \ll \varrho_{ad}$ o que de fato mostra que o cordão de solda resiste as solicitações impostas sobre ele.

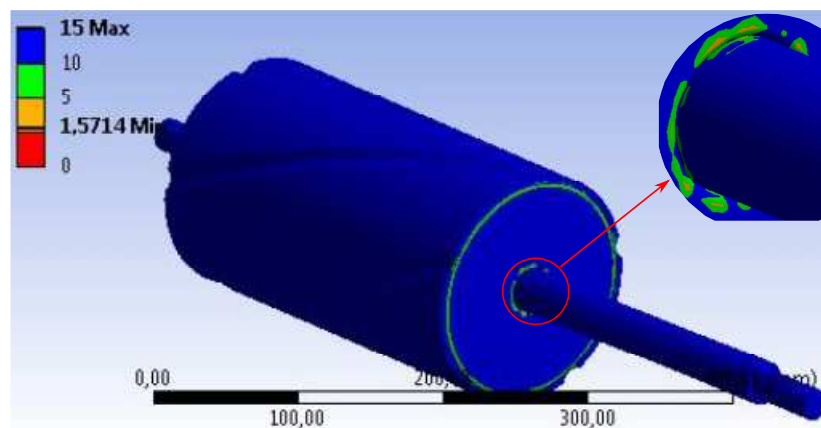
O fato do cilindro ser formado por uma geometria complexa levou-se a verificação por elementos finitos. A Figura 45 apresenta as condições impostas sobre o modelo para realização das simulações.

Figura 45 – Configuração para análise do cilindro mestre.



Com finalidade de simular fielmente o comportamento em serviço do cilindro mestre, algumas restrições foram impostas. A movimentação no sentido axial foi restringida. Ambas as extremidades receberam um suporte que permitia apenas a rotação do cilindro mestre, exercendo a função dos mancais de rolamento. Quanto ao carregamento, aplicou-se um momento torsor com magnitude de 6030 Nmm . Também foi aplicada uma força de 134 N referente a quebra de quatro frutos simultaneamente, essa força foi distribuída em 8 nós na região de aplicação da carga "P" mostrada anteriormente na Figura 42.

Figura 46 – Coeficiente de segurança em fadiga do cilindro mestre.

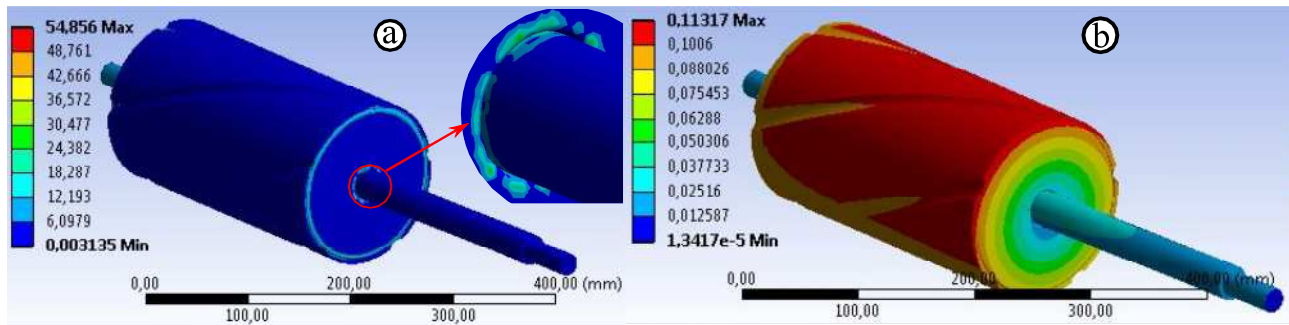


Nota-se que os pontos A e B destacados anteriormente como potencialmente críticos, são também relevantes na simulação por elementos finitos.

Os resultados das simulações são apresentados na Figura 46, Figura 47-a e Figura 47-b. O coeficiente de segurança em fadiga para o critério de Gerber é de aproximadamente 10 nos locais de soldagem, nos demais pontos esse valor sobe para 15. Também a deformação máxima é de aproximadamente $0,113 \text{ mm}$ e a tensão máxima segundo o critério de von Mises é de $54,856 \text{ MPa}$. Os resultados obtidos são considerados satisfatórios, ou seja, o cilindro é capaz de desempenhar sua função com segurança.

A fixação do cilindro mestre na carcaça da máquina será feita por meio de mancais flangeados de rolamentos. Os mancais e rolamentos escolhido, e que atendem as premissas

Figura 47 – Simulação do cilindro mestre. (a) Tensão equivalente de von Mises (MPa). (b) Deformação total (mm).

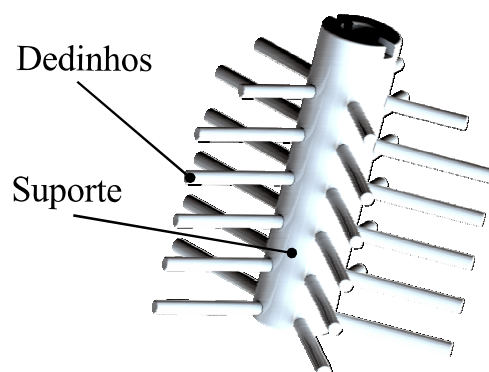


sas do projeto, são fabricados pela SKF e designados por: mancal *Flanged Y-TECH*; rolamento de esferas de contato angular autocompensador, modelo *FYTBK20TF*.

5.3.4 Dimensionamento dos Dedinhos

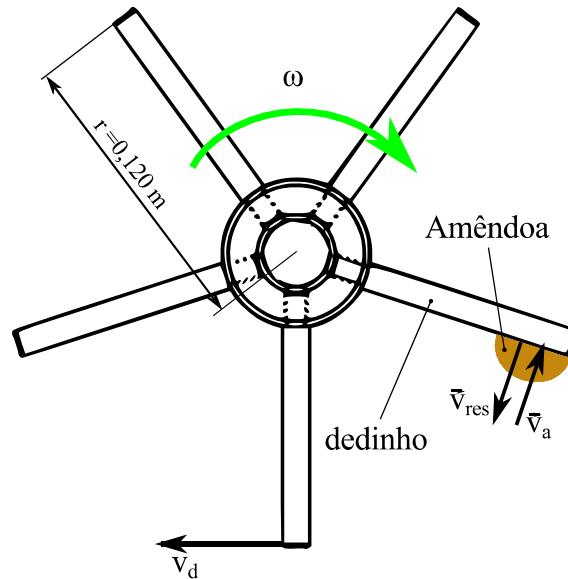
O dispositivo em questão foi desenvolvido com intuito de promover pequenos impactos nos frutos já quebrados afim de induzir a liberação das amêndoas que por ventura ainda estejam grudadas. O mecanismo pode ser visto na Figura 48, onde os dedinhos são acoplados à um suporte cilíndrico que por sua vez é encaixado com interferência no eixo principal.

Figura 48 – Configuração de trabalho dos dedinhos.



Com os dedinhos dimensionados, deve-se verificar e garantir que ao se chocarem contra o mecanismo as amêndoas não irão se partir, devido a força de impacto gerada pelo movimento de rotação imposto sobre os dedinhos.

Figura 49 – Representação da configuração dos dedinhos (vista superior) e impacto com a amêndoa.



A rotação (ω) máxima imposta sobre o eixo da máquina será de 1705 rpm , portanto a velocidade tangencial (v_d) na ponta dos dedinhos será de $21,43 \text{ m/s}$. A representação esquemática do momento da colisão pode ser vista na Figura 49. Através do princípio do impulso e quantidade de movimento descrita pela Equação 5.33 obteve-se a força atuante no momento do impacto.

$$m_a \vec{v}_a + \vec{F} \Delta t = m_a \vec{v}_{res} \quad (5.33)$$

em que: m_a é a massa da amêndoa⁶. Supondo um choque totalmente elástico, logo após a colisão a amêndoa se move com a mesma velocidade (relativa) do dedinho. Portanto, tem-se:

$$v_a = v_d \text{ e } \vec{v}_a = -\vec{v}_{res} \quad (5.34)$$

em que: v_a e v_{res} são velocidades da amêndoa relativas ao dedinho no momento antes e imediatamente depois do impacto.

Substituindo os valores na Equação 5.33 tem-se:

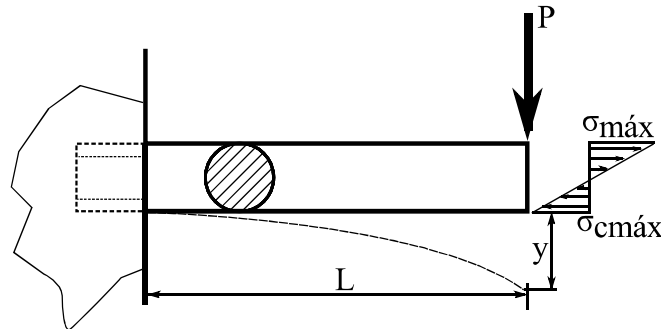
$$F = \frac{2m_a v_d}{\Delta t} = \frac{2 \times 0,0035 \times 21,43}{0,01} \approx 15 \text{ N}$$

Para garantir que o impacto das amêndoas e cascas sobre os dedinhos não provoquem a falha dos mesmos, utilizou-se a força de impacto proveniente da análise feita

⁶ Uma noz pecã contém duas amêndoas, portanto para os cálculos considerou-se apenas a massa de uma amêndoa.

anteriormente para a próxima etapa do dimensionamento. Pela disposição do dedinho no suporte, o mesmo pode ser considerado como sendo uma viga engastada (Figura 50) com o carregamento $P = F = 15\text{ N}$.

Figura 50 – Viga em balanço carregada



Através da Equação 5.35 a tensão máxima desenvolvida no dedinho foi obtida. A distribuição de tensão pode ser vista na Figura 50. O comprimento L do dedinho é 61 mm . Já o diâmetro é 10 mm , portanto tem-se que uma inércia $I = \frac{\pi r^4}{4} \approx 4,91 \times 10^{-10}\text{ m}^4$.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_{cm\acute{a}x} = \frac{M_f c}{I} = \frac{(15 \times 0,061) \times 0,005}{4,91 \times 10^{-10}} \approx 9,32\text{ MPa} \quad (5.35)$$

em que: c representa a distância da fibra mais externa sendo solicitada. Portanto, sabendo que a resistência à tração do nylon 6 é de aproximadamente $65,7\text{ MPa}$, tem-se que os dedinhos estão dentro do limite de resistência suportado pelo material.

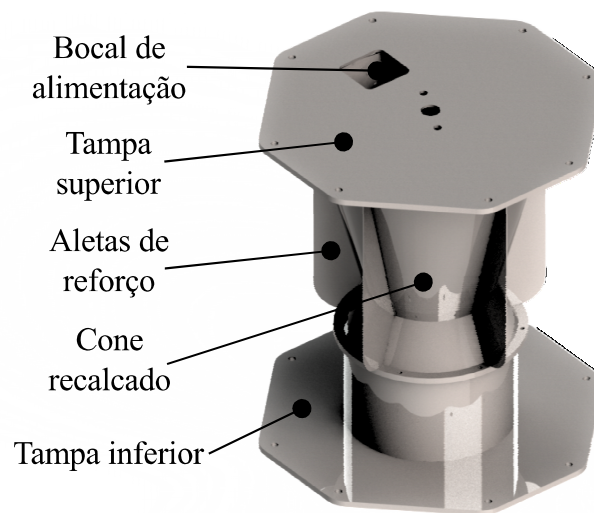
5.3.5 Verificação do Estado de Solicitação da Carcaça

A carcaça do decortificador é um dos elementos geometricamente mais complexo da máquina. O fato do material utilizado na fabricação do cone possuir recalques (ressaltos), torna o dimensionamento analítico muito árduo e com grandes chances de erros. Portanto para garantir a confiabilidade do equipamento optou-se por verificar-se as dimensões atribuídas por meio de elementos finitos.

Apresenta-se na Figura 51 as peças que constituem o decortificador. O bocal de alimentação, como o nome sugere, é o local onde os frutos entrariam para iniciar o processo de descasque. A tampa superior e inferior são os componentes cuja finalidade é fechar a carcaça e receber a fixação dos mancais. As aletas estão dispostas estrategicamente como elementos de reforço do cone recalcado, que por sua vez é o componente cuja função é contribuir para a quebra do fruto. Todos os constituintes serão fabricado em aço inoxidável 304L.

1. Tampa superior e inferior.

Figura 51 – Carcaça do decortificador.



A forma geométrica das tampas foram pensadas de forma a oferecer resistência suficiente para receber os mancais de rolamento. Também pensando na fabricação, não possui muitos detalhes e são completamente construídas com poucas etapas de fabricação.

O comportamento em serviço dos componentes em questão estão representados na Figura 52 e Figura 53, sendo os resultados expressões por meio da tensão equivalente de von Mises e deformação total.

Para análise por elementos finitos, os componentes foram fixados através da furação dos parafusos (8 parafusos). A carga foi aplicada no centro da tampa superior e inferior, com uma magnitude de $91,71\text{ N}$ e $55,44\text{ N}$ respectivamente. A carga é proveniente da reação dos mancais (R_{v_1} e R_{v_2}) (Figura 42), que estão suportando o peso do cilindro mestre.

Figura 52 – Simulação da tampa superior. (a) Tensão equivalente de von Mises (MPa). (b) Deformação total (mm).

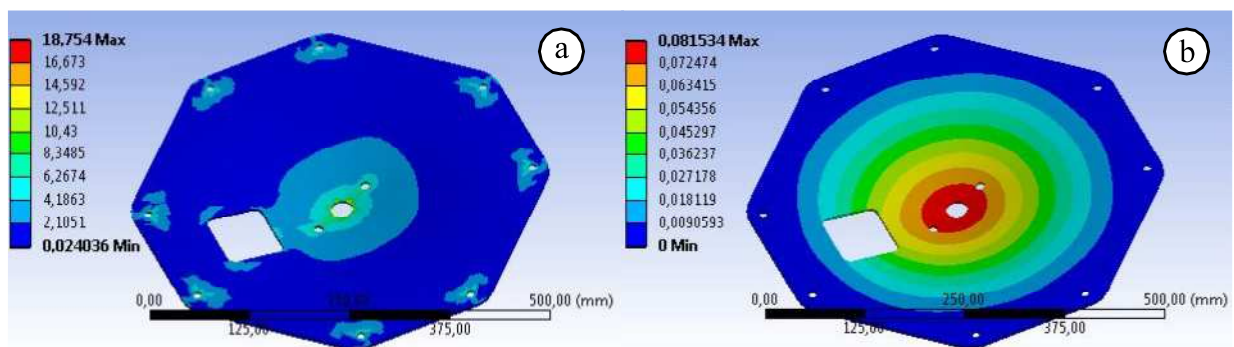
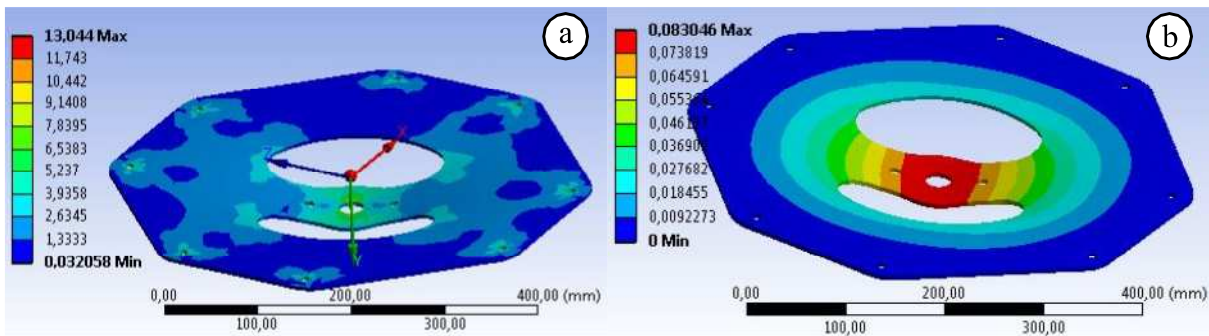


Figura 53 – Simulação da tampa inferior. (a) Tensão equivalente de von Mises (MPa). (b) Deformação total (mm).



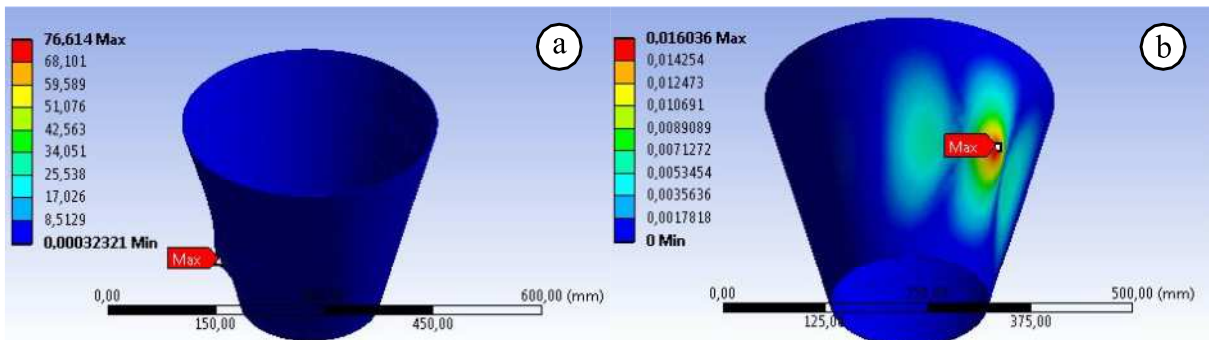
Nota-se que a máxima tensão nas tampas, segundo o critério de von Mises é 18,75 MPa e 13,04 MPa para a tampa superior e inferior respectivamente. Já a deformação total para ambas as peças esta variando numa faixa de 0 a 0,083 mm , portanto o material e a geometria satisfazem bem o requisito de segurança.

2. Cone recalçado

Considerando todos os componentes da carcaça, o cone recalçado é o que mais está sob a ação dos esforços desenvolvidos durante o processo de quebra do fruto.

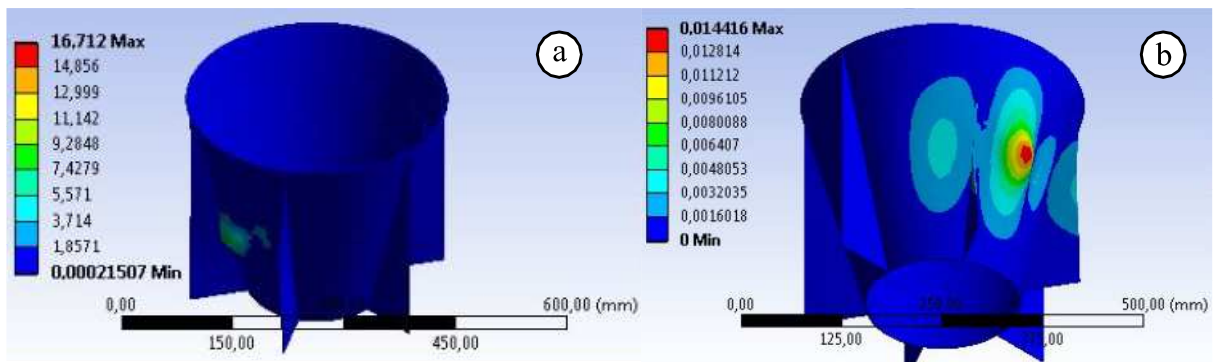
Para a simulação, as extremidades superior e inferior foram fixada em x,y e z, de forma a reproduzir seu posicionamento em serviço. A carga de 134 N , referentes ao esforço para romper 4 frutos ao mesmo tempo, foi aplicada pontualmente na superfície (plano médio) do cone recalçado. A Figura 54 e Figura 55 mostram os resultados da simulação com este componente.

Figura 54 – Simulação do cone recalçado. (a) Tensão equivalente de von Mises (MPa). (b) Deformação total (mm).



Pelos resultados apresentados durante as simulações, verifica-se que o componente tem total segurança em operação. As aletas implementadas no cone é mais por uma questão de rigidez estrutural, no entanto nota-se que a mesma contribuiu significa-

Figura 55 – Simulação do cone recalcado com aletas de reforço. (a) Tensão equivalente de von Mises (MPa). (b) Deformação total (mm).

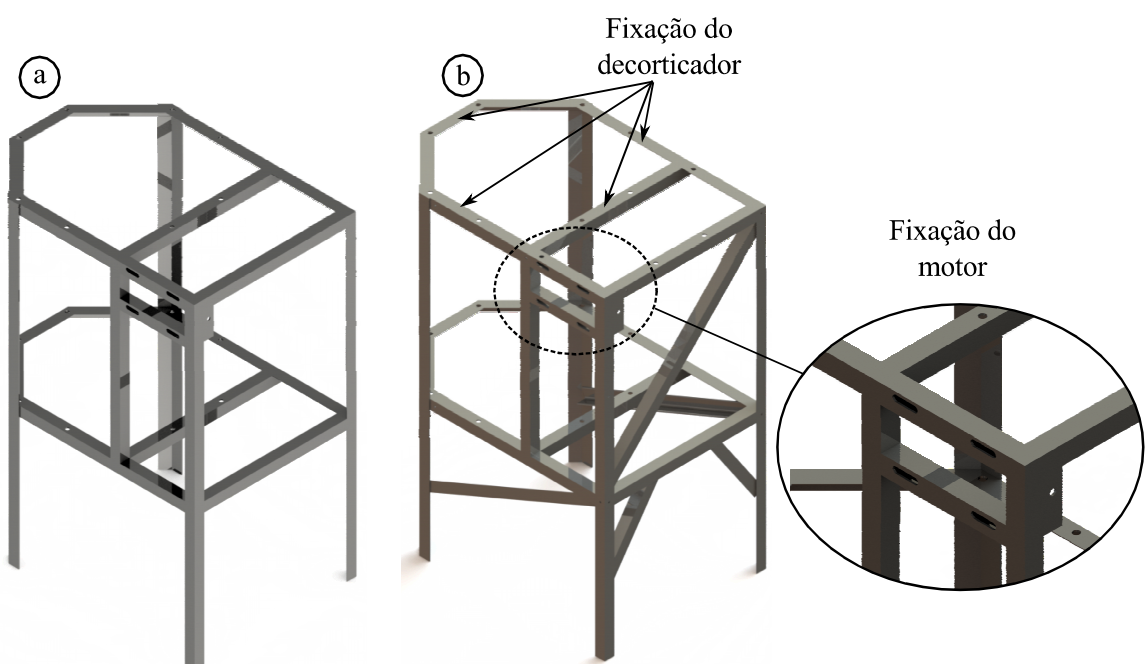


tivamente para a diminuição da tensão de von Mises e deformação total, sendo estas 16,71 MPa e 0,014 mm respectivamente.

5.3.6 Dimensionamento da Estrutura

A norma é bem explícita quando aos materiais que podem ser utilizados em máquinas desenvolvidas para a indústria alimentícia. Os componentes de máquina que não estiverem em contato com alimento podem ser fabricados em materiais não especiais, por exemplo aços não ligados. No entanto para este projeto, a estrutura do decortificador será fabricado em aço inoxidável ASTM A276 - 304L, cujas suas propriedades já foram descritas anteriormente.

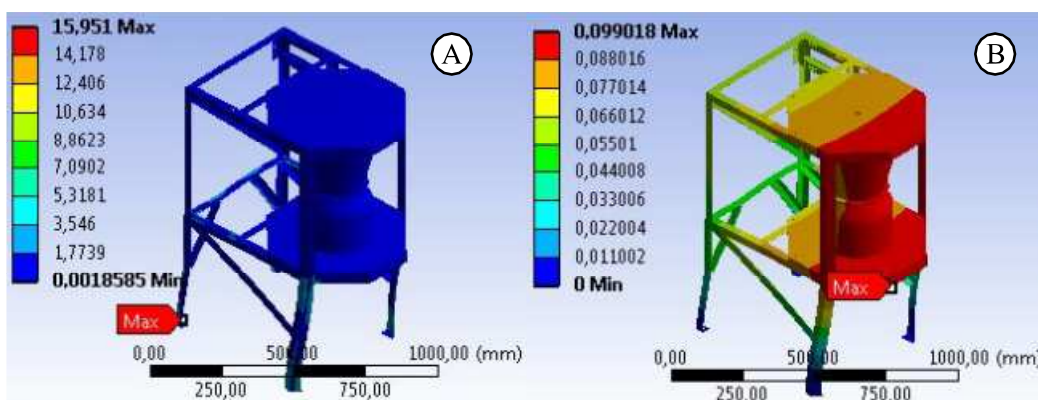
Figura 56 – Estrutura do decortificador.



A estrutura do decortificador não é de forma alguma o elemento mais crítico neste

projeto, como pode ser visto na análise apresentada na Figura 57, onde a tensão máxima de von Mises é $15,95 \text{ MPa}$ e aproximadamente $0,1 \text{ mm}$ de deformação total. Estaticamente a estrutura só deve resistir ao seu próprio peso, ao peso do motor (15 kg) e ao peso das nozes que se encontram na seção de alimentação e rejeitos ⁷ (máximo 10 kg). Portanto, na análise por elementos finitos, a estrutura foi restringida (x,y e z) pelos parafusos nos quatro pés e recebeu um carregamento de 25 kg referente as massa descritas anteriormente.

Figura 57 – A) Tensão equivalente de von Mises (MPa). B) Deformação total da estrutura (mm).



No dimensionamento da estrutura, o maior cuidado que se tomou, foi quanto aos modos de vibração e conseqüentemente ao fenômeno de ressonância. Inicialmente realizou-se uma análise modal por elementos finitos da estrutura apresentada na Figura 56. Os resultados mostraram uma deformação excessiva em alguns pontos e por isso houve a necessidade de retrabalhar a disposição dos elementos estruturais.

Apresenta-se na Figura 56-b o resultado do retrabalho na estrutura inicial, onde optou-se por posicionar alguns elementos estruturais de forma a conferir mais rigidez. As duas pernas da estrutura localizadas próximo aos pontos de fixação do decortificador são componentes fabricados de chapas dobradas (3 mm). Já os demais elementos estruturais são fabricados em perfis do tipo cantoneira, sendo esses de abas iguais $ISO - 30 \times 3 \text{ mm}$.

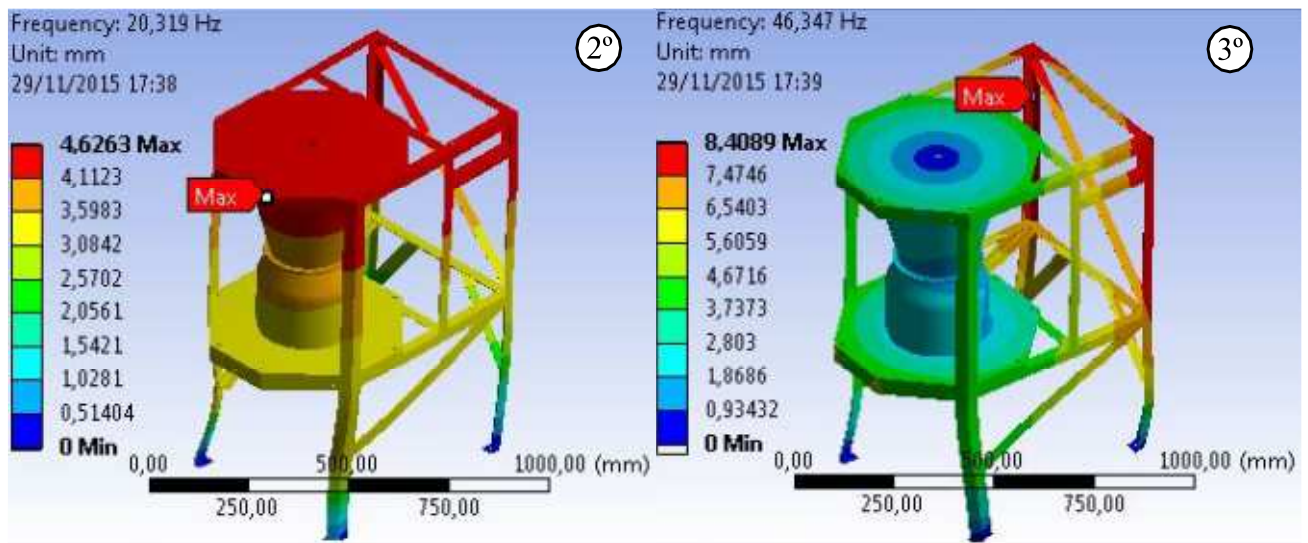
Partindo para a segunda análise modal, agora porém com a estrutura reforçada, foram determinadas as 6 primeiras frequências naturais da máquina (ver Tabela 15), das quais duas delas, sendo à segunda ($20,319 \text{ Hz} \approx 1219 \text{ rpm}$) e à terceira ($112,81 \text{ Hz} \approx 2780 \text{ rpm}$), estão apresentadas na Figura 58. Para análise modal, o modelo foi fixado pelos parafusos nas 4 pernas da estrutura.

⁷ São considerados rejeitos neste caso, partículas estranhas e frutos com diâmetro inferior a 15 mm

Tabela 15 – Modos de vibração.

Modo	Frequência (Hz)
1º	14,182
2º	20,319
3º	46,347
4º	71,519
5º	104,33
6º	112,81

Figura 58 – 2º e 3º modo de vibração.



Assim a partir das simulações, admite-se um bom desempenho da estrutura em serviço, visto que a frequência da fonte de excitação (motor) é de aproximadamente 28,41 Hz (1705 rpm).

5.3.7 Dimensionamento dos Elementos de Máquinas

1. Parafusos.

Neste projeto os parafusos têm uma característica essencialmente de fixadores, ou seja, são apenas alguns destes elementos que estão sofrendo esforços consideráveis. A Tabela 16 apresenta os tipos e características dos parafusos utilizados neste projeto.

Tabela 16 – Parafusos.

Tipo	Comprimento (mm)	Qtd.	Aplicação
$M5 \times 0,8$	10	24	fixação do acabamento externo I e II
$M6 \times 1$	16	7	fixação dos flanges intermediários
$M10 \times 1,5$	30	24	fixação das tampas, tampão e do motor
$M12 \times 1,75$	40	4	fixação dos mancais

Os parafusos são em aço inoxidável 304L, acabamento passivo, dimensões de acordo com a norma *DIN933/ISO4017* e perfil da rosca estabelecido pela norma *DIN13(ISO965)*.

2. Chavetas.

O torque do motor será transmitido para o cilindro mestre através de uma sistema de correias e polias, no entanto um dos elementos que efetivamente transmitem o torque disponível na polia (ou cubo) para o eixo são as chavetas. Portanto o dimensionamento da chaveta para o cilindro mestre pode ser visto logo a seguir.

A seção transversal e a profundidade dos assentos das chavetas são padronizados pela *American National Standards Institute (ANSI)* e *International Organization for Standardization (ISO)*, assim a única dimensão à ser definida é o comprimento da chaveta.

Por questões de padronização optou-se por fabricar a chaveta em aço inoxidável 304L laminado a frio, com um comprimento de 25 mm.

Como o torque no cilindro mestre é constante, a componente de tensão (cisalhamento) de amplitude é nula, portanto a tensão média de cisalhamento agindo sobre a chaveta é dado por:

$$\tau_m = \frac{F_a}{A_{cis}} = \frac{M_t}{r A_{cis}} \quad (5.36)$$

onde A_{cis} é área da chaveta sob cisalhamento; F_a é a força cisalhante obtida em função do momento tursor (M_f) disponível no eixo e r é o raio do eixo. Tem-se que a seção transversal da chaveta é de 6x18 mm em consequência $A_{cis} = 150 \text{ mm}^2$. Portanto a tensão cisalhante na chaveta é:

$$\tau_a = \frac{6,18}{0,01 \times 150} = 4,12 \text{ MPa} \quad (5.37)$$

Para encontrar um coeficiente de segurança para fadiga por cisalhamento para a chaveta, as tensões de von Mises para a componente de amplitude foi calculada pela Equação 5.38

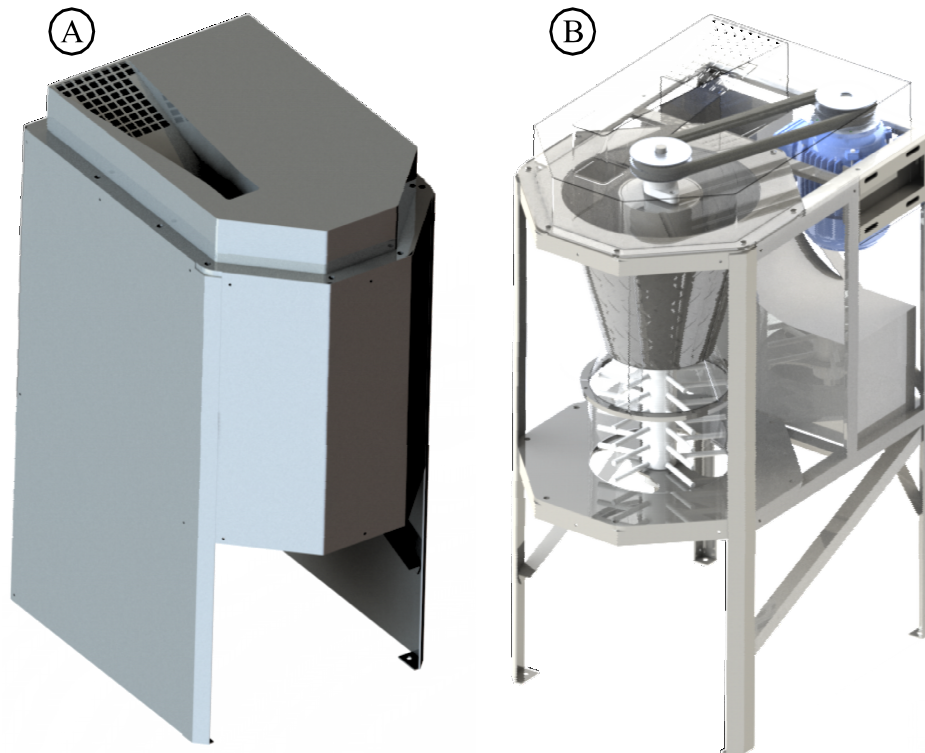
$$\sigma'_a = \sqrt{3\tau_a^2} = 7,13 \text{ MPa} \quad (5.38)$$

Da subseção 5.3.3 sabe-se que $S_e = 146,23$, portanto aplicando os valores na Equação 2.20, o coeficiente de segurança para a chaveta é de aproximadamente 20,50. Para a chaveta o eixo do motor, não foi feito o dimensionamento, uma vez que o motor já vem de fabrica com este componente.

5.3.8 Montagem Final

A Figura 59-A ilustra o equipamento pronto para entrar em operação, ou seja, todos os componentes estão posicionados em seus respectivos lugares. Já a Figura 59-B mostra o coração do equipamento, isto é, o componente responsável por quebrar e descascar os frutos.

Figura 59 – A) Conjunto decortificador de noz pecã. B) Detalhe decortificador.

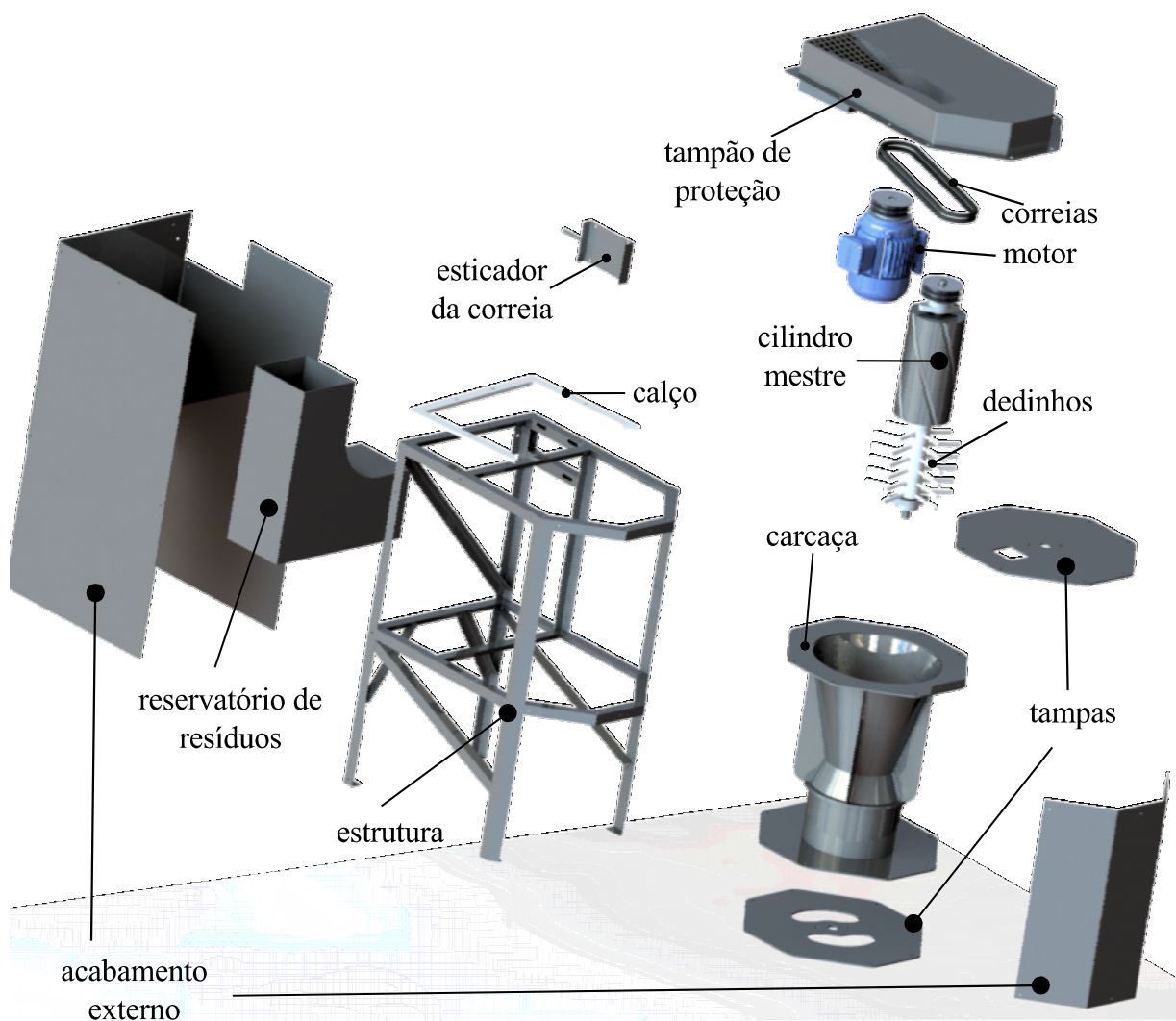


O vão livre na parte inferior do equipamento é proposital, pois ao posicionar o decortificador na linha de beneficiamento, o mesmo deve ficar situado acima de uma esteira rolante, para que os frutos descascados possam ser transportados para a próxima etapa do beneficiamento. Apresenta-se na Figura 60 uma representação explodida dos principais elementos que compõem o conjunto do decortificador.

As principais características do equipamento são apresentadas a seguir:

- Potência instalada: 1,5 CV
- Modelo: DNP001
- Capacidade: 100 kg/h
- Peso total: 125 kg
- Dimensões: 1100 mm × 734 mm × 500 mm
- Material: Aço inoxidável 304L.

Figura 60 – Principais componentes do decortificador de noz pecã.



5.3.9 Procedimentos de Operação e Manutenção

É importante que a execução dos procedimentos descrito abaixo sejam realizadas por profissionais capacitados e legalmente habilitados. Para a montagem deve-se valer da seguinte ordem:

1. Coloque a estrutura em um local de modo a ficar bem apoiada ao solo;
2. Monte a tampa inferior juntamente com a carcaça na estrutura;
3. Em seguida monte os dedinhos no suporte.
4. Acople o suporte ao cilindro mestre.
5. Monte a tampa superior juntamente com o mancal de rolamento e polia no conjunto do item anterior;

6. Insira o conjunto montado do item anterior dentro da carcaça e parafuse;
7. Coloque o mancal de rolamento inferior e fixe todos os parafusos da carcaça;
8. Acople o motor, posicione as correias e faça o tensionamento das mesmas através do esticador;
9. Insira o reservatório de resíduos;
10. Fixe o tampão de proteção. Atente para o posicionamento do reservatório de resíduos;
11. Coloque acabamento externo e fixe com os parafusos.
12. Com auxílio de um equipamento de manuseio de carga, posicione o decortificador em seu devido lugar na linha de produção e fixe as 4 pernas ao piso.

Nas manutenções do equipamento, sempre que detectado defeito em peça ou componente que comprometa a segurança, deve ser providenciada sua reparação ou substituição por outra peça ou componente original, de modo a garantir as funcionalidades do equipamento. Os rolamentos não devem ser lubrificados (ou engraxados), pois são blindados para evitar possíveis contaminações. No caso de perda da funcionalidade os rolamentos deve ser trocados.

Para a realização de inspeções, manutenções e outras intervenções necessárias, é permitido o funcionamento do equipamento desde que atenda as exigências da NR-12.

5.3.10 Estimativa de Custos

Dentre todas as etapas do desenvolvimento do projeto, a estimativa de custo é uma das mais importantes, pois nesta etapa um projeto pode ser viabilizado ou descartado.

São diversos fatores que contribuem para um projeto ter um baixo custo de implementação. O processo de fabricação, os materiais, as tolerâncias dimensionais e o grau de automatização são os destaques na elevação do custo, no entanto cabe ao projetista determinar as melhores estratégias para que se tenha um custo *versus* benefício aceitável pelo mercado consumidor.

Neste projeto as escolhas foram tomadas com base, principalmente nas normas da indústria alimentícia. A Tabela 17 traz à tona os custos envolvidos no desdobramento do decortificador, na fase de produção.

É importante salientar que os custos apresentados são referentes aos valores encontrados no varejo. Uma produção em escala e com métodos bem definidos, tenderiam a baixar o valor gasto na fabricação.

Tabela 17 – Relatório de custos.

Cód.	Peça	Processo ¹	Mat.	Peso (kg)	Qtd.	(R\$)	Fabric.(R\$)	Total (R\$)
DNP001	Cone recalc.	C-D-S	Chapa	4,425	1	18,00	5,00	84,65
DNP002	Cone inf.	C-D-S	Chapa	0,819	1	18,00	5,00	14,73
DNP003	Prot. dos dedinhos	C-D-S	Chapa	1,829	1	18,00	5,00	32,92
DNP004	Flange extre. sup.	C-D-S	Chapa	3,643	1	18,00	10,00	65,57
DNP005	Flange extre. inf.	C-D-S	Chapa	3,643	1	18,00	5,00	65,57
DNP006	Tampa sup.	C-D-S	Chapa	7,004	1	18,00	5,00	126,07
DNP007	Tampa inf.	C-D-S	Chapa	6,266	1	18,00	5,00	112,788
DNP008	Reforço do cone	C-D	Chapa	0,249	5	18,00	5,00	22,452
DNP009	Flange interm.	C-D-F	Chapa	0,457	2	18,00	5,00	16,442
DNP010	Estrutura	C-D-F	Perfil	17,653	1	25,00	30,00	441,32
DNP011	Eixo inf. do CM ²	U	Barra	1,335	1	25,00	20,00	33,36
DNP012	Flange do CM ²	U	Chapa	1,167	2	18,00	10,00	42,02
DNP013	Eixo sup. do CM ²	U	Barra	0,304	1	25,00	20,000	7,61
DNP014	Sup. dos dedinhos	U	Tube	0,666	1	60,00	15,00	39,945
DNP015	Dedinhos I	R	Barra	0,008	5	60,00	15,00	2,340
DNP016	Dedinhos II	R	Barra	0,011	35	60,00	105,00	23,08
DNP017	Cilindro Mestre	U	Barra	9,256	1	25,00	60,00	231,39
DNP018	Mancal ³	-	-	0,500	2	40,00	-	80,00
DNP019	Rolamento ³	-	-	0,250	2	40,00	-	80,00
DNP020	Polia do CM, ^{2,3}	-	-	0,666	1	9,00	-	6,00
DNP021	Motor elétrico ³	-	-	15,00	1	950,00	-	950,00
DNP022	Polia do motor ³	-	-	0,673	1	9,00	-	6,06
DNP023	Esticador	C-S-F	Chapa-Perfil	0,645	1	18,00	20,00	11,62
DNP024	Tampão	C-D-F-S	Chapa	10,165	1	18,00	200,00	182,97
DNP025	Calço	-	Chapa	0,494	1	60,000	15,00	29,633
DNP026	Acabamento ext. I	-	Chapa	10,317	1	18,00	15,00	185,77
DNP027	Acabamento ext. II	-	Chapa	2,557	1	18,00	25,00	46,03
DNP028	Correia ³	-	-	0,981	2	10,000	-	20,00
DNP029	Reservatório resíduos	-	Chapa	4,870	1	18,00	30,00	87,67
DNP030	Paraf. ³ M5 × 0,8 – 10 mm	-	-	-	24	0,639	-	15,35
DNP031	Paraf. ³ M6 × 1 – 16 mm	-	-	-	7	0,750	-	5,25
DNP032	Paraf. ³ M10 × 1,5 – 30 mm	-	-	-	30	3,575	-	107,25
DNP033	Paraf. ³ M12 × 1,75 – 40 mm	-	-	-	4	5,568	-	22,27
Total				-	141	-	630,00	3198,06

¹(S) Soldagem; (C) Corte;(D) Dobra; (U) Usinagem; (R) Rosqueamento; (F) Furação. ²Cilindro Mestre.

³Comprado

Além do custo de produção, ainda se tem outros tipos de custos envolvidos. Todo o processo de pesquisa e desenvolvimento para se chegar na concepção da máquina e os custos pós produção, ou seja, embalagem e transporte são fatores que tem uma contribuição direta para o aumento do custo final. Portanto estima-se o custo do Decortificador de Noz Pecã entorno de 6 mil reais.

6 Conclusões

Neste trabalho foi feito o estudo da caracterização mecânica da noz pecã para fins de beneficiamento e o projeto de um decortificador. Das amostras ensaiadas, pode-se dizer que a noz pecã possui um formato aproximado de um elipsoide, uma proteção externa muito dura cuja a espessura varia de $0,90\text{ mm}$ a $1,22\text{ mm}$. Já o endosperma, consiste numa amêndoa frágil, com sabor exótico, doce e amanteigado, no entanto essas características podem variar de acordo com o processo a que são submetidas. Neste estudo, foram investigados frutos adquiridos de uma fazenda em Santa Maria-RS, dos quais os dados indicam ser de cultivares Moneymaker e Importada. Os frutos foram caracterizados mecanicamente e visualmente com objetivo de estimar o coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e entender os efeitos da umidade sobre o comportamento mecânico dos frutos submetidos ao processo de descasque. Em função das características e parâmetros encontrados um decortificador foi projetado visando o aumento de eficiência no processo, bem no aumento do grau de automatização nos processos de beneficiamento do fruto.

Os resultados obtidos mostraram que os frutos possuem uma alta resistência mecânica, principalmente quando desidratados e solicitados axialmente. No entanto as concepções propostas apresentaram um bom desempenho quanto ao ato de romper e separar o endocarpo. Além disso, tem-se as seguintes conclusões:

- O fruto da noqueira pecã tem a seguinte estrutura: Endocarpo (casca), endosperma (amêndoa) e membrana. A membrana é um elemento que subdivide a amêndoa no plano médio longitudinal.
- A noz pecã possui uma porção de cerca de 4 mm nas extremidades que lhe confere uma alta resistência mecânica dificultando a liberação do endosperma. Assim verificou-se que o corte de aproximadamente $4,79\text{ mm}$ de cada extremidade não traz prejuízos físicos à amêndoa e faz com que o processo de descasque seja mais eficaz.
- Os ensaios de compressão no fruto (íntegro) mostram que a força média encontrada para ruptura do endocarpo no sentido axial é de $659,51\text{ N}$ com deformação média de $0,04\frac{\text{mm}}{\text{mm}}$. Ao passo que os frutos passavam pelo processo de secagem, esse valor médio da força subia consideravelmente.
- A secagem associada a uma alta velocidade de avanço mostraram que a extração da amêndoa foi facilitada, porém com a secagem convencional ocorre a fragilização

das amêndoas. Para que isso não ocorra a retirada de umidade deve ser feita essencialmente da casca do fruto, submetendo a temperaturas mais altas por um baixo período de tempo.

- Os ensaios de compressão do endocarpo mostram que a 93% de confiabilidade que a membrana não contribui para o aumento de resistência do endocarpo solicitados axialmente. Já nos casos de solicitação radial, a membrana exerce uma grande influência sobre a resistência mecânica.
- O módulo de elasticidade do endocarpo é de aproximadamente $316,87 \text{ MPa}$
- O módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da amêndoa são $11,07 \text{ MPa}$ e $0,36$ respectivamente.

Quanto as concepções propostas, tem-se as seguintes conclusões

- Os indentadores cônicos, concepção 1, se mostraram bastante eficientes, principalmente o de conicidade $4^\circ, 39'$, onde 100% dos frutos ensaiados sofreram a ruptura do endocarpo. O mesmo apresentou um rendimento próximo a 70% na extração de amêndoas inteiras.
- A combinação otimizada dos parâmetros de corte das extremidades e secagem facilitam a liberação da amêndoa.
- Para fabricação de decorticadores utilizando indentadores é essencial que haja uma operação de corte das extremidades antes do descasque. Após o descasque deve também haver um mecanismo que induza a liberação das amêndoas.
- Deve haver um alto grau de automatização no equipamento para que o mesmo desempenhe bem a sua função sem comprometer a qualidade das amêndoas. Nesse sentido o custo do equipamento se torna elevado.
- A concepção 2, que utiliza um cone recalçado e um cilindro com perfil usinado se mostrou bastante produtiva na operação de ruptura do endocarpo. No pós quebra a implantação dos denominados "dedinhos" foi visivelmente eficaz, induzindo a liberação das amêndoas e aumentando a qualidade do material pós processado.
- O descasque neste tipo de equipamento é feito com os frutos inteiros, ou seja, não há a necessidade de se realizar nenhuma operação de modificação dos frutos, por exemplo, corte ou lixamento das extremidades.
- O grau de automatização empregado é muito baixo o que de fato acarreta em um custo de fabricação e operação bem mais baixo que as máquinas equipadas com indentadores. Da mesma forma a montagem e manutenção.

7 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Desenvolver o projeto em cima da concepção 1 proposta;
- Investigar os parâmetro ótimos de rotação e fluxo de alimentação do decortificador;
- Determinar qual a melhor angulação do cone recalado a fim de melhorar a eficiência;
- Testar o descasque da noz comum (chilena) utilizando o modelo em escala do decortificador;
- Projetar o sistema de alimentação do decortificador;
- Investigar qual a temperatura e tempo de secagem para que se mantenha a amêndoa dúctil e torne a casca seca e frágil;
- Determinar o coeficiente de Poisson para o endocarpo, através de ensaios de tração.

Referências

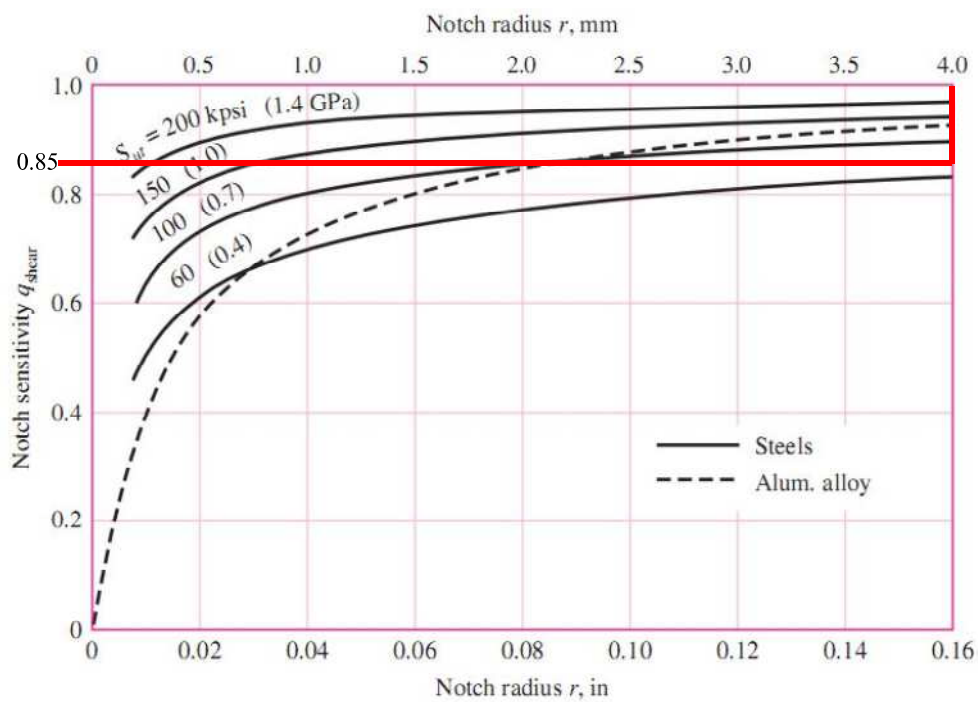
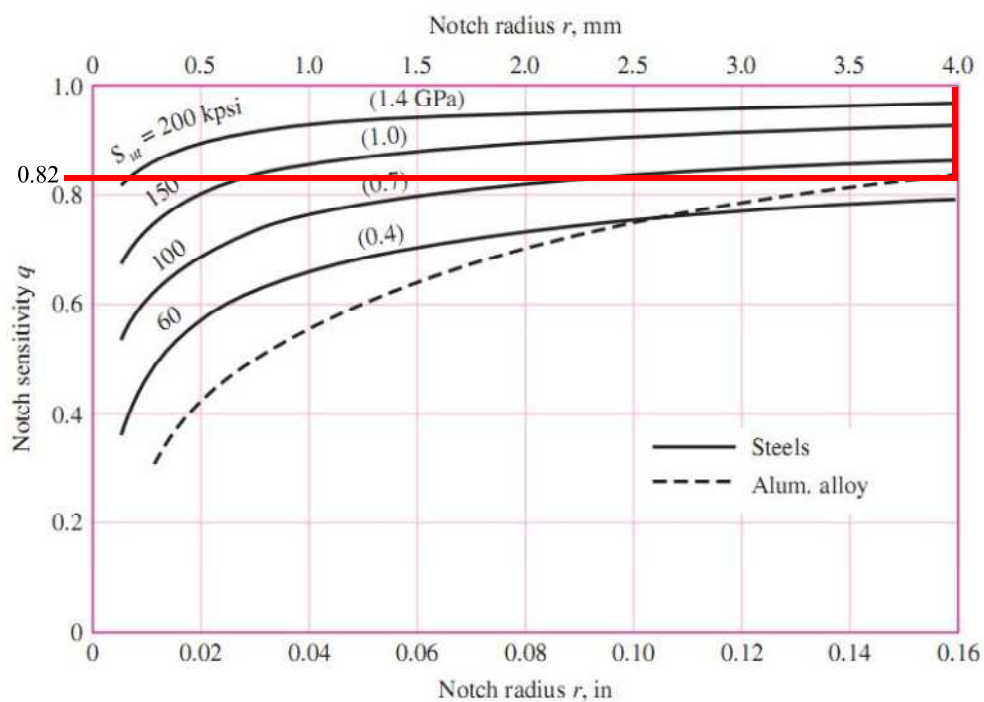
- BART-PLANGE, A. et al. Some Physical and Mechanical Properties of Cashew Nut. *International Journal of Science and Nature*, v. 3, p. 406–415, 2012. Citado na página 33.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. *Resistência dos materiais*. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1982. Citado na página 38.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. *Elementos de máquinas de Shigley*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2011. Citado na página 77.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, K. J. *Mechanical Engineering Design*. 9th. ed. [S.l.]: TataMcgraw Hill, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 39, 41, 109, 111, 113 e 114.
- BUENO, S. *Noz Pecã Desponta como Alternativa de Renda no Sul do País*. 2006. Acessado em 02 de Abril de 2015. Disponível em: <<http://www4.seagri.ba.gov.br/noticias.asp?qact=view¬id=7436>>. Citado na página 27.
- CALLISTER, W. D.; SOARES, S. M. S. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 37.
- CARPINETTI, L. C. R. *Gestão da qualidade: conceitos e técnicas*. [S.l.]: Atlas, 2010. Citado na página 52.
- COLESTINO, S. M. C. Princípios de Secagem de Alimentos. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*, n. 2176-5081, p. 50, 2010. Citado na página 33.
- CUNHA, L. B. d. *Elementos de Máquinas*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado 4 vezes nas páginas 37, 38, 39 e 41.
- DIVINUT. *A Nogueira-pecã*. 2015. Disponível em: <http://divinut.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=58>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.
- ERICKSON, M.; SANTERRE, C.; MALINGRE, M. Oxidative stability in raw and roasted pecans: chemical, physical and sensory measurements. *Journal of food science*, Wiley Online Library, v. 59, n. 6, p. 1234–1238, 1994. Citado na página 33.
- FERREIRA, A. d. H. *Dicionário aurélio eletrônico*. [S.l.]: Ed. Nova Fronteira, 1993. Citado na página 27.
- FILHO, A. C. et al. Dimensionamento amostral para avaliação da massa e diâmetro de frutos de noqueira-pecã. *Ciência Rural*, SciELO Brasil, v. 45, n. 5, 2015. Citado na página 48.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. *Ensaio dos Materiais*. 2.ed. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. 361 p. Citado na página 36.
- GONELI, D. et al. Estudo da Difusão de Umidade em Grãos de Trigo Durante a Secagem. *Ciência Tecnologia de Alimentos*, v. 27, p. 135–140, 2007. Citado na página 33.

- GOUVEIA, A.; ABATI, G. *Empresários de castanhas, nozes e frutas secas discutem ações para impulsionar o segmento*. 2013. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/noticias/empresarios-de-castanhas-nozes-e-frutas-secas-discutem-aco-es-para-impulsionar-o-segmen-to/>>. Citado na página 27.
- IBGE. *Séries Estatísticas & Séries Históricas*. 2010. Disponível em: <<http://serie-sestatisticas.ibge.gov.br/>>. Citado na página 27.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. Fundamentos do projeto de componentes de máquinas. *LTC-Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro*, v. 4, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 40.
- KIMATI, H. et al. *Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas*. [S.l.]: Agronômica Ceres, 1997. v. 2. Citado na página 31.
- KOYUNCU, M. a.; EKINCI, K.; SAVRAN, E. Cracking Characteristics of Walnut. *Biosystems Engineering*, v. 87, n. 3, p. 305–311, 2004. Citado na página 34.
- LIANG, T. A new processing system for maximizing macadamia nut kernel recovery. *Transactions of the ASAE*, 1977. Citado na página 33.
- LIANG, T.; CHIN, L.; MITCHELL, J. B. Modeling moisture influence on macadamia nut kernel recovery. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers (USA)*, 1984. Citado na página 28.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. [S.l.]: Wiley New York, 1984. v. 7. Citado na página 52.
- NIEMANN, G. Elementos de máquinas. v. 1, 2 e 3. *São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda*, 1971. Citado 3 vezes nas páginas 83, 116 e 117.
- NORTON, R. L. *Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada*. 2. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2004. 931 p. Citado 7 vezes nas páginas 36, 37, 38, 39, 40, 41 e 42.
- OLOSO, A. O.; CLARKE, B. Some Aspects of Strength Properties of Cashew Nuts. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 55, p. 27–43, 1993. Citado na página 33.
- OLUWOLE, F.; AVIARA, N.; HAQUE, M. Development and performance tests of a sheanut cracker. *Journal of food Engineering*, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 117–123, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- 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 2 vezes nas páginas 27 e 32.
- ORTIZ, E. Propriedades nutritivas e nutracêuticas das nozes. *Monografia)–Especialização em Tecnologia de Alimentos, Universidade de Santa Cruz do Sul, RG, Brasil*, 2000. Citado na página 28.
- Paralelo 30. *Qualidade*. 2015. Acessado em 05 de Abril de 2015. Disponível em: <<http://www.pecan.com.br/qualidade/>>. Citado na página 27.

- PITOL. *Noz - O Antioxidante Natural*. 2008. Acessado em 05 de Abril de 2015. Disponível em: <<http://www.nozespitol.com.br/Vbeneficios.html>>. Citado na página 27.
- PITOL, T. Gestão de riscos do trabalho numa agroindústria. *Monografia)– Graduação em Engenharia de Produção, Centro Universitário Univates*, 2011. Citado na página 28.
- 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 na página 31.
- 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 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- PROVENZA, F. Pro-tec manual do projetista de máquinas. *Editora F. Provenza, São Paulo*, 1996. Citado na página 77.
- RECKZIEGEL, P. *Efeitos Benéficos do Extrato das Cascas de Noz Pecã (Carya illinoensis) Sobre Parâmetros Bioquímicos e Comportamentais de Camundongos Expostos ao Fumo Passivo*. 96 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2011. Citado na página 32.
- RUSSEL, D. C. Cashew nut processing. *Agricultural services bulletin*, n. 6, 1979. Citado na página 34.
- SARIG, Y.; GROSZ, F.; RASIS, S. The Development of a Mechanical Cracker for Macadamia Nuts. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 25, n. 4, p. 367–374, 1980. Citado na página 34.
- SHAHIDI, F.; MIRALIKBARI, H. Tree nut oils. *Bailey's industrial oil and fat products*, Wiley Online Library, 2005. Citado na página 33.
- SILVA, J. d. S.; AFONSO, A.; FILHO, A. d. L. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. *Viçosa: Aprenda Fácil*, 2000. Citado na página 32.
- SILVA, O. R. R. F. da et al. Desenvolvimento e Avaliação de um Descascador de Amendoim. *Rev. bras. ol. fibros.*, v. 2, p. 79–88, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.
- SILVA, R. F. da; ASCHERI, J. L. R.; SOUZA, J. M. L. de. Influência do processo de beneficiamento na qualidade de amêndoas de castanha-do-Brasil. *Ciencia e Agrotecnologia*, v. 34, n. 2, p. 445–450, 2010. ISSN 14137054. Citado na página 29.
- SOLANE, R. B.; BUENO, F. d. S.; TIER, M. A. D. Projeto de uma descascador de nozes. *XXVI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia*, 2014. Citado na página 35.
- TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. Theory of elasticity. *New York*, v. 412, p. 108, 1951. Citado na página 59.
- 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 na página 31.

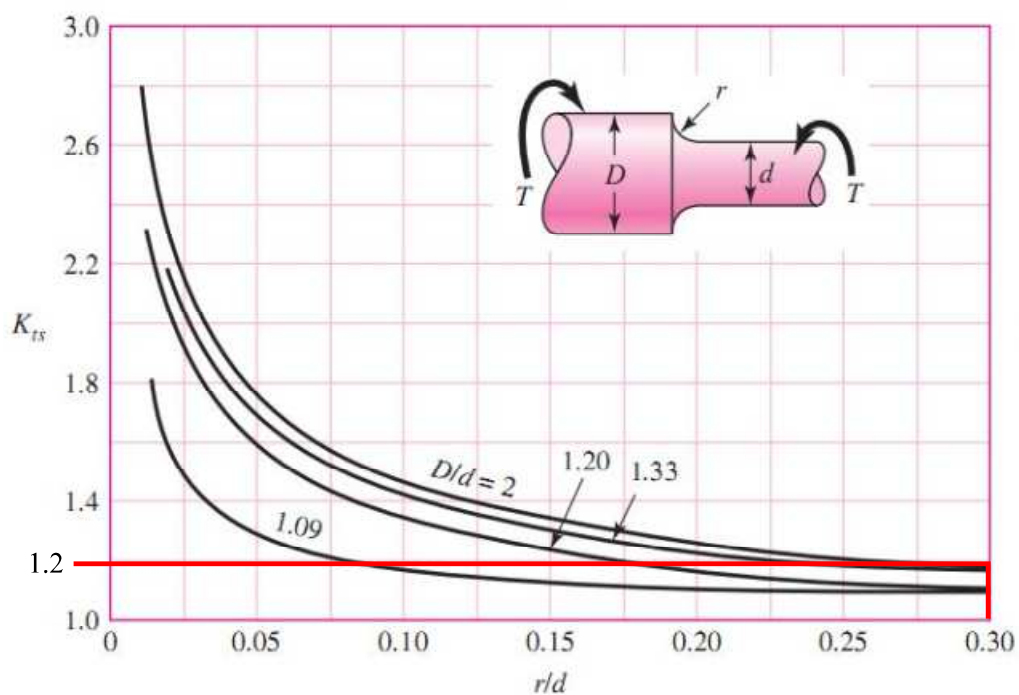
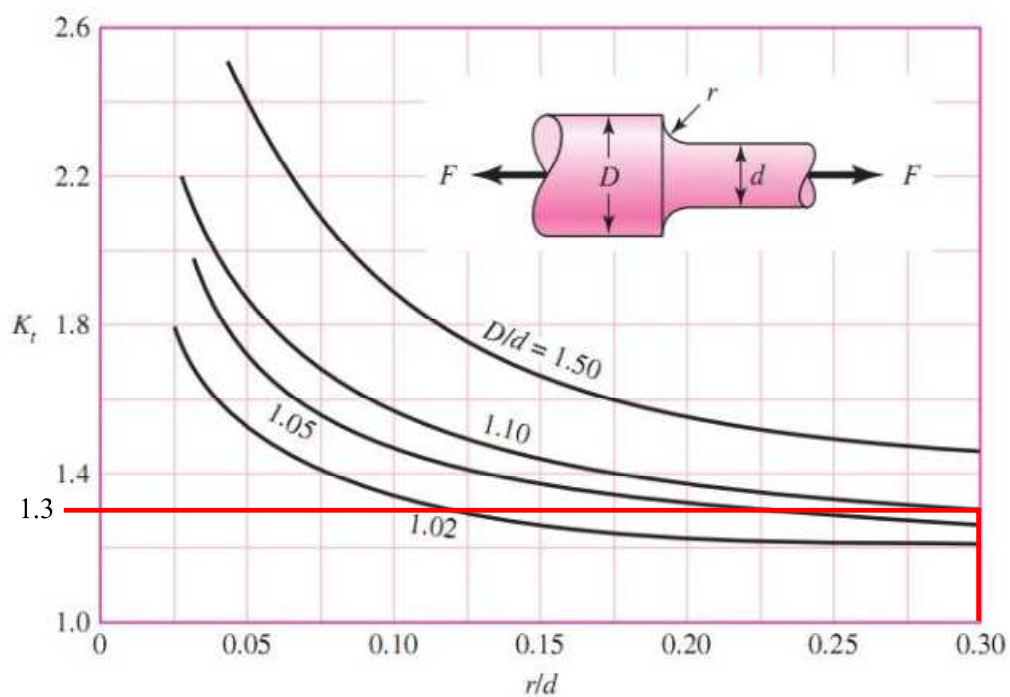
Anexos

ANEXO A – Curvas de sensibilidade ao entalhe



Fonte: Budynas e Nisbett (2011b, p. 320 e 321)

ANEXO B – Fator de concentração de tensão de fadiga



Fonte: Budynas e Nisbett (2011b, p.1008)

ANEXO C – Fatores de correção para o limite de fadiga

Figura 61 – Coeficientes para fator de acabamento superficial, k_a

Surface Finish	Factor a		Exponent b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	-0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	-0.718
As-forged	39.9	272.	-0.995

From C.J. Noll and C. Lipson, "Allowable Working Stresses," *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3, no. 2, 1946 p. 29. Reproduced by O.J. Horger (ed.) *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, New York. Copyright © 1953 by The McGraw-Hill Companies, Inc. Reprinted by permission.

Fonte: Budynas e Nisbett (2011b, p.345)

Figura 62 – Fator de geometria k_b e fator de carregamento k_c

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < 254 \text{ mm} \end{cases}$$

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{bending} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsion}^{17} \end{cases}$$

¹⁷Use this only for pure torsional fatigue loading. When torsion is combined with other stresses, such as bending, $k_c = 1$ and the combined loading is managed by using the effective von Mises stress as in Sec. 5-5. Note: For pure torsion, the distortion energy predicts that $(k_c)_{\text{torsion}} = 0.577$.

Fonte: Adaptado de Budynas e Nisbett (2011b, p.290)

Figura 63 – Fator de temperatura, k_d

Temperature, °C	S_T/S_{RT}	Temperature, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
35	1.005	100	1.008
50	1.010	200	1.020
100	1.020	300	1.024
150	1.025	400	1.018
200	1.020	500	0.995
250	1.000	600	0.963
300	0.975	700	0.927
350	0.943	800	0.872
400	0.900	900	0.797
450	0.843	1000	0.698
500	0.768	1100	0.567
550	0.672		
600	0.549		

Fonte: Budynas e Nisbett (2011b, p.291)

Figura 64 – Fator de confiabilidade, k_e

Reliability, %	Transformation Variate z_0	Reliability Factor k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fonte: Budynas e Nisbett (2011b, p.335)

ANEXO D – Tipos de Juntas soldadas seus respectivos coeficientes

TABELA 7.1-Junção de tampo.

Designação	Chapa integral	Cordão V	Cordão V com raiz soldada	Cordão V usinado	Cordão X	Cordão V enviesado
Símbolo da soldadura						
Configuração do cordão						
Coeficiente v_1	Tração-compressão	1	0,5	0,7	0,92	0,8
	Flexão	1,2	0,6	0,84	1,1	0,98
	Cisalhamento	0,8	0,42	0,56	0,73	0,56

TABELA 7.2-Junção T.

Designação	Cordão angular convexo	Bilateral Cordão angular plano	Cordão angular côncavo	Cordão angular plano unilateral	Cordão angular de tampo	Cordão angular de tampo bilateral	Cordão X
Símbolo da soldadura							
Espessura do cordão	2a	2a	2a	a	s	s	s
Configuração do cordão							
Coeficiente v_1	Tração-compressão	0,32	0,35	0,41	0,22	0,63	0,56
	Flexão	0,69	0,7	0,87	0,11	0,8	0,8
	Cisalhamento	0,32	0,35	0,41	0,22	0,5	0,45

TABELA 7.3-Junção angular de extremidades.

Designação	Unilateral Cordão angular plano	Bilateral Cordão angular plano	Cordão angular de tampo	Cordão X de extremidades	
Símbolo da soldadura					
Espessura do cordão	a	2a	e	s	
Configuração do cordão					
Coeficiente v_1	Tração-compressão	0,22	0,3	0,45	0,6
	Flexão	0,11	0,6	0,55	0,75
	Cisalhamento	0,22	0,3	0,37	0,5

TABELA 7.4-Junção por meio de talas.

Junção com:	Cordão angular transversal		Cordão angular longitudinal	
Espessura do cordão	2a	2a	2a	2a
Configuração do cordão				
Coeficiente v_1	Tração	0,22	0,25	0,25
				0,48

TABELA 7.6 – Resistência à tração estática de cordões V e X já executados em vários materiais, segundo [7/3].

Qualidade da soldadura	Limite de resistência à tração em kgf/mm ²						Solda pura	Alongamento da soldadura δ em %
	St 00	St 37	St 42	St 50	St 52	St 60		
N	25	28	30	—	—	—	37	5...10
F	27	30	33	40	40	44	45	10
S	—	37	40	50	52	55	50	15

TABELA 7.7 – Coeficientes v e v_1 .

Formato do cordão	Tipo de solicitação	Coeficientes	
		v estático*	v_1 dinâmico
Cordões de tampo	Tração	0,75	} Estes valores se encontram nas Tabs. 7.1 a 7.4
	Compressão	0,85	
	Flexão	0,8	
	Cisalhamento	0,65	
Cordões angulares	Qualquer tipo de solicitação	0,65	

*Segundo DIN 4 100 (estruturas de aço de edifícios).

Fonte: NIEMANN (1971, p.135)

Tabela 18 – Coeficiente em função da qualidade da solda

$v_2 = 0,5$	Qualidade de solda normal
$v_2 = 1$	Qualidade de solda elevada
$v_2 =$ valores especiais	Qualidade de solda especial