

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar



Tese

Projeto estrutural de uma colhedora de alho para declividade variadas

Elka Carolina Ojeda

Pelotas, 2022

Elka Carolina Ojeda

Projeto estrutural de uma colhedora de alho para declividade variadas

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Vieira dos Reis
Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Ardais Medeiros

Pelotas, 2022

Ficha catalográfica

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

O11p Ojeda, Elka Carolina

Projeto estrutural de uma colhedora de alho para declividade variadas / Elka Carolina Ojeda ; Angelo dos Reis, orientador ; Fabrício Medeiros, coorientador. — Pelotas, 2022.

1 3 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Topografias comprometidas. 2. Mecanização. 3. Agricultura familiar. 4. Hortaliças. I. Reis, Angelo dos, orient. II. Medeiros, Fabrício, coorient. III. Título.

CDD : 631.3

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

Elka Carolina Ojeda

Projeto estrutural de uma colhedora de alho para declividade variadas

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em Agronomia, pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 07 de março de 2022

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ângelo Vieira dos Reis (Orientador e Presidente), Doutor em Engenharia Mecânica pela UFSC.

Prof. Dr. Antônio Lilles Tavares Machado, Doutor em Ciência do Solo pela UFRGS.

Prof. Dr. André Oldoni A., Doutor em Agronomia pela UFPel.

Prof. Dr. Boris Niemczewski, Doutor em Agronomia pela UFPel.

Prof. Dra. Aline Soares Pereira, Dra. em Agronomia pela UFPel.

Dedicatória

Nesta caminhada, é mais que impossível para mim falar que estes degraus eu subi sozinha, é muita gente linda, de um coração e uma inteligência social inacreditável, só posso falar Gracias-Obrigada-Merci beaucoup-thanks you very much, a todos vocês por sempre.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar (PPG-SPAF) pela oportunidade concedida para os estudos de Doutorado.

A minhas mães Cristina e Mercedes (*in memoriam*) e Luisa Saray, a meus tios Elda e Dilio, por todo o amor e dedicação que sempre tiveram e tem comigo, pessoas que com mão de seda, mas firme guiaram-me com disciplinas e exemplo, fazendo-me acreditar que nada é impossível, que se pode alcançar os objetivos respeitando-se e respeitando os outros.

Ao meu orientador Dr. Ângelo Vieira dos Reis, pelas orientações, constante apoio, exemplo de trabalho, constância e equidade; ajudando-me além do acadêmico junto a sua esposa, Sra. Iolanda e sua filha Clara.

Aos demais membros da equipe de professores do Núcleo de Inovação em Máquinas e Equipamentos Agrícolas, como também à professora Roberta Marins Nogueira Peil pelas cátedras extraordinárias em sala de aula.

A Norma e Neymar Carrazzoni; junto a outro casal maravilhoso como é Nilo e Márcia Schiavon; eles são exemplos da possibilidade de sucesso e rentabilidade da agricultura familiar.

A minhas amigas incondicionais: Aline, Cris, Fabiane, Sandra, Flor, Ana Cristina, Ana Carolina, Marley, Carmen e muitas outras mais, presentes desta maravilhosa cidade. Muito obrigada mesmo.

A Gianna, pela parceria de horas e horas de trabalho nos *softwares* na simulação do projeto, e ao professor Boris Kluwe Niemczewski pela disposição e tempo. Aliás, não posso deixar um agradecimento especial aos professores Antônio Lilles Machado e ao professor André Oldoni que desde o meu mestrado têm acompanhado este projeto.

A Jorge Curi e Ana Paula Klug, empresários de exemplo e sempre dispostos a ter uma mão amiga.

Aos professores Johny Humbría e Igle Umbria da *Universidad de Los Andes*, pelo apoio, conselhos e força para seguir adiante. Como também aos professores da escola de engenharia da *Universidad de Los Andes*, Venezuela.

Ao professor Hebert e Ana Carolina pelos cuidados, apoio, força; vocês são a família que a gente ganhou no caminhar neste País.

A todos aqueles que participaram de forma direta desse projeto e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

*“Seule la foi sans faille est celle qui peut faire face à la raison
face a face, à tous les âges de l’humanité”
Allan Kardec.*

Resumo

OJEDA, Elka Carolina. **Projeto estrutural de uma colhedora de alho para declividade variadas**. 2022. 173f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

O Brasil destaca-se na produção mundial de alho, principalmente cultivado por agricultores familiares. Entretanto, diversas são as adversidades enfrentadas por esses produtores na colheita de alho, tais quais: baixo grau de mecanização, elevada intensidade de trabalho em terrenos declivosos e déficit no mercado de máquinas para operar em solos com condições variadas. As políticas públicas e/ou industriais não incentivam o desenvolvimento de equipamentos para unidades produtoras de agricultores familiares, uma vez que não há grande demanda. Dentro desse contexto, objetivou-se com o estudo, delinear e analisar a estrutura de uma nova concepção de maquinário para a colheita de alho, capaz de acessar terrenos de 0 a 25% de declividade. O projeto foi desenvolvido computacionalmente nos sistemas CAD e CAE. Para obtenção do leiaute final de uma colhedora de alho foram necessárias diversas simulações, utilizando técnicas como o Método de Elementos Finitos, análise estática, análise modal e convergência de malhas. Quatro partes foram analisadas: estrutura principal I (parte frontal), estrutura da interface, estrutura do sistema de transporte da planta de alho e estrutura principal II (parte posterior). Por meio dos resultados, percebe-se que as simulações permitiram prever diversas situações de trabalho, auxiliando na redução de tempo e custos com a construção de protótipos. As modificações estruturais que foram implementadas corrigiram as condições iniciais de alta tensão, além de gerar melhorias na concentração de tensões e áreas de deslocamento. A partir dos resultados obtidos nas simulações, pode-se notar que: i) a estrutura de interface pode sofrer uma maior resposta da dinâmica estrutural e ii) frequências superiores a 45,7 Hz devem ser evitadas, visto que existem diversas frequências naturais acima desta faixa que podem causar interferências na estrutura. Por fim, foi possível observar que toda a estrutura da colhedora de alho tende a suportar as cargas propostas inicialmente. A pesquisa inicial pode garantir que o produto desenvolvido é promissor. Entretanto, fica evidente que maiores estudos são necessários, principalmente relacionados ao desenvolvimento de sensores adaptados a estrutura de interface. Dessa forma, permite-se que a aproximação, profundidade e

altura entre máquina, solo e planta seja regulada, nortando ângulos inferiores a 12° (que garantem a conservação da haste e do bulbo do alho).

Palavras-chave: Topografias comprometidas. Mecanização. Agricultura familiar. Hortaliças.

Abstract

OJEDA, Elka Carolina. **Structural design of a garlic harvester for different slopes.** 2022. 173sh. Thesis (PhD in Agronomy) – Graduate Program in Family Farming Production Systems, Faculty of Agronomy Eliseu Maciel, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2022.

Brazil stands out in the world production of garlic, mainly cultivated by family farmers. However, there are several adversities faced by these producers in the garlic harvest, such as a low degree of mechanization, high intensity of work in sloping terrains, and a deficit in the market of machines to operate in soils with varied conditions. Public and/or industrial policies do not encourage the development of equipment for production units of family farmers since there is no great demand. Within this context, the objective was to study, delineate and analyze the structure of a new conception of machinery for garlic harvesting, capable of accessing land of 0 to 25% slope. The project was developed computationally in CAD and CAE systems. To obtain the final layout of a garlic harvester, several simulations were necessary, using techniques such as the Finite Element Method, static analysis, modal analysis, and mesh convergence. Four parts were analyzed: main structure I (front part), interface structure, garlic plant transport system structure, and main structure II (back part). Through the results, it is possible to notice that the simulations allowed predicting several work situations, helping in the reduction of time and costs with the construction of prototypes. The structural modifications that were implemented corrected the initial high voltage conditions, in addition to generating improvements in stress concentration and displacement areas. From the results obtained in the simulations, it may be noted that: i) the interface structure may be more responsive to the structural dynamics and ii) frequencies above 45,7 Hz shall be avoided since there are several natural frequencies above this range that can cause structural interference. Finally, it was possible to observe that the whole structure of the garlic harvester tends to bear the loads initially proposed. Initial research can ensure that the product developed is promising. However, it is evident that further studies are needed, mainly related to the development of sensors adapted to the interface structure. In this way, it is allowed that the approximation, depth, and height between machine soil and plant is regulated, guiding angles less than 12° (which guarantee the conservation of the stem and bulb of the garlic).

Keywords: Compromised topographies. Mechanization. Family agriculture. Vegetables.

Lista de Figuras

Figura 1. Colhedora de alho autopropelida 4S-6.....	26
Figura 2. Colhedora de alho separadora de culturas de plantio.	27
Figura 3. Colhedora de alho, desenvolvida pelo Instituto de Pesquisa <i>Nanjing Research</i>	28
Figura 4. Colhedora de alho flexível.....	28
Figura 5. Colhedora de alho por escavação.....	29
Figura 6. Máquina colhedora de alho com sistema de corte de raiz e haste.....	29
Figura 7. Colhedora de alho com sistema de transporte.....	30
Figura 8. Colhedora de alho e controle de profundidade.	30
Figura 9. Colhedora de alho com sistema de escavação.....	31
Figura 10. Colhedora de alho com sistema de corte de caule.....	32
Figura 11. Colhedora de alho autopropelida 4DS-6.	33
Figura 12. Colhedora de alho 4U-6.	33
Figura 13. Colhedora de alho com sistema de corte de raízes.	34
Figura 14. Colhedora de alho e programa de mecanização.....	34
Figura 15. Concepção de uma máquina colhedora de alho.	36
Figura 16. Representação dos passos da fase do projeto preliminar.....	40
Figura 17. Estado do plano de deformações de material.	53
Figura 18. Diagrama de tensão-deformação convencional e real para um material dúctil.....	54
Figura 19. Superfície característica dos diferentes tipos de fraturas.....	57
Figura 20. Representação do comportamento tensão-deformação em tração.....	57
Figura 21. Amostras ASTM A31 (16348), ASTM A36 (16347) ensaiadas por tração.	58
Figura 22. Curvas de tensão máxima e número de ciclos para ruptura.	58
Figura 23. Amostra ASTM A131 DH36 (16347) e ASTM A36 (16348) conformadas a frio.	59
Figura 24. Curva típica de fluência.....	59
Figura 25. Diagrama de fluxo de sinal.....	67
Figura 26. Representação da sistematização do Projeto preliminar.	72
Figura 27. Tarefa 1: Planejar o projeto preliminar do produto.	73
Figura 28. Tarefa 2: Definir estrutura de produto.	74

Figura 29. Tarefa 3: Determinação de forma e materiais estruturais (Ciclo DFF - M).	75
Figura 30. Ciclo DFF-M em destaque.	76
Figura 31. Tarefa 4: Análises e simulações numéricas.	78
Figura 32. Pontos de entrada das plantas no sistema de agarre.	80
Figura 33. Interface máquina-planta.	81
Figura 34. Sulcador e sistema de transporte da planta de alho.	82
Figura 35. Comparativos entre as análises.	84
Figura 36. Sistema de arranque com corte contínuo de haste.	90
Figura 37. Vista direita de máquina colhedora com frontal maior.	94
Figura 38. Vista direita de proposta II máquina colhedora com frontal maior.	95
Figura 39. Representação do sulcador.	98
Figura 40. Trator classe II, cotas com largura por comprimento da colhedora de alho.	99
Figura 41. Processo de convergência de malha apresentado em função da (a) tensão de von Mises e (b) tempo computacional para ponteira.	100
Figura 42. Processo de convergência de malha apresentado em função da (a) tensão de von Mises e (b) tempo computacional para base de ligação do sistema de transporte da planta.	101
Figura 43. Processo de convergência de malha apresentado em função da (a) tensão de von Mises e (b) tempo computacional para estrutura.	102
Figura 44. Evolução do processo de simulação da estrutura da interface.	105
Figura 45. Melhorias propostas para reforçar a estrutura da interface.	106
Figura 46. Aplicação dos esforços nos pontos de fixação e na estrutura de interface.	107
Figura 47. Aplicação dos esforços nos parâmetros de fixação da base de ligação.	107
Figura 48. Deformação estrutural na estrutura da interface, com máximo de 0,11mm.	108
Figura 49. Tensões de von Mises na estrutura da interface.	109
Figura 50. Deslocamento do sistema de transporte da planta de alho.	110
Figura 51. Tensões de von Mises na estrutura do sistema de transporte da planta de alho.	110
Figura 52. Aplicação dos esforços nos pontos de fixação da estrutura da parte posterior da máquina colhedora de alho.	111

Figura 53. Deformação da estrutura na parte posterior da máquina colhedora de alho, para inclinação de 25%.	112
Figura 54. Deformação da estrutura na parte posterior da máquina colhedora de alho, para inclinação de 0%.	113
Figura 55. Tensões de von Mises da estrutura na parte posterior da máquina colhedora de alho, com inclinação de 25%.	113
Figura 56. Tensões de von Mises da estrutura na parte posterior da máquina colhedora de alho, com inclinação de 0%.	114
Figura 57. Resultado dos deslocamentos (mm) para simulações modais de corpo fixo na estrutura que suporta a ponteira.	115
Figura 58. Resultado dos deslocamentos (mm) para simulações modais no sistema de transporte da planta de alho.	115
Figura 59. Resultado dos deslocamentos (mm) para simulações modais na estrutura posterior da máquina colhedora de alho.	116
Figura 60. Máquina colhedora de alho para relevos variados.	119
Figura 61. Máquina colhedora de alho para relevos variados.	120
Figura 62. Máquina colhedora de alho com estrutura de interface.	121
Figura 63. Máquina colhedora de alho com sistema de pressão nas correias.	121
Figura 64. Detalhe do sistema de remoção do solo e arranquio das raízes da planta de alho com o sulcador.	122
Figura 65. Máquina colhedora de alho com sistema de esteira transportadora e sistema de ensaque.	123

Lista de Tabelas

Tabela 1. Classificação de bulbilhos de alho em função do tamanho.....	24
Tabela 2. Influência da classificação de bulbilhos nas características de produção da cultivar BRS Hozan.	24
Tabela 3. Importações de alho (NCM 0703 2090).....	24
Tabela 4. Lista de verificação com as principais características para o projeto da forma.	42
Tabela 5. Propriedades químicas e mecânicas de alguns aços estruturais.	66
Tabela 6. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 1 da fase preliminar.....	73
Tabela 7. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 2 da fase preliminar.....	74
Tabela 8. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 3 da fase preliminar.....	77
Tabela 9. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 4 da fase preliminar.....	84
Tabela 10. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 5 da fase preliminar.	85
Tabela 11. Custos básicos para a fabricação de uma máquina colhedora de alho...88	
Tabela 12. Especificações meta de uma máquina colhedora de alho para as cordilheiras Andinas da Venezuela.	91
Tabela 13. Comparativo entre as características básicas da concepção de Ojeda (2016) e a concepção atual.	96
Tabela 14. Parâmetros básicos para a fabricação de uma máquina colhedora de alho.	103
Tabela 15. Parâmetros básicos para a análise da estrutura da interface de uma máquina colhedora de alho.	104

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Fator de segurança da malha analisada.....	103
Gráfico 2. Fator de segurança da malha analisada para estrutura da interface.....	104
Gráfico 3. Resultado de frequência modal de corpo livre na estrutura da interface.	116
Gráfico 4. Resultado de frequência modal de corpo livre no sistema de transporte.	117
Gráfico 5. Resultado de frequência modal de corpo livre na estrutura posterior da máquina colhedora de alho.	117

Lista de Quadros

Quadro 1. Exemplos de problemas e parâmetros que caracterizam um sistema.	48
Quadro 2. Principais especificações meta para o desenvolvimento de maquinário que atenda às necessidades do público-alvo do estudo.	89
Quadro 3. Classificação dos módulos da concepção entre básica e especial.	93
Quadro 4. Produto desenvolvido por Ojeda (2018) e produto proposto na atual pesquisa científica.	97

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
Arctan	Arco tangente
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Solda)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho assistido por computador)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia assistida por computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura auxiliada por computador)
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
cos	Cosseno
DFF	Determinação de Forma Física
dof	Graus de liberdade
FOS	Fator de Segurança
FRF	Função Resposta de Frequência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
M	Matérias
MEF	Método dos Elementos Finitos
N	Newton
NBR	Normas Brasileiras
PV	Protótipo Virtual
SAE	<i>Society of Automobile Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros Automotivos)
sen	Seno
SSC	Sistemas, subsistemas e componentes
T	Toneladas
tan	Tangente

UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFPEL	Universidade Federal de Pelotas
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USPTO	<i>United States Patent and Trademark Office's</i>
v	Velocidade

Lista de Símbolos

λ	Ângulo de inclinação da haste da planta de alho
α	Ângulo de penetração
η	Ângulo entre a direção de arranque da planta de alho e a velocidade de deslocamento
(ν)	Coeficiente de Poisson
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	Componentes de deformação
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	Componentes de deformação normal
E	Deformação específica
U\$	Dólar
μ	Fator de atrito
	Força de atrito ao longo da superfície da ponta
f_n	Frequência natural de vibração do sistema
$^{\circ}\text{C}$	Graus celsius
$^{\circ}$	Graus de angulação
θ	Inclinação do sistema de transporte
\geq	Maior igual que
m	Massa do sistema
$[C]$	Matriz de amortecimento
$[M]$	Matriz de massa
$[K]$	Matriz de rigidez
f_t	Máxima tensão tangencial
\leq	Menor igual que
$<$	Menor que
$ \quad $	Módulo
%	Porcentagem
k	Rigidez do sistema e
σ	Tensão
$\tau_{\text{máx abs}}$	Tensão de cisalhamento máxima absoluta
σ_E	Tensão de escoamento
σ_{lim}	Tensão limite do material
φ	Teor de água no solo

Δ	Variação
$\{\ddot{D}\}$	Vetor de aceleração nodal
$\{D\}$	Vetor de deslocamento nodal
$\{F\}$	Vetor de força externa nodal
$\{\dot{D}\}$	Vetor de velocidade nodal

Sumário

1	Introdução.....	20
2	Objetivos.....	22
2.1	Objetivo Geral.....	22
2.2	Objetivos Específicos	22
3	Revisão de Literatura.....	23
3.1	Características do alho	23
3.2	Tecnologias para a colheita de alho	25
3.3	Metodologia de projeto de máquinas agrícolas	36
3.4	Método de Elementos Finitos (MEF)	43
3.5	<i>Softwares</i> integrados ao MEF.....	49
3.6	Análise de estruturas	52
4	Metodologia	71
4.1	Caracterização da fase preliminar	71
5	Resultados e Discussão	86
5.1	Tarefa 1: Planejando o projeto preliminar.....	86
5.2	Tarefa 2: Definindo a estrutura do produto	88
5.3	Tarefa 3: Determinando forma física e materiais estruturais	97
5.4	Tarefa 4 e 5: Análises, simulações e comparativos.....	103
5.5	Leiaute final da máquina colhedora de alho	118
6	Conclusão.....	124
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	125
	Referências Bibliográficas.....	126
	Apêndices	135

1 Introdução

Por meio do desenvolvimento de máquinas agrícolas, busca-se satisfazer as necessidades das unidades de produção, melhorando as condições de trabalho dos indivíduos envolvidos no processo. Dessa forma, pretende-se transformar o operador em um usuário eficiente no uso de suas energias (por meio de uma gestão adequada das culturas) e consciente no uso racional de seu meio, incluindo o contexto da diferença entre os relevos da área de cultivo, procedimentos, produção, transporte e mercado dos alimentos agrícolas.

No entanto, o conhecimento racional de qualquer desenvolvimento na engenharia, emprega a necessidade de saber: “o que” e “para que”, ou seja, para o desenvolvimento de um maquinário agrícola, o projetista deve compreender todo o processo produtivo, desde a morfologia do cultivo até os distintos relevos e solos com condições variadas em que se encontra o plantio. Posto isto, para o desenvolvimento de uma colhedora de alho o projetista deve conhecer tanto a morfologia do alho, como seu local de cultivo.

O Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2017), aponta que os agricultores familiares brasileiros contribuem com cerca de 77% dos alimentos produzidos, sendo que a atividade do plantio de alho é conduzida, em sua grande parte, pela agricultura familiar (BRASIL, 2021). Sabe-se que, se a colheita do alho não for realizada dentro de três dias que compreendem o estado ótimo de maturação, pode haver o comprometimento da qualidade da cultura. O comprometimento da qualidade pode estar relacionado, conforme Filgueira (2013), à perda de massa do bulbo, a qual possui classificação comercial (preço no mercado). Além disso, as unidades familiares, em sua maioria, encontram-se em distintas classificações de relevos variados (de planas a comprometidas), limitando a mecanização agrícola. Sem incentivos, tende a ocorrer a diminuição da performance operacional destes produtores. A falta de mão de obra qualificada, maquinários e/ou dispositivos apropriados para o cultivo em declividades distintas, nas unidades familiares de produção, são alguns dos fatores que dificultam a expansão da cultura de alho nacionalmente (OJEDA, 2018).

Como problema e justificativa deste trabalho, salienta-se que no mercado existem máquinas capazes de realizar colheita em topografias planas com até cinco linhas. Entretanto, a maioria dos agricultores familiares encontra-se em unidades

produtoras com relevo variado, de distinta regularidade do solo e com declives de até 23%. Cabe ressaltar que, até o momento de finalização do presente trabalho, não foram encontrados estudos de projetos contendo máquinas colhedoras de alho para declividades variadas. Além disso, também não foram observados trabalhos cadastrados nas devidas plataformas de patentes.

Conforme a *United States Patent and Trademark Office* – USPTO (2019), são observadas inovações e pesquisas em diversos países referentes a mecanização do plantio de alho e em prol do beneficiamento das unidades familiares. No Brasil, entretanto, o desenvolvimento de mecanização agrícola direcionado para a cultura de alho nestas unidades, não apresenta inovações há mais de uma década. Um dos últimos trabalhos direcionados à temática em questão foi publicado por Zardo, Fagundes e Forcellini (2004). Nele, os autores objetivaram o desenvolvimento de um equipamento para o beneficiamento de bulbos de alho, pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Tais circunstâncias instigaram o objetivo deste trabalho. Partindo do projeto informacional-conceitual de uma colhedora de alho nas Cordilheiras dos Andes venezuelanos, desenvolvido por Ojeda (2018), objetivou-se o desenvolvimento detalhado de uma máquina agrícola para a colheita de alho em relevos e solos com condições variadas no estado do Rio Grande do Sul.

Com o auxílio de simulações computacionais, buscaram-se resultados confiáveis, com menor custo e tempo reduzido, se comparando a ensaios mecânicos com protótipos. Por meio dos *softwares SolidWorks* (CAD), *Ansys* (CAE) e o Método de Elementos Finitos (MEF), buscou-se identificar fragilidades na estrutura da colhedora de alho, assim como estudar o deslocamento do maquinário em terrenos planos 0% e terrenos com até 25% de declividade. A maior vantagem da utilização de simulações numéricas dá-se na redução de custos e tempo, quando comparado à construção e desenvolvimento de protótipos físicos.

O presente trabalho justifica-se pela necessidade de inovações nos maquinários agrícolas utilizados por unidades familiares instaladas em locais com diferentes classificações de relevos variados. Por meio do projeto, propôs-se uma solução viável a estas unidades, assegurando uma colheita eficiente e proporcionando ao agricultor familiar bulbos comerciais e retorno do investimento em um tempo aceitável.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Delinear e analisar a estrutura de uma nova concepção de maquinário para a colheita de alho, capaz de acessar terrenos de 0 a 25% de declividade.

2.2 Objetivos Específicos

- i. Avaliar as dimensões, os princípios de solução e os conjuntos que compõem a concepção da máquina colhedora de alho para os Andes venezuelanos, desenvolvida por Ojeda (2018);
- ii. Executar o design da colhedora de alho no sistema CAD com o *software SolidWorks*;
- iii. Executar simulações numéricas por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), com refinamento de malha de alta qualidade, utilizando o *software Ansys*;
- iv. Executar análise da resistência dos materiais, baseado no critério de von Mises, por meio do *software Ansys*;
- v. Executar análise modal na estrutura da máquina colhedora de alho, por meio do *software Ansys*;
- vi. Comparar os resultados obtidos da plataforma CAE para relevos com relevos variados da plantação de alho (0 e 25% de declividade).

3 Revisão de Literatura

3.1 Características do alho

Conforme a descrição botânica, o alho é uma planta monocotiledônea, pertencente à ordem *Liliflora*, família *Liliacea*, subfamília *Allioidea*, gênero *Allium*, espécie *Sativum* L. (REYES, 2015). Uma planta de alho, em seu desenvolvimento máximo, possui as seguintes partes:

- a) Raízes: fasciculadas, brancas, com 0,1 a 0,5mm de diâmetro, atingindo profundidade de 400 a 500mm (em média);
- b) Disco caule: o caule é o principal eixo de sustentação da planta, geralmente redondo, sendo que na parte inferior encontram-se as raízes, e, na parte posterior, encontra-se o bulbo, a haste e as folhas;
- c) Bulbo: é formado pelos brotos axilares das folhas, desenvolvido e transformado em órgãos de reserva. Cada gema origina um dente de alho;
- d) Folhas: as folhas são opostas, lineares, possuem de 450 a 600mm de comprimento e de 30 a 40mm de largura máxima;
- e) Pseudo haste: as vagens cilíndricas da planta formam o caule falso;
- f) Escape: o escape (ou caule floral) é um caule que termina em um receptáculo floral envolto por uma espada expirada, embora às vezes possa ser pela inflorescência. Formado por uma única peça, de 400 a 1000mm de comprimento e com cerca de 10 a 12mm de diâmetro em sua zona central, sendo mais espessa na região basal e mais fina na região apical;
- g) Flores: as flores são formadas por seis pétalas de coloração violeta, avermelhada, rosa ou branca. Possuem seis estames e um pistilo plurilocular que termina em um estigma filiforme;
- h) Frutos: as flores raramente dão origem a frutos e sementes verdadeiras que sejam viáveis.

No cultivo de alho são tradicionalmente conhecidos como “sementes” os bulbilhos utilizados na plantação ou nas cabeças de onde provêm estes dentes (REYES, 2015). Filgueira (2013), descreve o cultivo do alho como uma planta tenra, com cerca de 500mm de altura, folhas alongadas, estreitas, cerosas e que apresentam seção em “V”. O caule verdadeiro é um disco comprimido, ponto de partida de folhas e raízes. As bainhas das folhas formam um pseudocaule curvo, cuja

parte inferior é um bulbo. As raízes que ultrapassam a profundidade de um metro são consideradas de enraizamento profundo.

No entanto, para a Embrapa (2015), a classificação do alho-semente é um fator importante no cultivar. Sendo assim, existe uma influência tanto no tamanho do bulbo e dos bulbilhos como no ciclo do alho, melhorando a uniformidade do ponto de colheita. Logo, recomenda-se a utilização de peneiras classificadoras de bulbilhos. Pode-se visualizar a seguir, a classificação dos bulbilhos de alho (Tabela 1) e a influência da classificação dos bulbilhos nas características de produção de uma cultivar específica (Tabela 2).

Tabela 1. Classificação de bulbilhos de alho em função do tamanho.

Tamanho	Peneira	Malha (mm)	Peso médio do bulbilho (g)	Gasto de bulbilhos (kg ha ⁻¹)
Graúdo	1	15 x 25	4 a 6	1.200 a 2000
Médio	2	10 x 20	3	900
Pequeno	3	8 x 17	2	600
Miúdo	4	5 x 17	1	300
Palito	-	< 5 x 17	-	-

Fonte: EMBRAPA, 2015.

Tabela 2. Influência da classificação de bulbilhos nas características de produção da cultivar BRS Hozan.

Peneiras	Classes 5, 6 e 7 (%)	Classe 3 e 4 (%)	Não comercial (%)	Estande Final (N° plantas m ⁻²)	Produtividade (t ha ⁻¹)
1	65,76	32,82	1,42	48,80	10,84
2	55,96	41,86	2,18	52,20	10,68
3	64,02	32,97	3,00	49,80	10,35
4	47,57	44,13	8,30	50,20	9,14

Fonte: EMBRAPA, 2015.

O Brasil figura como o terceiro maior consumidor mundial de alho. Entretanto, por conta da pandemia, as importações de alho encontram-se em baixa se comparadas a janeiro/2020 (42,4%), ocasionando a alta no preço do alho, segundo CONAB (2021) (Tabela 3).

Tabela 3. Importações de alho (NCM 0703 2090).

Período	Importações			
	U\$ milhões	Var. %	Mil t ²	Var. %
2021 (Jan)	14,5	-62,0%	137,1	-42,4%
2020 (Jan)		38,0		141,5

Fonte: CONAB, 2021.

3.2 Tecnologias para a colheita de alho

Para a realização da colheita de alho ou de qualquer outro cultivo, existem três métodos: manual, manual-mecânico e mecânico, no qual a eficiência na colheita é demonstrada pela aplicação da técnica. Segundo Mialhe (2012), para o corte e recolhimento, o método manual-mecânico, assim como o mecânico, são considerados processos comuns, os quais são avaliados pelo desempenho operacional do implemento (OLDONI, 2016).

Além disso, vale destacar que a indústria de máquinas e equipamentos agrícolas é um setor oligopolizado mundialmente por poucas empresas, sendo que as principais podem ser observadas no Apêndice 1 (OJEDA, 2018). Percebe-se que, a dependência destas máquinas e/ou equipamentos torna-se cada vez maior, uma vez que, a mecanização visa o aumento da produtividade. Além disso, paralelamente, os riscos relacionados a saúde dos agricultores despertam o interesse em pesquisadores e na criação de políticas públicas voltadas aos trabalhadores rurais (MIALHE, 2012).

O investimento em pesquisas para o desenvolvimento das colhedoras de alho apresenta-se em crescimento em diversos países. Até a finalização do presente trabalho, cerca de 4 mil patentes já haviam sido depositadas nas entidades regulamentadoras para sua concessão. Segundo o ORCID (2019), a Rússia possui o maior número de patentes depositadas (1,4mil), seguida do Japão e Estados Unidos da América. As pesquisas em maquinários agrícolas referentes ao cultivo do alho tendem a ser desenvolvidas para topografias planas. As colhedoras que atualmente apresentam capacidade de trabalhar em declividades acima do 15% são as desenvolvidas para trabalhar com culturas como cana de açúcar e café (LOUREIRO, 2015).

Entretanto, mesmo que a maioria dos projetos esteja direcionado para locais planos, suas funcionalidades ajudam no desenvolvimento desta pesquisa, sendo elas: mecanismos de escavação; sistemas de alinhamento no plano espacial; acoplamento do implemento à fonte de potência; mecanismo do corte de sistema radicular; mecanismo de arranquio da planta e sistemas para a interface planta-máquina pelo tamanho do bulbo de alho. Versando sobre as diferentes tecnologias que vêm sendo desenvolvidas, distintas aplicações e inovações podem ser observadas.

Hou et al. (2020), realizaram testes em uma máquina colhedora de alho 4S-6, para verificar a eficácia de cada componente e a influência dos parâmetros

operacionais da máquina. Sua estrutura é compacta, composta por um sulcador como dispositivo de escavação e esteiras para o sistema de transporte do alho. A base de operação da máquina colhedora de alho é composta por linhas de espaçamento no plano espacial da cultura.

O esquema estrutural da colhedora de alho 4S-6 está representado na Figura 1. Nela, tem-se: (1) roda de profundidade, (2) haste, (3) polia, (4) suporte de fixação, (5) base de fixação, (6) motor de corte, (7) corrente de fixação, (8) motor hidráulico, (9) sistema hidráulico, (10) transportador de alho, (11) sistema de operações, (12) assento do operador, (13) transportador superior, (14) ventilador, (15) motor, (16) base do motor, (17) rodas track, (18) rolamentos da roda, (19) rolamentos do sistema de rodas, (20) correias de transmissão da planta do alho, (21) transportador esquerdo, (22) roda guia, (23) suporte do sulcador e (24) sulcador.

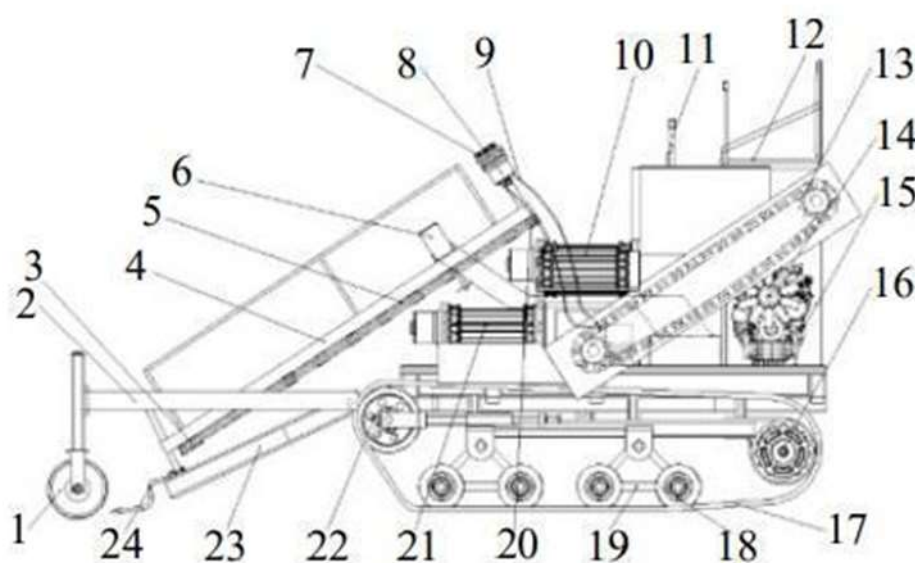


Figura 1. Colhedora de alho autopropelida 4S-6.
Fonte: HOU et al., 2020.

Tian et al. (2018), buscaram como finalidade em seu trabalho desenvolver e estudar uma máquina colhedora de alho com processos automatizados para realização da colheita a campo. A estrutura da máquina está apresentada na Figura 2. A máquina é suportada e guiada por rodas de carga (7), a viga principal da máquina possui uma caixa de colheita (6), uma estrutura vertical fixa (2), uma estrutura inferior (5), vigas de controle de direção para máquina (3), viga de suporte da carga para

acoplar com o trator (4) e transportador (1). Os componentes da parte posterior e a estrutura de fixação são conectados a uma estrutura de suporte (8).

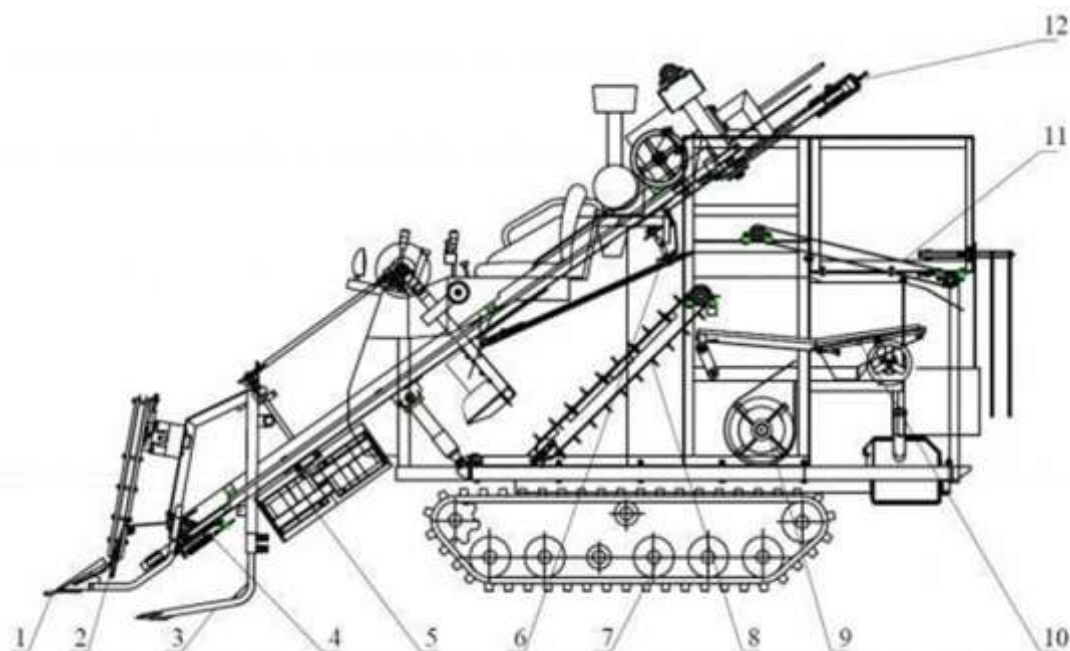


Figura 2. Colhedora de alho separadora de culturas de plantio.
Fonte: TIAN et al., 2018.

Xiaolian et al. (2017), com base na máquina colhedora de alho desenvolvida pelo Instituto de Pesquisa Nanjing Research, estudaram a eficiência de trabalho e a manobrabilidade adequada para diferentes áreas em relevos e solos com condições variadas chinesas. Uma das principais funções da máquina é a fixação, levantamento e transporte da planta de alho, corte da haste, dispositivo de remoção de detritos e limpeza do bulbo (Figura 3). Onde: (1) dispositivo de divisão de haste, (2) dispositivo de levantamento de haste, (3) sulcador, (4) transportador, (5) limpador de bulbos, (6) cortador de hastes, (7) chassi, (8) correia transportadora, (9) ventilador, (10) peneira de limpeza e (11) corrente transportadora de mudas.

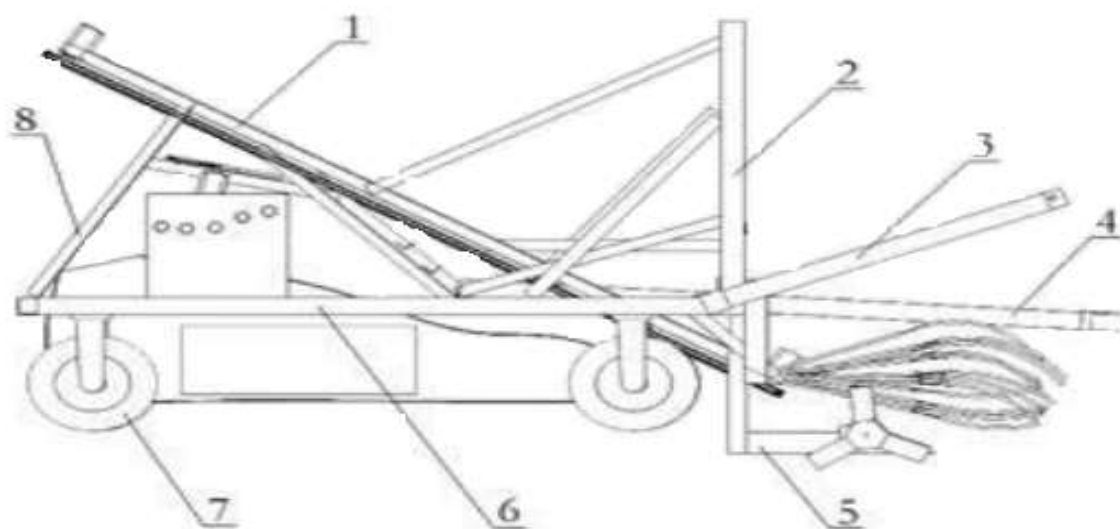


Figura 3. Colhedora de alho, desenvolvida pelo Instituto de Pesquisa *Nanjing Research*.
Fonte: XIAOLIAN et al., 2017.

Já, Yu et al. (2015) desenvolveram uma colhedora flexível para alho de pequeno tamanho (Figura 4). A máquina utiliza o método de extração por meio de cremalheiras e prateleiras, que regulam a altura da colheita. O principal objetivo foi proporcionar uma operação simples, fácil e de alta eficácia.

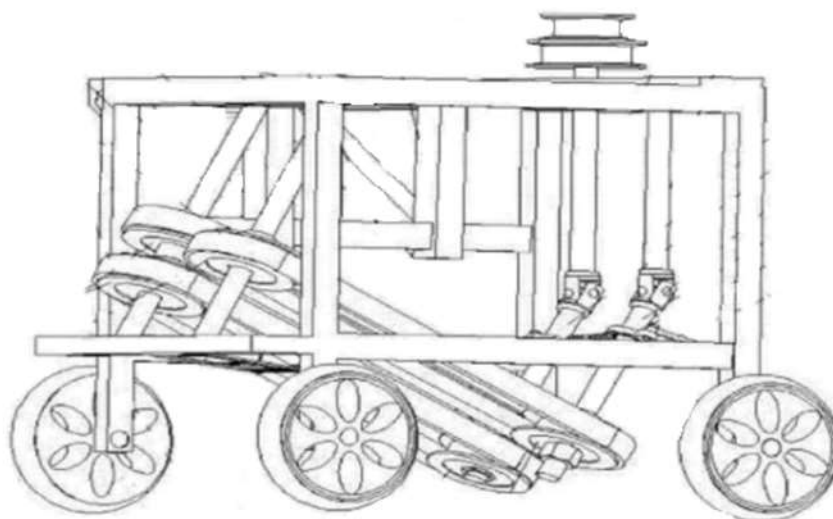


Figura 4. Colhedora de alho flexível.
Fonte: YU et al., 2015.

Na Figura 5 está descrita a colhedora de alho por escavação, desenvolvida por Zhang (2004). O autor propôs trabalhar com tratores e/ou veículos comerciais acoplados ao eixo de potência, proporcionando o controle e ajuste de profundidade.

Já, a colhedora de alho desenvolvida por Hu e Hu (2016), cumpre a função de arrancar as plantas de alho alinhadas no plano espacial, cortar a haste e transportá-las por meio de correias. Ao final, a planta passa por uma tela especial que limpa o bulbo para ser debulhado e dividido em bulbilhos (Figura 6).

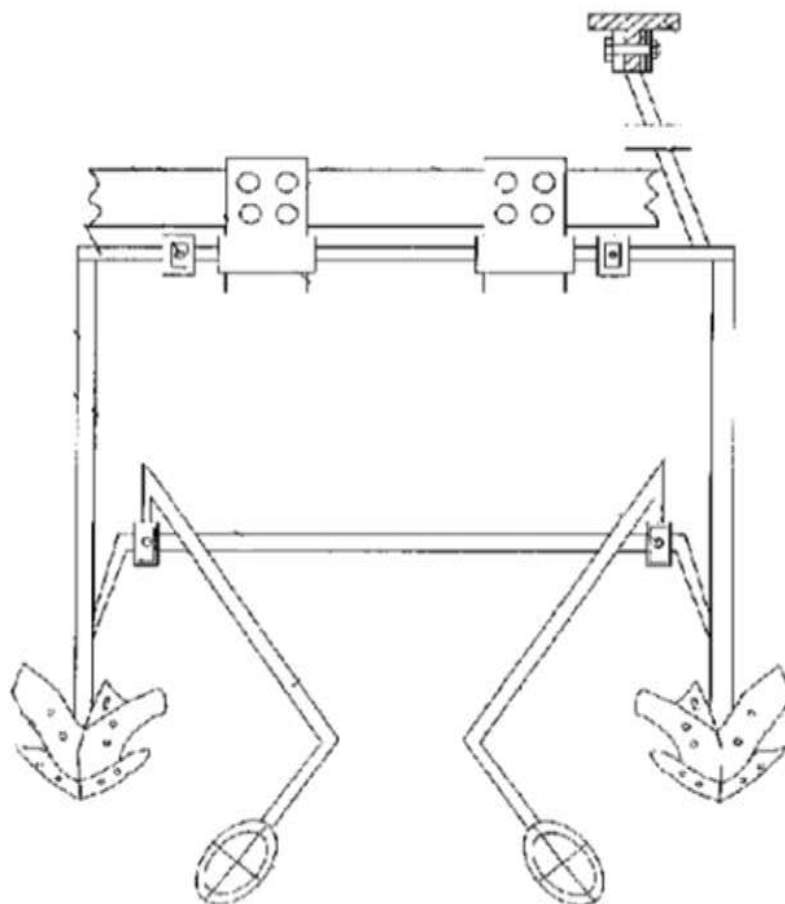


Figura 5. Colhedora de alho por escavação.
Fonte: ZHANG, 2004.

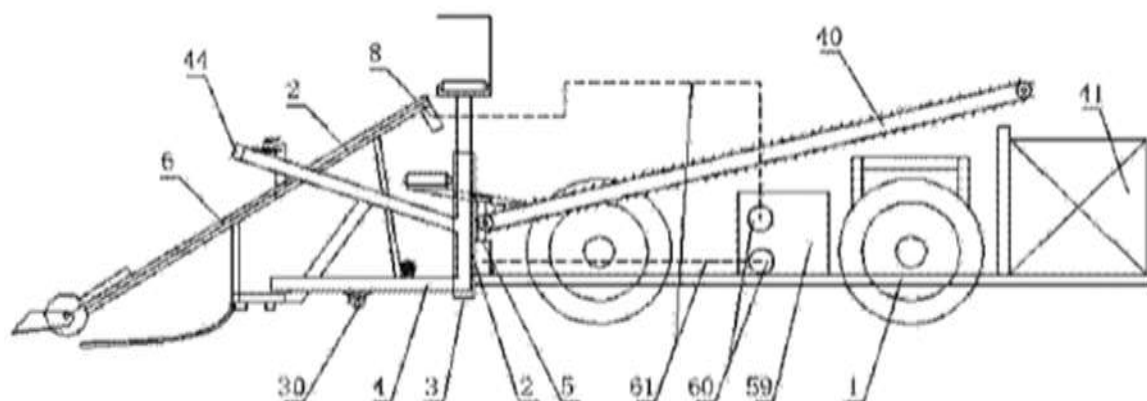


Figura 6. Máquina colhedora de alho com sistema de corte de raiz e haste.
Fonte: HU; HU, 2016.

Li (2017) propôs uma colhedora de alho por escavação, com um removedor de terra (Figura 7), onde o traslado ocorre por meio de uma correia transportadora, um eixo de transmissão e um eixo excêntrico, com profundidade limitada. Já, Chen e Shi (2008), patentearam uma colhedora de alho que trabalha na frente do trator, possuindo um pneu para controle de profundidade, pá de escavação vibratória, corrente transportadora tipo haste e variador de velocidade (Figura 8). A máquina separa o alho do solo, apresentando baixa taxa de alhos danificados.

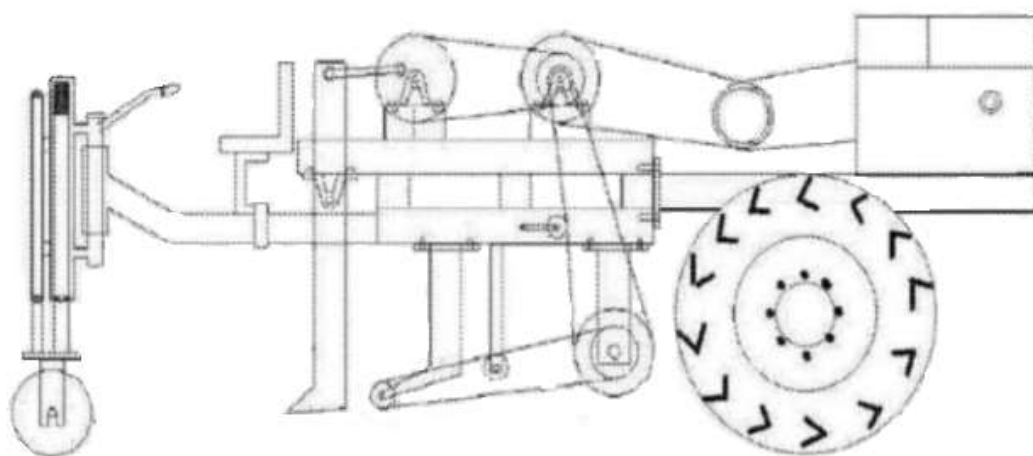


Figura 7. Colhedora de alho com sistema de transporte.
Fonte: LI, 2017.

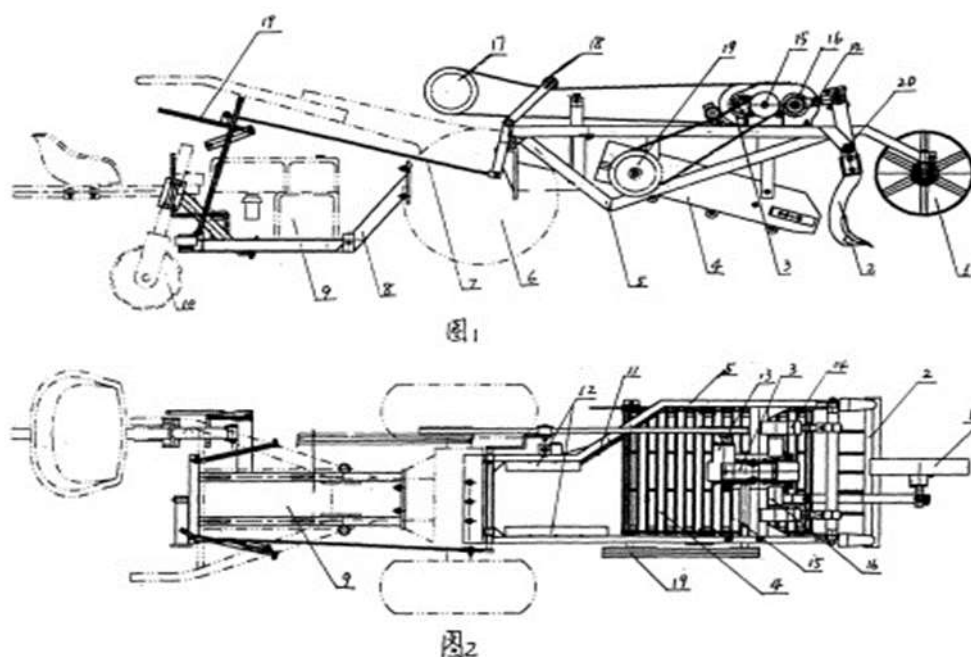


Figura 8. Colhedora de alho e controle de profundidade.
Fonte: CHEN; SHI, 2008.

Referindo-se, ainda, a máquinas colhedoras por escavação para a colheita de alho, Jiang et al. (2018), desenvolveram e patentearam uma máquina que compreende um rack, no qual se conecta um corpo de embreagem na extremidade frontal do rack a caixa de transmissão. A estrutura é simplificada e possui alta adaptabilidade, tornando a operação conveniente para os agricultores familiares (Figura 9).

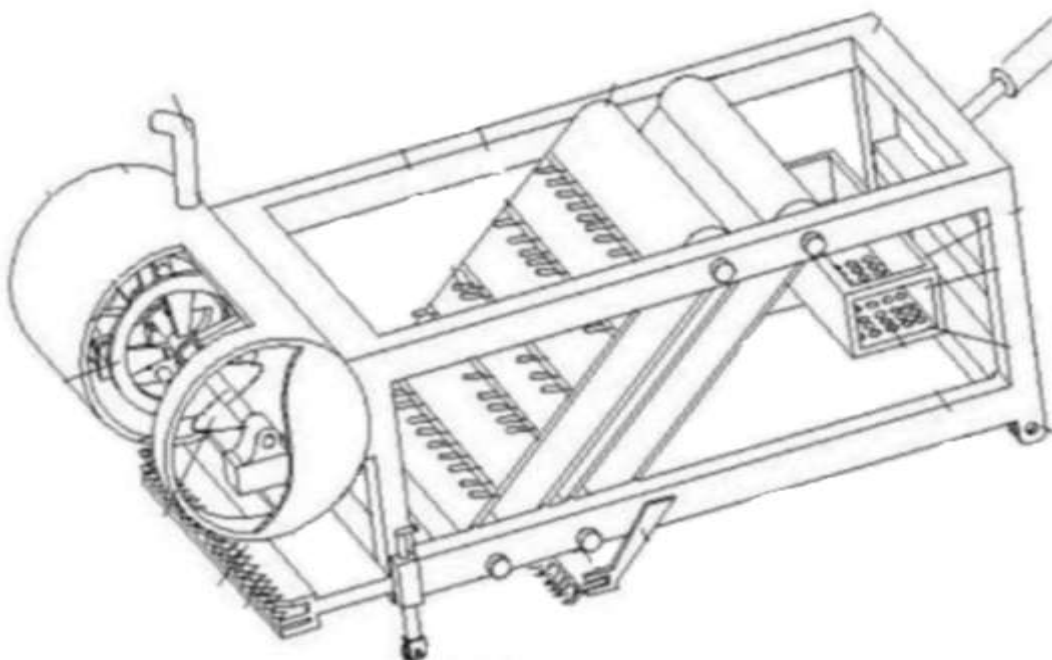


Figura 9. Colhedora de alho com sistema de escavação.
Fonte: JIANG et al., 2018.

Zhu et al. (2018), projetaram uma máquina para colheita de alho com patente datada de 2018. Essa máquina é acoplada na parte traseira da estrutura e vem equipada com aparelhagens para colheita de alho. A parte frontal da estrutura é equipada com um mecanismo de redução de corte do caule e da haste do alho (Figura 10).

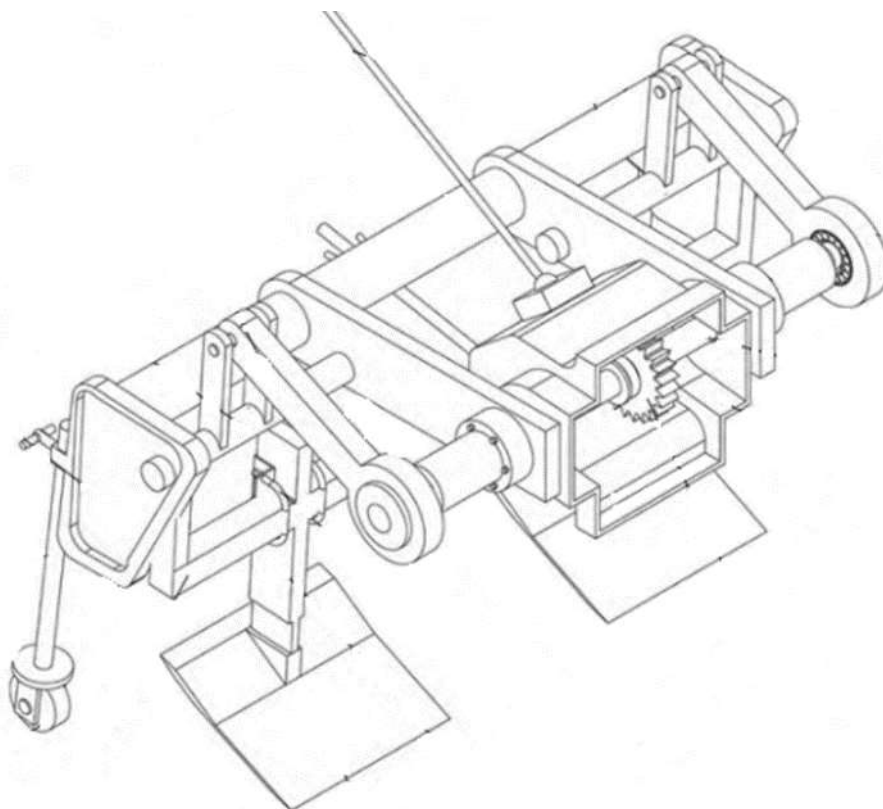


Figura 10. Colhedora de alho com sistema de corte de caule.
Fonte: ZHU et al., 2018.

Também existem no mercado máquinas com técnicas de colheita parcial e completa, ou seja, funções de recolhimento, beneficiamento e acondicionamento dos bulbos em sacos. Porém, o tamanho das máquinas e os altos custos não são viáveis para os agricultores familiares que cultivam alho nas montanhas da América do Sul. No entanto, com uma produção comercializada à nível mundial não há adaptação às exigências e necessidades requeridas.

Na Figura 11 pode-se observar um exemplo de máquina que executa funções completas na colheita do alho. Esse maquinário é comercializado como série 4DS-6, possuindo seis linhas de colheita ao mesmo tempo. A profundidade dos sulcadores pode ser regulada entre 60 e 160mm e, o corte da haste pode ser regulado de 30 a 50mm de altura, com um raio de giro de 3.000mm.



Figura 11. Colhedora de alho autopropelida 4DS-6.
Fonte: ZHU et al., 2018.

No que tange a máquinas fabricadas para diferentes condições de solo, pode-se citar a colhedora de alho 4U-6 da Jiayang (AGRIEXPO, 2018), com seis linhas, regulagem de profundidade entre 60 e 200mm, sendo autopropelida para executar trabalhos em terrenos planos (Figura 12). Esse modelo de maquinário realiza arrancamento, limpeza, classificação, ensacamento e transporte do cultivo.



Figura 12. Colhedora de alho 4U-6.
Fonte: AGRIEXPO, 2018.

Quanto a máquinas de médio porte, a *Romiter Machinery Co.* desenvolveu uma colhedora de alho que cumpre as funções de arrancar, cortar raízes e hastes ao mesmo tempo, colher e embalar (ROMITER GROUP, 2019). A fonte de potência desta máquina é um trator de rabiça, conforme apresentado na Figura 13.



Figura 13. Colhedora de alho com sistema de corte de raízes.
Fonte: ROMITER GROUP, 2019.

Já, Zhang Rui et al. (2018), apresentam um design para máquina colhedora de alho, onde o foco do desenvolvimento foi a invenção do sistema de escavação, corte de raiz e haste. O sistema foi comprovado como eficiente no corte de raiz (Figura 14).

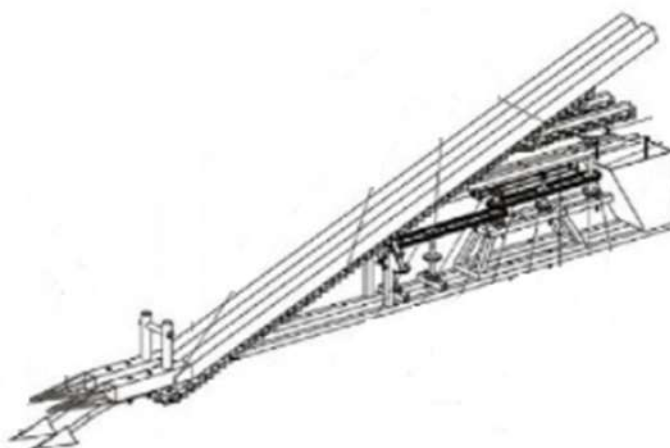


Figura 14. Colhedora de alho e programa de mecanização.
Fonte: TIAN et al., 2018.

O corpo da máquina é caracterizado por incluir uma estrutura junto ao mecanismo de escavação, onde um mecanismo de corte de raiz está unido à estrutura de transporte da planta, este transportador está composto por duas barras fixas com

ângulo 20° com o solo, enquanto a barras que suportam a estrutura e outros componentes estão a paralelas ao plano do solo. O mecanismo de escavação é instalado na extremidade frontal da estrutura junto ao mecanismo do transportador.

No Apêndice 2 encontram-se as informações das patentes relevantes para este trabalho.

3.2.1 Projetos focados na agricultura familiar

Para Spagnolo (2014), a agricultura familiar é responsável por garantir boa parte da segurança alimentar do país. Entretanto, as unidades de base familiar tendem a encontrar dificuldades no que diz respeito à mão de obra e manejo de plantas concorrentes (comumente denominadas plantas daninhas).

No que se refere a maquinário para unidades de base familiar, Spagnolo (2014) realizou testes com prototipagem, utilizando controle térmico para eliminar plantas concorrentes nestas unidades. O autor constatou a validade e eficácia do maquinário desenvolvido. Referindo-se às necessidades dos agricultores do Rio Grande do Sul, Oldoni (2016), relata que grande parte dos agricultores familiares tendem a realizar trabalhos manuais pesados, contando com um número limitado de sistemas mecanizados. Dessa forma, o autor desenvolveu um protótipo de uma colhedora/beneficiadora de cebola. Por meio deste maquinário foi possível reduzir tempo e minimizar esforços físicos no momento da colheita.

No Brasil, o desenvolvimento de mecanização agrícola direcionado para a cultura de alho nas unidades familiares, não apresenta inovações há mais de uma década. Araújo (1993) realizou o desenvolvimento de um sistema mecanizado que envolvia as operações de debulha, plantio de bulbilhos, colheita, beneficiamento e classificação dos bulbos. A proposta era aumentar a produtividade e a capacidade efetiva de trabalho, porém o projeto não era direcionado a unidades familiares.

Sendo assim, um dos últimos trabalhos direcionados a unidades familiares e cultivo de alho foi publicado por Zardo, Fagundes e Forcellini (2004). Nele, os autores objetivaram o desenvolvimento de um equipamento para o beneficiamento de bulbos de alho. Os autores elaboraram um novo equipamento que realizava o corte das hastes, raízes e classificação dos bulbos na mesma operação. Dessa forma, além de economicamente viável, conseguiram projetar um equipamento que atendia a necessidade dos produtores em unidades familiares.

Outro projeto foi apresentado na busca de melhorias na mecanização na colheita de alho. Ojeda (2018) apresenta um modelo de estruturas em aço 1020 e com viga em “L”. Na Figura 15 segue representada a estrutura frontal e posterior da máquina colhedora de alho.

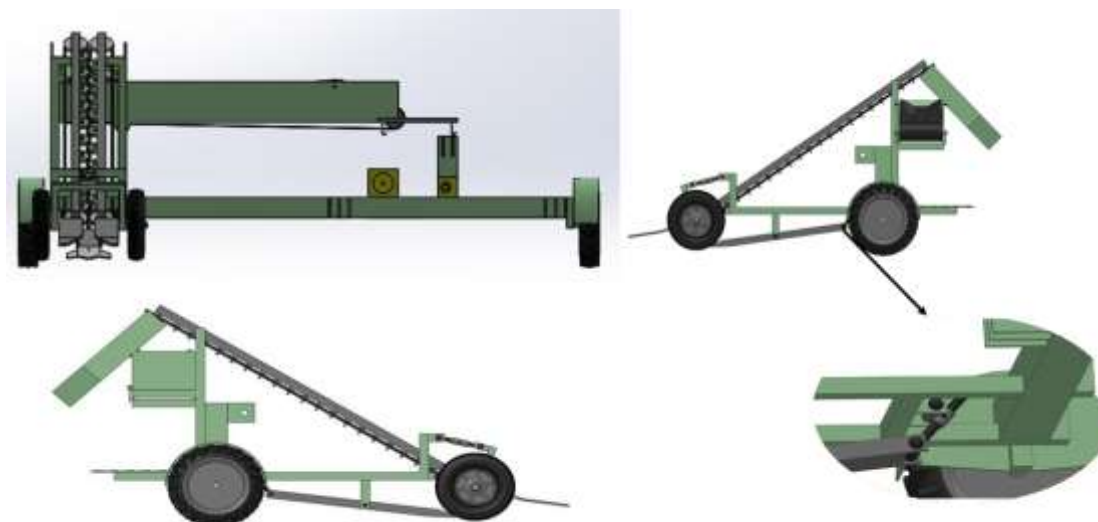


Figura 15. Concepção de uma máquina colhedora de alho.
Fonte: OJEDA, 2018.

Na lateral direita da Figura 15, é possível observar a haste do sulcador acoplada a uma barra de regulação de profundidade, sendo esta engatada na estrutura frontal da máquina. Já, na parte frontal do maquinário é possível destacar os direcionadores, que auxiliam no levantamento das folhas e da haste. Estes mecanismos passam a ser guiados entre duas correias, onde a planta de alho é arrancada e, ao mesmo tempo, o sulcador rompe o solo e corta as raízes. Após, a planta de alho é elevada pelo sistema de correias até o cortador, onde é liberada da haste e das folhas. Dessa forma, permite que o bulbo de alho caia sobre a correia transportadora, passando por uma escovação até o momento do ensaque.

3.3 Metodologia de projeto de máquinas agrícolas

Para que sejam atendidas as metas necessárias para as soluções de problemas, propõe-se a utilização de metodologias com processos pré-definidos. Segundo Pahl et al. (2005), é importante que o projetista se baseie em conhecimentos científicos, naturais e de engenharia, levando em conta condicionantes como

materiais, custos e tecnologias. Dessa forma, torna-se possível atender às restrições legais e ambientais para o desenvolvimento dos maquinários.

Romano (2005) afirma que, as metodologias com abordagem sistemática no projeto de produtos são práticas cada vez mais comuns em empresas. Busca-se a maior qualidade dos produtos, a fim de aumentar a competitividade e, conseqüentemente, a venda. Segundo Reis e Forcellini (2006), várias metodologias de projeto têm sido empregadas para a performance dos produtos, redução de tempo e custos de desenvolvimento. Entretanto, as diferenças entre a variedade de metodologias existentes são, na maior parte dos casos, pela nomenclatura. Segundo os autores, por meio da metodologia é possível incorporar os atributos indispensáveis ao cumprimento da tarefa a que se destina, sejam eles de ordem funcional, qualidade, comercial e/ou de fabricação.

Reis e Forcellini (2006) dividem o projeto de máquinas agrícolas em quatro fases: i) projeto informacional; ii) projeto conceitual; iii) projeto preliminar e iv) projeto detalhado. Por meio da divisão, conforme Mazetto (2000), é possível organizar as informações, os resultados e os momentos de tomada de decisão de modo que, o conhecimento sobre o problema e suas respectivas soluções aumentem a cada etapa. O princípio da metodologia empregada é o modelo de projeto de produtos proposto por Pahl et al. (2005), sendo posteriormente adaptado para trabalhos acadêmicos por Rozenfeld e Forcellini (2006).

As duas primeiras etapas (informacional e conceitual) foram desenvolvidas por Ojeda (2018). Sendo assim, o foco do presente trabalho se concentra na etapa preliminar. Segundo Pahl et al. (2005), um projeto que já parte da concepção de criar um produto de acordo com critérios técnicos estabelecidos na fase de projeto informacional, tende a determinar de forma mais clara e completa os sistemas, subsistemas e componentes (SSCs) na fase preliminar, ou seja, consegue-se definir o material, as dimensões principais e a configuração do produto definitivo de forma total e dinâmica.

Na fase do projeto informacional ficam definidas as necessidades relacionadas ao produto, conferindo atributos e submetendo a checklists. Dessa forma, dá-se origem às especificações de projeto (as características do produto), com seu valor meta, sua forma de avaliação e seus aspectos indesejados (REIS, 2003; BACK et al., 2008). Na fase do projeto conceitual tende-se a definir o escopo do problema, por meio da abstração das especificações de projeto. Após, é possível estabelecer a

estrutura funcional que auxiliará no direcionamento dos princípios de solução para as diferentes funções do produto. Os princípios de solução são combinados gerando diferentes concepções que, posteriormente, são avaliadas e selecionadas por meio de uma matriz de avaliação. Sendo assim, a concepção que melhor atender as expectativas do projeto será otimizada e detalhada (REIS, 2003; PAHL et al., 2005; BACK et al., 2008).

O projeto preliminar é caracterizado por tratar da configuração do produto, tendo como primeira informação os resultados das duas primeiras fases. Essas informações compreendem as especificações e requisitos de projeto, informações de gerenciamento e controle, entre outros. Na fase de projeto preliminar é realizado o desdobramento ou estruturação do produto de forma detalhada, compreendendo basicamente sistemas, subsistemas, peças e componentes; sendo desenvolvidos separadamente (AREND, 2003).

O projeto detalhado dá prosseguimento à fase anterior, tendo como objetivo desenvolver e finalizar o projeto, por meio da conclusão dos desenhos, documentações e dimensionamentos. Diversos autores recomendam tratar a preparação e o desenvolvimento dos procedimentos para a fabricação paralelamente com a área responsável pela produção do produto. Dessa forma, a equipe do projeto exerce a função de projetar o produto, tendo em vista características que envolvem a manufatura do mesmo (AREND, 2003).

A seguir serão descritas as principais características da fase preliminar do processo de projeto, segundo os principais autores encontrados na literatura, focando em passos, métodos e ferramentas indicadas.

3.3.1 Projeto preliminar

Alguns autores propõem a divisão da fase preliminar em diferentes atividades que, de acordo com a nomenclatura, pode ser compreendida por passos, tarefas, etapas e fases. Porém, verifica-se que os princípios, objetivos e atividades envolvidas são basicamente iguais em cada metodologia. Em suma, pode-se dizer que a entrada nessa fase é a concepção de produto e, segundo Pahl et al. (2005), sua importância está no fato de envolver informações e decisões de projetos simultaneamente, bem como a repercussão dessas decisões em outras áreas (AREND, 2003).

Na Figura 16 está representada a fase de projeto preliminar segundo Pahl et al. (2005), na qual se pode verificar a morfologia, estrutura e divisão para ela estabelecidas.

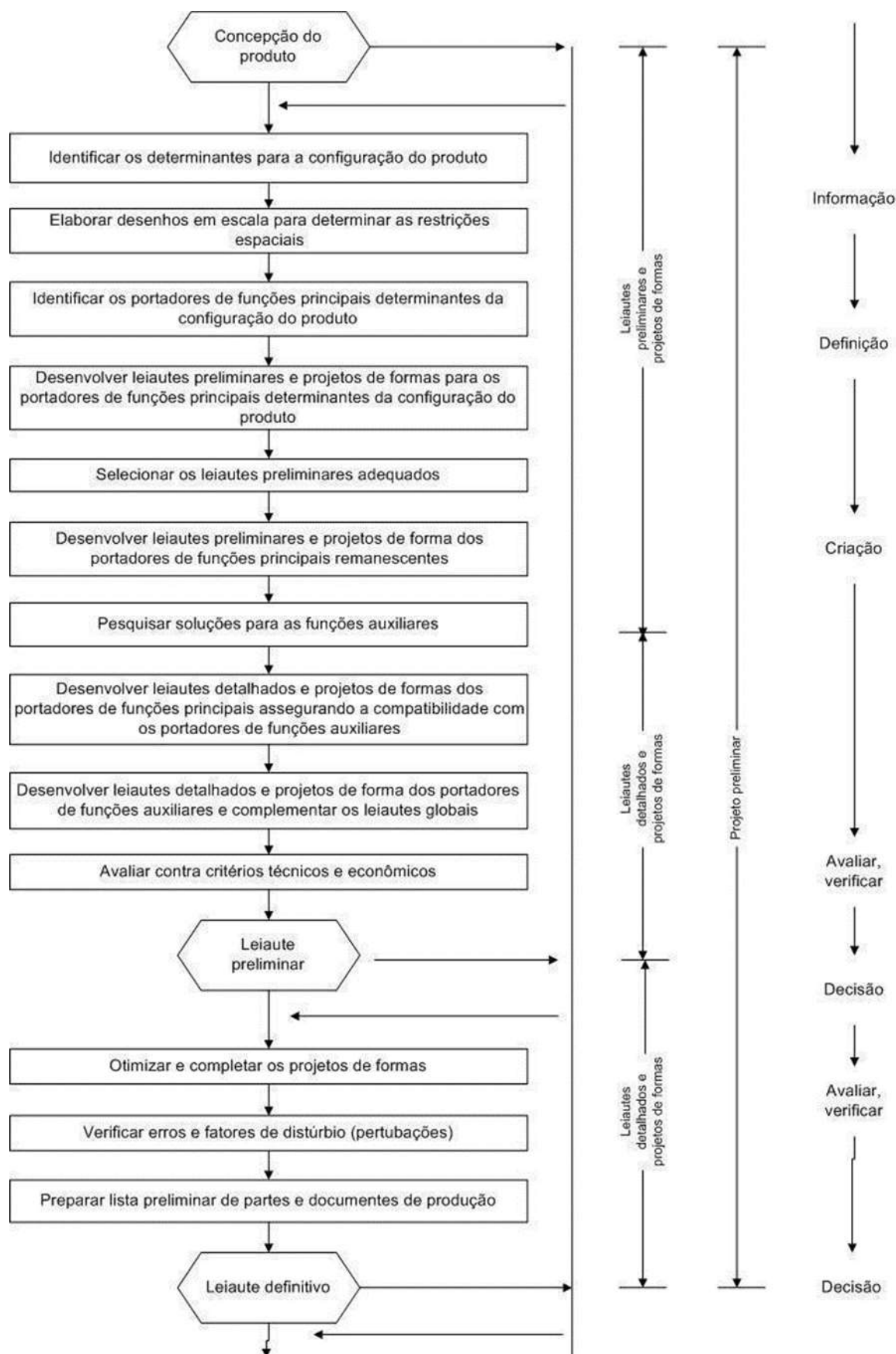


Figura 16. Representação dos passos da fase do projeto preliminar.
Fonte: PAHL et al., 2005.

Na primeira etapa são elaboradas determinantes da forma, a partir de uma lista de requisitos relacionados a: potência, vazão, dimensões das interfaces, direção de fluxo ou de movimento, resistência à corrosão, vida útil, dentre outros (PAHL et al. 2005). Neste momento, os desenhos podem ser reproduzidos em escala, verificando restrições de tamanho, forma e disposição. Além disso, se necessário, pode-se realizar o dimensionamento prévio dos principais princípios de solução. Aqui devem ser especificados os itens como: posições de eixos, limitação de montagem e restrições de instalação (REIS, 2003).

A elaboração de leiautes preliminares e desenhos de forma tende a ser iniciada com a identificação dos portadores de efeito físico determinantes, tomando-se como referência os componentes que desempenham as funções principais do sistema técnico e que, determinam o arranjo da configuração global do produto (PAHL et al. 2005). Posteriormente, são desenvolvidos os leiautes preliminares e desenhos de forma destes portadores de efeito físico. Nesse momento, ocorre a definição provisória do volume e das dimensões (PAHL et al. 2005), sendo possível partir para a confecção dos leiautes preliminares e desenhos dos demais portadores de efeito físico (ainda não examinados).

Na segunda etapa do projeto preliminar deve-se, segundo Reis (2003), elaborar leiautes detalhados e desenhos de forma. Em primeiro momento verifica-se a necessidade de incorporação de funções auxiliares aos desenhos gerados na primeira etapa. Caso seja necessário, buscam-se soluções para as funções auxiliares. Essas soluções devem ser incorporadas ao leiaute e aos desenhos de forma, de acordo com regras básicas, tais quais: clareza, simplicidade e segurança. Dessa forma, pretende-se atingir a função técnica, apresentando viabilidade econômica e segurança no âmbito socioambiental (PAHL et al., 2005). Os leiautes gerais devem ser completados com o acréscimo de componentes padronizados às funções auxiliares e, representados em conjunto com todos os componentes detalhados, formando o leiaute do produto (PAHL et al., 2005). O leiaute do produto deve ser avaliado sob critérios técnicos e econômicos, conforme processo de seleção e avaliação (FORCELLINI, 2003).

Na terceira etapa do projeto preliminar finalizam-se as verificações e dá-se início a eliminação dos pontos fracos encontrados no processo de avaliação. Nesse momento, é necessário otimizar e completar os desenhos de forma até então realizados. Pode ser necessária a repetição de atividades anteriormente

desenvolvidas no projeto preliminar, como a busca por soluções para funções auxiliares, desenvolvimento de novos leiautes ou aproveitamento de soluções adotadas em variantes de leiaute não utilizadas (REIS, 2003). Durante a avaliação, verificam-se erros e fatores de perturbação. Conforme Pahl et al. (2005), para a realização dessa tarefa, deve-se utilizar a lista de verificação para a configuração, sendo possível corrigir falhas no leiaute do produto, seja pelo acréscimo ou modificação dos SSCs (Tabela 4).

Tabela 4. Lista de verificação com as principais características para o projeto da forma.

Características	Exemplos
Função	A função estipulada é cumprida? Quais funções auxiliares são necessárias?
Princípios de solução	Os princípios de solução escolhidos produzem as vantagens e os efeitos desejados? Quais fatores de perturbação podem ser esperados?
Leiaute	A escolha do leiaute geral, das formas dos componentes, material e dimensões produzem: a durabilidade adequada (resistência), deformação permissível (rigidez), estabilidade adequada, ausência de ressonância, espaço para expansão, desgaste e corrosão compatíveis com a vida útil e as cargas estipuladas?
Segurança	Foram considerados todos os fatores afetando a segurança dos componentes, da função, da operação e do ambiente?
Ergonomia	Foram consideradas as relações homem-máquina? Foram evitadas as causas de ferimentos humanos ou stress desnecessários? Prestou-se atenção à estética?
Produção	Houve uma análise econômica e tecnológica dos processos de produção?
Controle	As verificações necessárias podem ser aplicadas durante e após a produção ou a qualquer outro momento? Elas foram especificadas?
Qualidade	
Montagem	Os processos internos e externos de montagem podem ser feitos de forma simples e na ordem correta?
Transporte	As condições internas e externas de transporte e seu risco foram examinadas e levadas em consideração?
Operação	Foram consideradas todas as ocorrências que surgem durante a operação ou utilização como ruído, vibração e manuseio?
Reciclagem	O produto pode ser reutilizado ou reciclado?
Manutenção	A manutenção, a inspeção e a revisão podem ser realizadas e verificadas?
Custo	Foram observados os limites de custo? Surgirão custos operacionais adicionais ou extras?
Cronograma	As datas de entrega poderão ser cumpridas? Existem modificações de projeto que possam antecipar a situação de entrega?

Fonte: PAHL et al., 2005.

Na última tarefa do projeto preliminar, deve-se realizar a preparação da lista de partes preliminares e documentos iniciais para a produção. Ou seja, essa tarefa vem a ser o leiaute definitivo do produto com a lista de peças especificadas (REIS, 2003).

Conforme Pahl et al. (2005), para o projeto detalhado tanto a disposição, quanto à forma, as dimensões e as tolerâncias de todos os componentes devem ser especificadas e expressas pela documentação completa necessária à produção do produto. Nessa fase, são empregadas uma série de normas e procedimentos padronizados, conforme as necessidades dos meios de fabricação. Reis (2003), com

base na metodologia proposta por Pahl et al. (2005), identificou três etapas para o desenvolvimento do projeto detalhado:

- i. Etapa 1: deve-se detalhar o leiaute definitivo do projeto. Para tanto, deve-se efetuar os dimensionamentos finais e desenhos detalhados dos componentes individualizados (REIS, 2003).
- ii. Etapa 2: integram-se informações técnicas, por meio da confecção dos desenhos de leiaute, de montagem e de partes, a fim de demonstrar de que forma os componentes são montados para formar os subsistemas. Esses sistemas servirão de auxílio para a produção final (REIS, 2003).
- iii. Etapa 3: revisa-se o projeto e as normas, verificando se o produto atende as especificações para a fabricação dos componentes, e se as normas dizem respeito à estrutura organizacional da empresa (REIS, 2003).

3.4 Método de Elementos Finitos (MEF)

Tanto um maquinário, quanto uma estrutura ou peça, devem ser projetados para que cumpram, durante toda a sua vida útil, as finalidades de utilização. Entretanto, estes produtos devem ser projetados para que respondam às ações submetidas, sem comprometer sua segurança, durabilidade e conforto. Devido à complexidade do comportamento material, da geometria e das cargas, devem-se utilizar cálculos numéricos que auxiliam na predição de possíveis falhas estruturais e na obtenção de soluções aproximadas do cenário a campo (RIBEIRO, 2004).

Atualmente diversas são as literaturas onde é abordada a importância dos métodos numéricos. Estudos a respeito da discretização de funções contínuas iniciaram-se na década de 40, pelo método *Courant*, seguindo a ideia de utilização de elementos triangulares e o princípio da minimização de energia potencial para estudos de torção em peças mecânicas (CLOUGH, 1960). O Método dos Elementos Finitos foi inserido neste contexto em meados dos anos 60 (HUEBNER, 1976), sendo utilizado inicialmente na área aeroespacial.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se destacado devido a sua generalidade, além de elevada precisão para calcular tensões/deformações. Esta técnica permite a modelagem de geometrias tridimensionais, comportamentos não-lineares, grandes deformações, realização de análises dinâmicas e outras considerações mais sofisticadas (SCHWARTZ, 2002). O método também se

apresenta como um modelo matemático para a solução de equações diferenciais parciais, tais como as equações de Poisson e Laplace (BASTOS, 2005).

O conceito mais fundamental do método é o de que toda “função contínua, seja ela temperatura, pressão ou deslocamento, pode ser aproximada por um modelo composto de um conjunto de funções contínuas (dentro de um intervalo) definidas sobre um número finito de subdomínios” denominados por elementos finitos (SEGERLIND, 1976). Ou seja, o modelo consiste em diferentes métodos numéricos que aproximam a solução de problemas descritos por equações diferenciais, ordinárias ou parciais, por meio da subdivisão da geometria do problema em elementos menores (elementos finitos), nos quais a aproximação da solução exata pode ser obtida por interpolação de uma solução aproximada (ALVES, 2007).

Para Szabó e Babuška (2011), o método deriva de modelos matemáticos com a capacidade de transformar um conjunto de dados, analisados normalmente na interação dos deslocamentos, tensões, fatores de intensidade de estresse, cargas limite, frequências naturais, entre muitos outros na mecânica de sólidos. Os autores defendem a importância deste, afirmando que o propósito da simulação aplicando o método de números finitos é realizar previsões e obter respostas dos sistemas físicos para diferentes maneiras de excitação do ambiente, e a partir de tais previsões, estipular os melhores métodos para o desenvolvimento do problema.

Referindo-se a concepção do método dos elementos finitos, diversos autores indicam diferentes contextualizações. Para Filho (2012), o MEF é um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos de análise numérica, confirmando os parâmetros expostos e configurando-os pela análise, a fim de apresentar ao modelo numérico as condições necessárias para sua validação. Knight (1993) indica que a análise por elementos finitos é uma técnica fidedigna para ser utilizada na análise de tensões e vibrações, assim como para problemas envolvendo transferência de calor, mecânica dos fluidos e outras aplicações.

Para Magalhães et al. (2012), a análise por elementos finitos consiste na divisão de uma estrutura, utilizando malha de elementos e funções aproximadas para descrever o comportamento das variáveis envolvidas no problema. Já para Szabó e Babuška (2011), os elementos finitos vêm com o intuito de estudar os sistemas físicos, de forma que estes estudos devem chegar o mais próximo da realidade, de maneira que tenham a mesma eficiência de um método físico, porém, com um custo menor. Para Saeed (2007), o método de elementos finitos é um processo numérico que pode

ser aplicado na obtenção de soluções na engenharia, no estudo de estresse dos materiais nas estruturas, transferências de calor, fluidos eletromagnéticos entre outros, com eficácia.

Esse método tem sido amplamente utilizado no desenvolvimento de projetos, como afirma Madenci e Guven (2015). Conforme sugerido por Turner et al. (1956), o MEF é uma poderosa técnica para soluções aproximadas a uma variedade de problemas de engenharia do mundo real, tornando-se essencial na modelagem dos fenômenos físicos em várias disciplinas da engenharia. No campo da engenharia de estruturas, o método de elementos finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores; apresentando uma maior simplicidade e, conseqüentemente, maior versatilidade (AZEVEDO, 2003).

3.4.1 Aplicações práticas do MEF

Para enfatizar o método de elementos finitos, diversos autores destacam suas mais variadas aplicações e características.

Niemczewski (2012) certificou, por meio de sua tese, que as simulações no MEF auxiliam nos projetos estruturais, além da possibilidade de uma análise modal, em componentes de formatos variados. Patil et al. (2015), com auxílio do MEF, buscou eliminar frequências inferiores a 50Hz, evitando assim o fenômeno da ressonância em estruturas civis. Madhu e Venugopal (2014) e Ala, Reddy e Braradwaja (2016) concluíram ser possível, por meio do MEF, obter os valores máximos de tensão, deformação e vida em fadiga para a estrutura em análise (chassi).

Importantes resultados vem se destacando na engenharia utilizando-se as simulações estruturais, de forma conjunta ao MEF, no desenvolvimento de produtos Pegoraro, Gomes e Novak (2018) observaram, por meio do método dos elementos finitos, que uma estrutura sujeita a cargas devido ao escoamento, movimenta-se conforme seus modos de vibração. Cetina-Quiñones et al. (2012) observaram que, por meio do MEF, foi possível prever efetivamente a temperatura do fluido em coletores solares, minimizando os custos de fabricação do produto.

3.4.1.1 Aplicações do MEF em máquinas agrícolas

O método de elementos finitos também vem sendo muito utilizado na engenharia agrícola, como ferramenta auxiliar no desenvolvimento de máquinas e implementos, sendo possível determinar a condição de equilíbrio estático ou dinâmico para um corpo (HOLZAPFEL, 2000).

Diversos estudos foram realizados para medir as propriedades do alho, avaliando a estrutura e o desempenho da máquina colhedora. Kim et al. (2020) atestaram em suas análises que o método de números finitos foi eficiente na verificação do estresse nas forças atuantes na lâmina de corte do solo para a colheita de alho. Park et al. (2019), concluíram que o MEF pode ser aplicado para avaliar as forças de impacto que atuam sobre o alho e para melhorar a estrutura das colhedoras de alho. Sun et al. (2018a), desenvolveram uma máquina colhedora de alho, que se baseia em MEF. A simulação melhorou a forma, o tamanho e as concentrações das forças estáticas na ponteira de um escarificador para a colheita mecanizada de alho.

Noh et al. (2002) estudaram os fundamentos e propriedades da máquina colhedora como força de tração e resistência à compressão por meio do método de elementos finitos. Para Silva et al. (2014), o MEF mediante simulações estáticas obteve significativos resultados no desenvolvimento de uma máquina agrícola para colheita em terrenos com 50% de declividades. Ferreira et al. (2016) conseguiram inferir recomendações específicas de regulagens para a colheita mecanizada do café, por meio do método de elementos finitos.

3.4.2 Características específicas do MEF

Filho (2012) descreve que, indistintamente do campo de estudo e da complexidade do problema, as etapas fundamentais em qualquer desenvolvimento de projeto que utilize o MEF devem ser as mesmas. Segundo Saeed (2007), existem sete etapas básicas para utilização do método de números finitos em qualquer análise.

A primeira etapa é criar e discretizar o domínio da solução em elementos finitos; ou seja, subdividir o problema em nós e elementos. A segunda etapa é assumir uma função de forma a representar o comportamento físico de um elemento, ou seja, presume-se que uma função contínua aproximada represente a solução de um elemento. Na terceira e quarta etapa, deve-se desenvolver equações para um

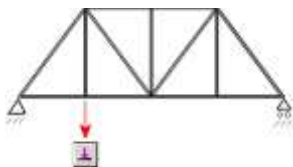

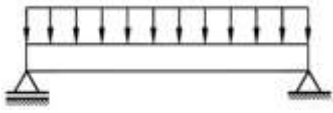
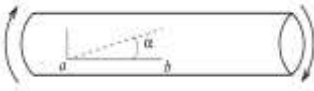
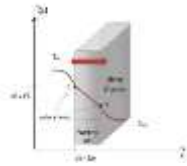

elemento e reunir estes elementos de forma a apresentar todo o problema por meio de uma matriz de rigidez global. Na quinta etapa pode-se aplicar condições de limite, iniciais e carregamentos.

Na etapa seis (de solução) é possível resolver um conjunto de equações algébricas simultaneamente, lineares ou não lineares, para obtenção de resultados nodais, como valores de deslocamento em diferentes nós. Na sétima e última etapa, a fase de pós-processamento permite que se obtenham outras informações importantes. Neste ponto, o estudo principal são os valores das principais tensões, os fluxos de calor, os estudos modais, etc. Contudo, Saeed (2007) enfatiza que, existem diversas abordagens para formular problemas de elementos finitos, salientando que é importante observar que as etapas básicas envolvidas em qualquer análise de elementos finitos (independentemente de como geramos o modelo de elementos finitos) sejam as mesmas sete acima mencionadas.

Segundo Filho (2012), quando existe um modelo sólido a ser estudado deve-se atribuir as propriedades dos materiais e definir cargas e/ou restrições e, em seguida, o modelo deve ser discretizado, ou seja, deve-se gerar uma malha, consistindo na divisão da geometria em entidades relativamente pequenas e com formas simples, chamadas de elementos finitos. Cabe ressaltar que, estes são chamados de “finitos” para enfatizar o fato de que eles não são infinitamente pequenos, apenas razoavelmente pequenos em comparação ao tamanho global do modelo.

Para Saeed (2007), as equações diferenciais são derivadas da aplicação das leis e princípios fundamentais da natureza a um sistema ou volume de controle. Essas equações governantes representam o equilíbrio de massa, força ou energia. Quando possível, a solução exata dessas equações renderiza o comportamento detalhado de um sistema sob um determinado conjunto de condições.

As soluções analíticas são compostas por duas partes: homogênea e particular. Como em qualquer problema de engenharia, existem dois conjuntos de parâmetros que fornecem informações sobre o comportamento natural de um determinado sistema. Esses parâmetros incluem propriedades como módulo de elasticidade, condutividade térmica e viscosidade. Saeed (2007) resume as propriedades físicas que definem as características naturais de vários problemas no Quadro 1.

Problema	Exemplo dos parâmetros que caracterizam um sistema
Sólidos	
	para uma treliça: módulos de elasticidade, E
	para uma placa elástica: módulos de elasticidade, E
	para uma viga: módulos de elasticidade, E , momento polar e de inércia da área, J
	para um eixo: módulo de rigidez G , momento polar e de inércia da área, J
Transferência de calor	
	propriedades físicas de transferência de calor
O fluxo de fluido	
rede elétrica com entrada de alta pressão e saída de baixa pressão 	estudo da viscosidade μ , rugosidade relativa e

Quadro 1. Exemplos de problemas e parâmetros que caracterizam um sistema.

Fonte: AUTORA, 2021.

Contudo, as características do sistema, conforme mostrado no Quadro 1, ditam o comportamento natural de um sistema e sempre aparecem na parte homogênea das soluções de uma equação diferencial governante. Em contraste, os parâmetros que causam os distúrbios afetam a solução particular. É importante entender o papel desse elemento finito de parâmetros, em termos de suas respectivas aparições em matrizes de rigidez (também denominada de condutância ou resistência) e matrizes de carga ou forças.

As características do sistema sempre aparecerão na matriz de rigidez enquanto os parâmetros de perturbação sempre aparecerão na matriz de carga (SAEED, 2007).

Seed (2007) também acredita que a análise modal é uma combinação de uma forma irregular onde a estrutura trocará energia cinética com a energia de deformação continuamente, sendo então a frequência natural o valor no qual esse modo ocorre. Entretanto, quando se trabalha com elementos finitos, a resolução das equações por meio do MEF realiza aproximações da solução desejada, com a montagem de resoluções simples para elementos individuais. Sendo assim, desde a perspectiva das análises da mecânica computacional do método de números finitos, é essencial a aplicação de três ferramentas auxiliares, sendo:

- a) Pré-procedimento: o qual define o tipo de análise (estático, dinâmico, térmico, de frequência). Por meio deste, é possível a criação da malha, necessária para a análise da relação “tensão x deformação”, a partir do comportamento da deformação e do material – com a finalidade de analisar suas propriedades, segundo as cargas, as restrições e o modelo, definindo assim os melhores parâmetros para a solução do problema com as condições de contorno.
- b) Solução: é a formulação com base nos deslocamentos quando aplicado na análise estrutural, ou seja, para cada um dos nós que formam os elementos, se tem uma função de interpolação para o cálculo de seus respectivos deslocamentos.
- c) Pós-processamento: é a análise das hipóteses pré-estabelecidas relativas ao regime de deformação, como relação deformação x deslocamento; deformações pequenas ou grandes do material e; relação das tensões x deformações, obtendo assim as equações de equilíbrio nodais do elemento.

Entretanto, um dos maiores empecilhos da utilização do MEF é a dificuldade de geração de malha. Por este motivo, sua utilização tornou-se mais popular na década de 80, a partir dos avanços tecnológicos nos computadores – para geração automática de malhas. Conforme Azevedo (2003), os estudos por meio dos elementos finitos foram desenvolvidos até a inovação dos *hardwares* e *softwares*, obtendo-se resultados iguais e satisfatórios, porém de forma dinâmica.

3.5 Softwares integrados ao MEF

Para Szabó e Babuška (2011), a confiabilidade na tomada de decisão no desenvolvimento de projetos por meio de modelos matemáticos computacionais demonstra parte essencial dos esforços da modelagem. O objetivo da simulação

computacional de forma conjunta a utilização dos elementos finitos é realizar predições e respostas dos sistemas físicos, de forma dinâmica.

Conforme Filho (2012), os *softwares Computer Aided Design (CAD)* foram desenvolvidos nos anos 70, possibilitando diferentes visões dos componentes para os projetistas, em diversos campos da engenharia. De forma conjunta, foi enunciada outra tecnologia, a *Computer Aided Engineering (CAE)*, que possibilita aperfeiçoar os protótipos das análises realizadas com elementos finitos por meio de simulações e análises mais rápidas, porém, mantendo a eficácia. As tecnologias CAE e CAD foram difundidas em meados dos anos 80, como uma eficaz ferramenta de trabalho na indústria automotriz, aeronáutica, aeroespacial e metal mecânica.

Manifestando-se pouco depois, os sistemas *Computer Aided Manufacturing (CAM)* surgiram com a finalidade de aumentar a produtividade por aplicações especializadas, sendo possível por meio deste *software* reduzir o tempo de desenvolvimento do produto com base na automatização. Cada ferramenta é contextualizada de maneira diferente, a saber:

- a) *Computer Aided Design (CAD)*: consiste na modelagem por computador das estruturas ou componentes em 2D e 3D, proporcionando protótipagens virtuais, com a viabilidade do estudo das propriedades dos materiais. Sendo assim, é uma ferramenta que consiste em um *software* voltado ao desenho técnico, reunindo diversas funcionalidades;
- b) *Computer Aided Engineering (CAE)*: esta ferramenta analisa e processa cálculos de forma a minimizar tempo e custos, garantindo confiabilidade nos projetos de engenharia e facilitando os testes virtuais desde modelos numéricos computacionais até o planejamento da fabricação;
- c) *Computer Aided Manufacturing (CAM)*: é uma ferramenta que pode maximizar a utilização dos sistemas de produção, ou seja, este *software* foi desenvolvido com uma linguagem que as máquinas possam entender, transferindo informação da execução dos processos na criação dos produtos.

Assim, por volta da década de 90, as plataformas CAD/CAE/CAM estabeleceram-se na simulação dos processos envolvidos no desenvolvimento de projetos, posto que o *software* pode trabalhar com plataforma integrada CAD/CAE/CAM e promover um elevado nível de realidade visual. Além disso, é totalmente bidirecional, ou seja, uma alteração realizada no modelo de um componente é imediatamente refletida na montagem do conjunto (FILHO, 2012).

Referindo-se às vantagens destas plataformas, Huang et al. (2007) demonstraram em seu estudo a possibilidade de futuros usuários simularem o processo de construção virtual antes do início do protótipo físico. Estas propostas são conhecidas como protótipo virtual (PV) e também foram compartilhadas por Shen et al. (2005), os quais realizaram uma pesquisa utilizando a técnica de realidade virtual por meio de novas técnicas de interação para construção de um projeto PV mecatrônico. O PV pode ser apresentado como uma série de imagens gráficas ou CAD e CAE de modelos em formato de animação ou, ainda, criando sob a forma de modelos matemáticos e armazenados digitalmente no computador.

Enquanto isso, pesquisadores agrícolas que trabalham no desenvolvimento de projetos, tentam aprimorar as plataformas para construção de maquinários agrícolas que permitam ao protótipo virtual acessar questões gerais de layout físico, facilitando modificações do projeto desde sua fase inicial para atender às necessidades específicas dos clientes (SHEN et al., 2005; HUANG et al., 2007; TABILE et al., 2011). Silva et al. (2014) expõem que, a simulação numérica anexada a modelos representativos, têm se mostrado uma ferramenta viável para o entendimento do processo de colheita de uma máquina agrícola. Niemczewski et al. (2014), abordou a mesma temática estudando o comportamento estrutural de um chassi para uma máquina agrícola de quatro linhas, focada para unidades produtoras familiares.

Dentro desta linha, portanto, é que Law e Kelton (1991) afirmam que por meio da simulação, é possível prever o comportamento do sistema com o alvo de restringir os possíveis riscos na tomada de decisão, identificando os problemas previamente a sua ocorrência, reduzindo assim os custos na avaliação da viabilidade técnica e econômica de um determinado produto em desenvolvimento.

Dym e Little (2010) afirma que os desenhos no sistema CAD/CAE são usados no processo de projeto de diferentes maneiras como:

- 1) Servir como plataforma de lançamento e apoiar análises de um projeto à medida que ele evolui;
- 2) Simular o comportamento ou desempenho de um projeto, fornecendo registro de sua geometria ou formato;
- 3) Facilitar a comunicação das ideias referentes ao projeto entre os projetistas e
- 4) Comunicar o projeto final para os especialistas em fabricação.

Silva et al. (2014) salientam que os projetistas de máquinas na engenharia vêm auxiliando sua concepção com a assistência por computador (CAD), constituindo-se

um coadjuvante para o desenvolvimento da tecnologia, da pesquisa e do crescimento industrial.

3.6 Análise de estruturas

As estruturas estão sujeitas a cargas que provocam respostas em forma de deformações. Estas, podem estar relacionadas tanto aos materiais envolvidos no projeto das estruturas quanto aos critérios de falhas selecionados, que representarão essas respostas. O fator de segurança ao qual os componentes da estrutura estão sujeitos será a tolerância aceita nos projetos.

3.6.1 Tensões, deformações e fator de segurança

As análises realizadas em alguns *softwares* obedecem às seguintes características:

- a) As tensões no material atuam no regime linear no qual as tensões são proporcionais às deformações. Conforme Magalhães et al. (2012), em um modelo de material linear, a magnitude da tensão máxima não é limitada pela tensão de escoamento (ou de ruptura) como na prática. Dessa forma, o escoamento do material não é modelado e esse fato pode ser interpretado com base nos valores de tensão apresentados nos resultados, ocorrendo ou não escoamento (SILVA et al., 2014). Cabe ressaltar que, grande parte das estruturas analisadas apresentam tensões abaixo da tensão de escoamento;
- b) Um fator importante nas deformações é a análise da alteração de rigidez estrutural. Quando a rigidez estrutural não é alterada no processo de deformação, essa deformação será classificada como pequena e, caso haja alteração significativa na rigidez estrutural, a deformação será considerada como grande; e
- c) As cargas tendem a ser aplicadas de forma lenta para ignorar os efeitos inerciais, sendo consideradas como estáticas. Uma vez que as cargas são estáticas, entende-se que todas as cargas, assim como as restrições, não são alteradas com o tempo. Alguns exemplos são: cargas de gravidade, forças centrífugas com velocidade constante, pressão, dentre outras.

Hibbeler (2010) noticia que o estado geral das deformações em determinado ponto de um corpo é representado pela combinação de alguns componentes, caracterizando um estado triplo de tensões e deformações, a saber: 3 componentes de deformação (ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z) e 3 componentes de deformação normal (γ_{xy} , γ_{xz} , γ_{yz}). Os componentes de deformação normal e por cisalhamento no ponto variam de acordo com a orientação do elemento, tornando-se estes os deformadores do material em cada fase (Figura 17).



Figura 17. Estado do plano de deformações de material.
Fonte: HIBBELER, 2010.

Pode-se observar que as deformações normais são produzidas por mudanças no comprimento das direções X e Y e, a deformação por cisalhamento é produzida pela rotação relativa de dois lados adjacentes do elemento. Assim, Hibbeler (2010) descreve o efeito de Poisson, ou seja, onde o estado plano de deformação e tensão apresentam três componentes localizados no mesmo plano, sem este plano causar necessariamente um estado plano de deformação ou vice-versa, no plano de tensões.

E é por meio desta perspectiva que Hibbeler (2010), no que tange ao efeito Poisson, descreve que um corpo deformável que é submetido a uma força axial de tração, não só se alonga como também se contrai lateralmente. De forma semelhante, uma força de compressão que atua sobre um corpo faz com que ele se contraia na direção da força e seus lados tendam a expandir lateralmente.

Sendo assim, é importante conhecer e entender o diagrama de tensão-deformação dos materiais. A partir desse diagrama torna-se possível identificar as propriedades dos materiais. O diagrama pode ser obtido por meio de ensaios que permitam dividir os dados de força aplicada e de variação de comprimento, pela área original da seção transversal e comprimento original do corpo do experimento. A Figura 18 demonstra o diagrama tensão (σ) no material no eixo y correspondente a

cada deformação (ϵ) no eixo x. Nela, 1) é o limite elástico; 2) é o limite de proporcionalidade; 3) é o fim do escoamento; 4) é o limite de resistência e início da estricção e 5) é o limite de ruptura.

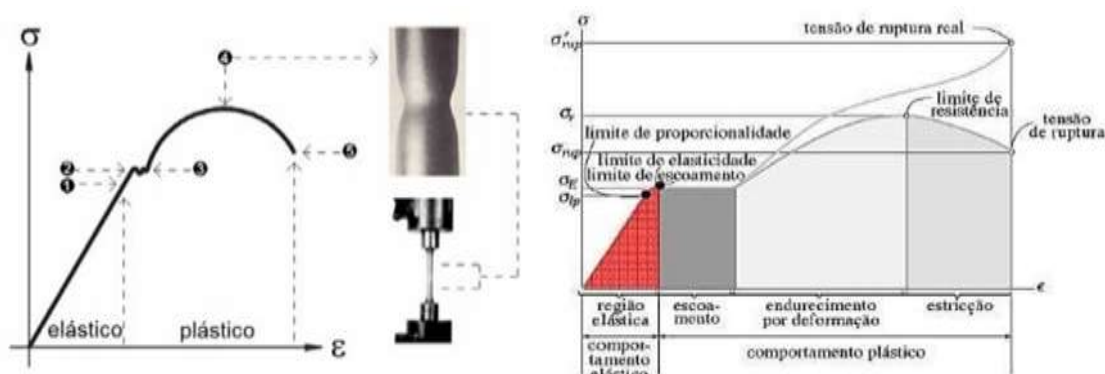


Figura 18. Diagrama de tensão-deformação convencional e real para um material dúctil.
Fonte: ASHBY; JONES, 1996.

Boeira e Beck (2007) informam que, na maioria dos casos, quando um material é empregado em designs mecânicos é indispensável se conhecer as características desses materiais por meio da submissão dele a esforços de forças ou cargas. O projetista deve ter conhecimento de diversas características dos materiais, dentre elas a ductilidade – grau de deformação de uma estrutura até sua ruptura.

A ductilidade é uma propriedade mecânica que representa o grau de deformação plástica que foi suportado pelo material até a fratura (Figura 18). Na Equação 1 pode-se observar como obter os valores de tensão.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Onde: σ é a tensão (Pa); P é a força (N) e A é a área (m^2).

A deformação pode ser dividida em elástica e plástica. A deformação elástica é reversível, desaparecendo quando a tensão é removida. Já a deformação plástica é proporcional à tensão aplicada. Para Pimenta (2006), os sólidos são considerados uma estrutura quando têm a função de transmitir ou resistir à ação de esforços externos. Conforme Pimenta (2006), os sólidos podem ser considerados rígidos quando a distância relativa entre quaisquer dois de seus pontos materiais não se altera no tempo. Caso contrário, passam a ser chamados deformáveis.

Conforme Beer e Johnston Júnior (1995), as deformações de um corpo são medidas de aumento ou de redução. A deformação específica (ε) pode ser obtida pelas Equações 2, 3 e 4, atuando em corpos considerados unidimensionais (linear ΔL); bidimensionais (superfície ΔS) ou tridimensionais (volume ΔV).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} \quad (4)$$

Onde: ΔL é a variação linear; ΔS é a variação de superfície; ΔV é a variação volumétrica; L é a largura inicial do corpo; S é a área inicial do corpo e V é o volume inicial do corpo.

Mott (2015) entende que os métodos de previsão de falha definem a relação entre as tensões aplicadas sobre um componente estrutural e a resistência do material de que é feito, com relação aos tipos de carregamentos. Assim, consideram-se como métodos de previsão de falhas:

- a) Tensão normal máxima com aplicação em tensão estática uniaxial sobre materiais frágeis;
- b) Tensão de escoamento aplicada em tensão estática uniaxial sobre materiais dúcteis;
- c) Tensão máxima de cisalhamento com cisalhamento direto, vertical e torsional sobre materiais dúcteis;
- d) Resistência à fadiga com tensão de cisalhamento normal reversa/cíclica sobre materiais dúcteis e
- e) Goodman com tensão flutuante sobre materiais dúcteis.

Boeira e Beck (2007) e Chiaverini (2008), abordam o quesito das tensões em designs mecânicos, expondo que no projeto de uma estrutura mecânica (depois de conhecidas as tensões a que os componentes estão sujeitos), usa-se um fator de segurança pelo qual é dividida a resistência adotada para o material.

Segundo Budynas e Nisbett (2016), o coeficiente de segurança depende dos seguintes fatores: i) consistência da qualidade do material; ii) comportamento elástico

do material; iii) tipo de carga, design da estrutura e importância dos elementos estruturais; iv) precisão na avaliação e atuação dos esforços sobre o design e v) qualidade da mão.

De acordo com Chiaverini (2008), os fatores de segurança variam em função do tipo de carga e material, além das condições de serviço. Para materiais dúcteis os valores variam entre 1,5 e 4,0. Contudo, Budynas e Nisbett (2016) aconselham a atualizar segundo as prescrições dos órgãos oficiais ABNT, AISI ou SAE. Assim, Mott (2015) considera que para materiais dúcteis utiliza-se o fator de segurança (FOS) com valor compreendido entre:

- a) $1,5 \leq \text{FOS} < 2,0$: para projetos de estruturas suportadas por cargas estáticas, em que há um nível elevado de confiança em todos os dados;
- b) $2,0 \leq \text{FOS} < 2,5$: para carregamento dinâmico com confiança média em todos os dados;
- c) $2,5 \leq \text{FOS} < 4,0$: para estruturas estáticas sobre carregamento dinâmico com incerteza sobre cargas, propriedades dos materiais, análise de tensão ou ambiente, no qual se deve proporcionar segurança extra para componentes críticos e
- d) $\text{FOS} \geq 4,0$: para projetos de estruturas estáticas sobre carregamento dinâmico com incerteza sobre algumas combinações de cargas, propriedades dos materiais, análise de tensão ou ambiente, no qual se deve proporcionar segurança extra para componentes crítico.

3.6.2 Critérios de falhas em materiais

Para Juvinal e Marshek (2008), define-se material dúctil como aquele que se deforma antes de romper e, material frágil como o que se rompe bruscamente sem deformar. No referente ao processo de fratura tem-se a fratura frágil a qual ocorre repentinamente e catastróficamente e, a fratura dúctil, que necessita de muito mais energia para ser induzida pela tenacidade.

Segundo Boeira e Beck (2007), os materiais possuem limitações de fratura, fadiga e fluência. Estas falhas podem acontecer sob três tipos de processos como são: mecânicos; mecânicos-químicos e químicos-eletoquímicos. Na Figura 19, pode-se verificar os diferentes tipos de fratura e a característica de cada corpo de prova utilizado e, na Figura 20 os comportamentos tensão-deformação para os dois tipos de fratura.



Figura 19. Superfície característica dos diferentes tipos de fraturas.
Fonte: ASHBY; JONES, 1996.

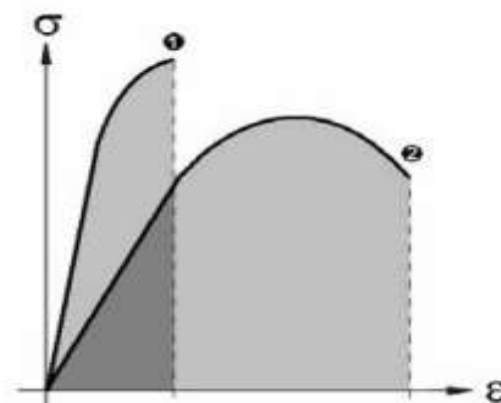


Figura 20. Representação do comportamento tensão-deformação em tração.
Fonte: ASHBY; JONES, 1996.

Gheno e Silva (2015) estudaram as características mecânicas dos aços ASTM A131 e ASTM A36 e verificaram fraturas dúcteis em ambos os materiais, ou seja, os dois materiais absorveram a energia aplicada com uma boa deformação antes de falhar. Na Figura 21 pode-se observar a fratura de ambos os materiais.

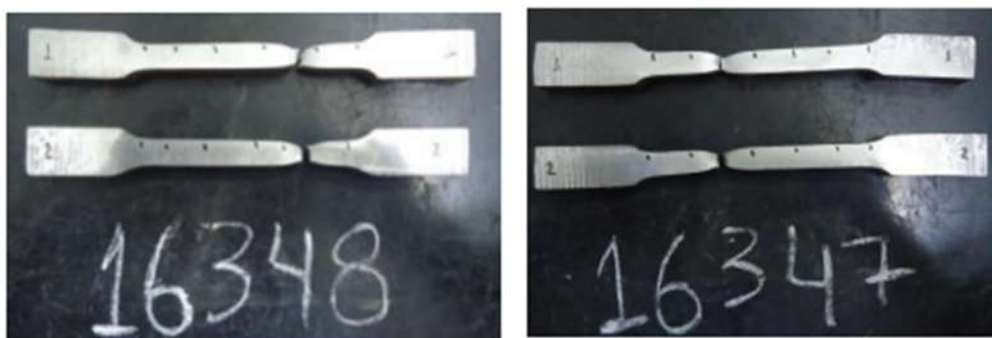


Figura 21. Amostras ASTM A31 (16348), ASTM A36 (16347) ensaiadas por tração.
Fonte: GHENO; SILVA, 2015.

O processo de fadiga (*creep*) é a ruptura de uma peça sob esforços repetidos, a uma tensão inferior à resistência obtida nos ensaios estáticos. A Figura 22 mostra o número de ciclos em função da tensão máxima admissível de diversos materiais. Nela, (1) é o aço 0,12C, temperado em óleo e revenido, (2) é o aço cromo-níquel, temperado em óleo e revenido, (3) é o aço 0,53C, temperado em óleo e revestido, (4) é a barra de aço estrutural revenido, (5) é a liga Al-Cu, (6) é o cobre estirado e recozido e (7) é o ferro fundido cinzento.

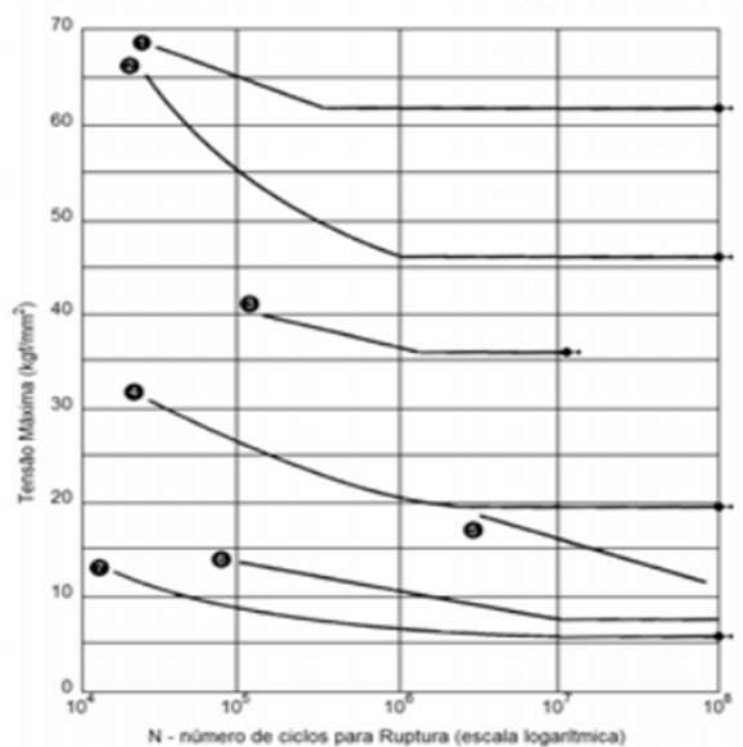


Figura 22. Curvas de tensão máxima e número de ciclos para ruptura.
Fonte: GHENO; SILVA, 2015.

Referindo-se ao comportamento dos metais ASTM A131 e ASTM A36, Gheno e Silva (2015) realizaram ensaios de dobramento utilizando líquido penetrante e, em análise visual da área, observaram uma deformação plástica sem imperfeição alguma do material (Figura 23).



Figura 23. Amostra ASTM A131 DH36 (16347) e ASTM A36 (16348) conformadas a frio.
Fonte: GHENO; SILVA, 2015.

O último processo, o qual denomina-se fluência, é um fenômeno de deformação permanente, lenta e progressiva, que geralmente é observada em metais e ligas metálicas, quando submetidos a um esforço de tração em temperatura elevada. Ashby e Jones (1996), relatam que a temperatura em que inicia a faixa de fluência é variável de um material para outro, apresentando temperaturas limites aproximadas como as de alumínio e ligas (205°C), titânio e ligas (315°C) e aço-carbono e aços de baixa-liga (370°C) (Figura 24).

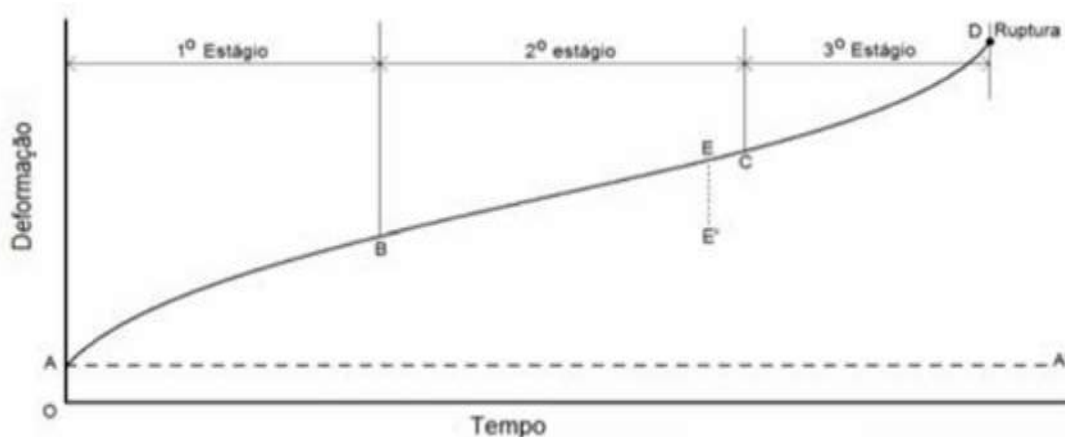


Figura 24. Curva típica de fluência.
Fonte: ASHBY; JONES, 1996.

Dentro desse contexto, Hibbeler (2010) afirma que, quando o projetista precisa elaborar um produto com um determinado material, este deve estabelecer um limite superior para o estado de tensão que define a falha do material dúctil. Geralmente, essa falha será especificada pelo início do escoamento e se o material for frágil, ela será especificada pela fratura.

Beer e Johnston Júnior (1995) indicam que um material pode se comportar de maneira dúctil ou frágil de acordo com alguns fatores, a saber: temperatura, taxa de carga, tipo de material, ambiente químico e seu processo de fabricação; onde nenhuma teoria de falha aplica-se isoladamente a determinado tipo de material.

Sobre este fato, Mott (2015) avalia que os critérios de falha normalmente predizem a falha de um material sujeito a um estado de tensão multiaxial, ou seja, um material pode se comportar de maneira maleável ou frágil, dependendo da temperatura, taxa de carregamento, ambiente químico e processo de formação.

Para Mott (2015), não existe um critério de falha único que possa ser aplicado a um material sob quaisquer condições. Devem-se utilizar todas as informações disponíveis sobre o material para selecionar um critério de falha. Neste sentido, destacam-se alguns critérios de falhas em materiais:

- a) Critério de tensão de von Mises máxima;
- b) Critério de tensão de cisalhamento máxima;
- c) Critério de tensão de Mohr-Coulomb e
- d) Critério de tensão normal máxima.

Outro critério de falha é o modelo específico para composição de cascas, o qual utiliza o critério de tensão máxima, chamado de Tsai-Hill e Tsai-Wu. Nesse respeito, Mahieux (2006) informa que esses critérios definem os envelopes de falhas, fora dos quais o material falha em materiais anisotrópicos. Já para Wang e Duong (2015), o critério Tsai-Hill é aplicado no nível da lâmina e descreve um envelope de falha elíptica suave, onde as tensões são aplicadas na direção da fibra e da matriz do material.

Brabazon (2021) disserta que, referente aos critérios de falhas de materiais, geralmente é realizada a comparação das tensões aos limites de resistência do material. Eles propõem o estudo na interação entre os modelos de falha. Dessa forma, para o critério de tensão máxima, assume-se que a falha ocorre quando as tensões máximas (ao longo ou transversais à direção da fibra) excedem as respectivas resistências dos corpos de prova de compressão ou tração, sendo os mais utilizados os de Tsai-Hill, Tsai-Wu e Hoffman.

3.6.2.1 Critério de tensão de von Mises máxima

De acordo com Ugural (2009), esse critério é baseado na teoria de von Mises-Hencky, também conhecida como teoria da energia de cisalhamento ou teoria da energia de distorção máxima. As tensões principais atuantes em um corpo são σ_1 , σ_2 , σ_3 e, a tensão de von Mises, expressa pela Equação 5.

$$\sigma_{von\ Mises} = \left\{ \frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}{2} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

Essa teoria afirma que um material dúctil começa a escoar em um local onde a tensão de von Mises se torna igual ao limite de tensão. Na maioria dos casos, o limite de escoamento é usado como limite de tensão, no qual existe a condição expressa pela Equação 6.

$$\sigma_{von\ Mises} \geq \sigma_{limite} \quad (6)$$

O valor especificado do limite de escoamento deve levar em consideração a temperatura do componente. Já, o fator de segurança (FOS) em um local, é uma relação entre a tensão limite e a tensão de von Mises, calculado pela Equação 7. No caso do cisalhamento puro deve-se considerar a Equação 8.

$$FOS = \frac{\sigma_{limite}}{\sigma_{von\ Mises}} \quad (7)$$

$$\sigma_{12max} = 0,5777 \sigma_{yield} \quad (8)$$

3.6.2.2 Critério de tensão de cisalhamento máximo

Outra teoria é o critério de Tresca, formulado em 1868 para metais. Essa teoria supõe que a máxima tensão de cisalhamento é a variável chave, e que uma componente falha quando a máxima tensão tangencial atingir a um valor ft . Este é o critério conhecido como critério da máxima tensão tangencial (PIMENTA, 2006).

Para Hibbeler (2010), no critério de Tresca, o escoamento do material começa quando a tensão de cisalhamento máxima absoluta $t_{máx.abs}$ atinge o valor da tensão

de cisalhamento, provocando escoamento do material quando ele está submetido apenas à tensão axial. Para evitar a falha, tem-se demonstrado na Equação 9.

$$\tau_{\text{máx abs}} \leq \frac{1}{2} \sigma E \quad (9)$$

Onde: σE é a tensão de escoamento e é determinada por um teste de tração simples e a tensão τ_{max} é o maior valor de $\text{abs}(\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{13})$.

Pelas Equações 10, 11 e 12, pode-se definir que $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são as principais tensões em ordem decrescente.

$$\sigma_{12} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_{23} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{2} \quad (11)$$

$$\sigma_{13} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \quad (12)$$

O fator de segurança (FOS) é dado pela Equação 13.

$$FOS = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{(2 * \tau_{\text{máx}})} \quad (13)$$

Para Norton (2013), é importante ressaltar que o critério de tensão máxima de cisalhamento é mais conservador do que o critério de tensão de von Mises, uma vez que o hexágono que representa o critério de tensão de cisalhamento está contido na elipse que representa o critério de tensão de von Mises. Ele prevê falha em 0,577 do limite de resistência, enquanto o critério de tensão de cisalhamento prevê falha a 0,5 do limite de escoamento. Testes reais de torção, usados para desenvolver cisalhamento puro, mostraram que o critério de tensão de von Mises proporciona resultados mais precisos do que a teoria de tensão de cisalhamento máxima.

3.6.2.3 Critério de tensão de Mohr-Coulomb

Para Mott (2015), o critério é baseado na teoria de Mohr-Coulomb, também chamada de Teoria do atrito interno. Esse critério é utilizado para materiais frágeis com propriedades de tração e compressão diferentes. Materiais frágeis não possuem um ponto de escoamento específico e, portanto, não é recomendado usar o limite de escoamento para definir a tensão limite para esse critério.

A teoria prevê a ocorrência de falha quando a combinação da tensão principal máxima e mínima exceder seus respectivos limites de tensão. A teoria Mohr-Coulomb prevê a ocorrência de falhas para as tensões principais $|\sigma_1| > |\sigma_2| > |\sigma_3|$.

3.6.2.4 Critério de tensão normal máxima

Segundo Norton (2013), o critério de tensão normal máxima, também conhecido como critério de Coulomb, é baseado na teoria de tensão normal máxima. De acordo com essa teoria, a falha ocorre quando a tensão principal máxima atinge a resistência máxima do material para tensão simples. Esse critério é usado para materiais frágeis.

O autor presume que a resistência máxima do material sob tensão ou compressão é a mesma. Essa pressuposição não é válida em todos os casos. Por exemplo, rachaduras tendem a diminuir a resistência do material sob tensão consideravelmente, enquanto seu efeito é bem menor na compressão, pois as rachaduras tendem a fechar.

Materiais frágeis não possuem um ponto de escoamento específico e, portanto, não é recomendado usar o limite de escoamento para definir a tensão limite para esse critério. Essa teoria prevê a ocorrência de falha quando satisfaz a Equação 14.

$$\sigma_1 \geq \sigma_{lim} \quad (14)$$

Onde, σ_1 é a tensão principal máxima e σ_{lim} é a tensão limite do material.

Dentro desta linha, está o fator de segurança (FOS) o qual é representado matematicamente pela Equação 15.

$$FOS = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_1} \quad (15)$$

3.6.3 Materiais estruturais

Para Mott (2015), a maior parte dos aços estruturais é designada pelos números estabelecidos pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM). A classe ASTM A36 tem um ponto de escoamento mínimo de 24 MPa muito dúctil e é caracterizado como um aço de baixo teor de carbono, laminado a quente, disponível em chapas, placas, barras e perfis estruturais, como vigas de abas largas, vigas padrão norte-americano, perfis U e cantoneiras.

Os perfis estruturais tubulares – *Hollow Structural Sections* (HSS) – normalmente são fabricados a partir do aço ASTM A500, que é formado a frio e fundido sem emendas. Estão nessa categoria os tubos redondos e os perfis quadrados e retangulares. Porém, alguns dos produtos HSS são feitos a partir do aço formado a quente, que tem propriedades semelhantes aos perfis de aço laminado a quente ASTM A36.

Várias classes de aços estruturais com resistência mais alta estão disponíveis para o uso em construções, veículos e aplicações em máquinas e fornecem de 290 a 700 MPa, que são aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) e podem ser citados o ASTM A242, A440, A514, A572 e A913. O grande uso do aço pode ser atribuído às notáveis propriedades dessa liga, à abundância das matérias-primas necessárias à sua produção e ao seu preço competitivo, já que o aço pode ser produzido em uma enorme variedade de características que podem ser bem controladas, de modo a atender usos específicos (SILVA, 2013).

Para Silva et al. (2015), os aços são classificados em aço-carbono e aço-liga. Aço-carbono é uma espécie de liga ferro-carbono, contendo aproximadamente de 0,008% a 2,11% de carbono, além de certos elementos secundários como silício, manganês, fósforo e enxofre. O aço-liga, por sua vez, são os aços carbono que contém outros elementos de liga ou que apresentam os elementos residuais em teores acima dos considerados normais.

De acordo com Chiaverini (2008), para a correta caracterização de um aço, a sua respectiva composição química deve ser conhecida por classificações ou códigos definidos por instituições internacionais como a ABNT no Brasil, ASTM e AISI nos

Estados Unidos, DIN na Alemanha, JIS no Japão, BS na Inglaterra e ASNOR na França.

Contudo para Beer e Johnston Júnior (1995), as propriedades podem-se definir como propriedades importantes do aço, a saber:

- 1) Limite de escoamento: é a tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico de deformação, e se houver algum acréscimo de tensão, o material não segue mais a lei de Hooke (que estabelece proporcionalidade entre tensão e deformação). É uma das propriedades físicas mais importantes no cálculo das estruturas de aço, visto que, procura-se evitar que essas tensões sejam atingidas na seção transversal das barras, como forma de limitar a sua deformação;
- 2) Módulo de Young ou módulo de elasticidade (E): é a razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida pelo material. Caracteriza-se como parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido e é dependente da composição química, microestrutura e defeitos como poros e trincas;
- 3) Coeficiente de Poisson (ν): é a propriedade que mede a deformação transversal em relação à direção longitudinal de aplicação da carga e
- 4) Módulo de Cisalhamento: é definido como a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada ao corpo e sua deformação específica e é conhecido como módulo de rigidez ou módulo de tração.

Juvinal e Marshek (2008) afirmam que os aços estruturais são utilizados em componentes estruturais cujas propriedades físicas são bem definidas, sendo empregados em projetos que exigem dobramento e boa soldabilidade. Os aços estruturais são geralmente empregados em construção civil, equipamentos de transporte, veículos, equipamentos rodoviários e ferroviários, dentre outros (SILVA, 2013).

De acordo com Chiaverini (2008), alguns desses aços são ASTM A36, o ASTM A572 grau 50 e o ASTM A588 grau K que têm suas propriedades químicas e mecânicas exibidas na Tabela 5.

Tabela 5. Propriedades químicas e mecânicas de alguns aços estruturais.

Propriedades Químicas	ASTM A36	ASTM 572 grau 50	ASTM 588 grau K
%Carbono (%C)	0,26 máx.	0,23 máx.	0,17 máx.
% Manganês (%Mn)	-	1,35 máx.	0,50-1,20
%Fósforo (%P)	0,04 máx.	0,04 máx.	0,04 máx.
%Enxofre (%S)	0,05 máx.	0,05 máx.	0,05 máx.
%Silício (%Si)	0,40 máx.	0,40 máx.	0,25-0,50
%Níquel (%Ni)	-	-	0,40 máx.
%Cromo (%Cr)	-	-	0,40-0,70
%Molibdênio (%Mo)	-	-	0,10 máx.
%Cobre (%Cu)	0,2	-	0,30-0,50
%Vanádio (%V)	-	-	-
%Nióbio (%Nb)	-	0,005-0,05	0,005-0,05
Propriedades mecânicas			
Limite de ruptura (MPa)	400-550	450 mín.	485 mín.
Limite de escoamento (MPa)	250 mín.	345 mín.	345 mín.

Fonte: CHIAVERINI, 2008.

3.6.4 Análise de frequências

De acordo com Roa (2011), a análise de frequência modal utiliza o método de interação matricial, que determina várias frequências naturais de vibração, começando pela mais baixa, associando a cada frequência os resultados de deslocamento/deformação total, uma vez que os resultados são gerados de acordo com a Equação 16, caracterizada como equação de movimento com autovetores, para vários graus de liberdade.

$$[M] \{\ddot{D}\} + [C] \{\dot{D}\} + [K] \{D\} = \{F\} \quad (16)$$

Onde: $\{D\}$ é o vetor de deslocamento nodal; $\{\dot{D}\}$ é o vetor de velocidade nodal; $\{\ddot{D}\}$ é o vetor de aceleração nodal; $\{F\}$ é o vetor de força externa nodal; $[M]$ é a matriz de massa; $[C]$ é a matriz de amortecimento e $[K]$ é a matriz de rigidez.

Avitabile (2017), explicando a teoria de vibração considerou uma estrutura de placa simples que tem uma excitação de entrada e o tempo de saída de natureza

aleatória. Dessa forma, obteve-se o diagrama de sinal mostrando a filtragem modal de entrada e os resultados das saídas (Figura 25).

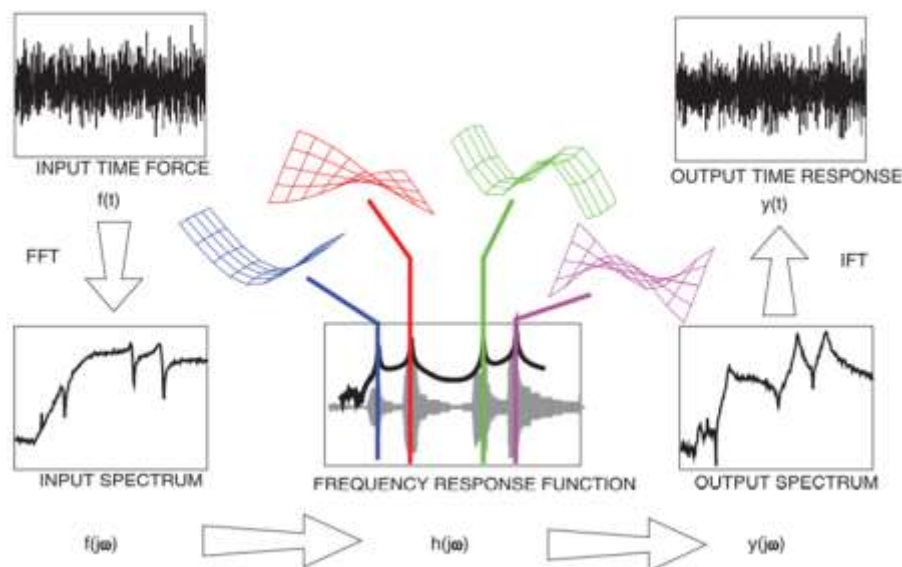


Figura 25. Diagrama de fluxo de sinal.
Fonte: AVITABILE, 2017.

De acordo com Avitabile (2017), a resposta na ponta da barra tende a conter a resposta de todos os modos do sistema. Observa-se que podem existir respostas em frequências distintas. Essa resposta de tempo, na ponta da barra, pode ser convertida para o domínio da frequência executando uma transformação de Fourier do sinal.

A representação do domínio da frequência, desse sinal de tempo convertido, é referida como a função de resposta de frequência, ou FRF (mostrado no gráfico de frequência preto). Observa-se que existem picos nesse gráfico que correspondem às frequências naturais do sistema. A barra terá muitas frequências naturais de vibração, em cada uma dessas frequências naturais, a deformação estrutural terá um padrão definido, chamado de modo. Por essa barra, há um primeiro modo de flexão mostrado em azul, um segundo modo de flexão mostrado em vermelho e um terceiro modo de flexão mostrado em verde. Existem, também, outros modos mais altos que poderiam ser descritos:

- 1) O modo físico também pode ser avaliado usando um modelo analítico de massa concentrada, ou modelo de elementos finitos, mostrado em preto na parte superior direita da Figura 25;
- 2) O modelo será avaliado, usando alguns conjuntos de equações no qual há uma inter-relação, ou acoplamento, entre os diferentes pontos;

- 3) Os graus de liberdade (dof), usados para modelar a estrutura. No MEF, ao mover um dos dof's no experimento modelado, os outros dof's também são afetados – auxiliando no comportamento do sistema e
- 4) Utilização de matrizes para auxiliar na organização de todas as equações de movimento, descrevendo como o sistema se comporta (Equação 16).

Avitabile (2017), ainda explica que a massa é uma matriz diagonal e matrizes de amortecimento e rigidez são simétricas em relação a diagonal, o que são termos que indicam o grau de acoplamento entre as diferentes equações, ou dof's, descrevem o sistema.

O tamanho das matrizes é dependente do número de equações que se usa para descrever o sistema. Matematicamente, utiliza-se da transformação modal para converter essas equações acopladas em um conjunto de sistemas único de graus de liberdade desacoplados, descritos por matrizes diagonais de massa modal, amortecimento modal e rigidez modal, em um novo sistema de coordenadas chamado espaço modal (AVITABILE, 2017). Nesse sentido, o objetivo é converter um conjunto complicado de equações físicas acopladas em um conjunto simples e desacoplado de um único sistema de graus de liberdade.

Para Ewins (1984), um modal compreende a medição de um conjunto de funções de respostas, que são medidas como registros de histórico de tempo de várias respostas à excitação, em que os sinais são processados na fonte para revelar a resposta de frequência individual. O modelo está relacionado ao modal e modelos espaciais sujeitos a várias condições, que devem ser consultadas antes de uma aplicação.

Roa (2011) indica que o fenômeno da ressonância ocorre sempre que a frequência de excitação coincide com uma das frequências naturais do sistema, proporcionando elevados valores de deslocamentos, deformações e tensões indesejáveis, levando componentes da estrutura a falhar. É possível, segundo Roa (2011), reduzir, mas não eliminar, as forças dinâmicas que causam vibrações e os métodos de controle das vibrações podem ser:

- a) Controlar as frequências naturais;
- b) Evitar respostas excessiva do sistema, mesmo em ressonância;
- c) Uso de mecanismos de amortecimento e ou dissipação de energia e
- d) Uso de isoladores de vibração para redução de transmissão de forças entre componentes e alteração de massa e rigidez do sistema.

Contudo, busca-se sempre um modo de alterar as frequências naturais, conforme a Equação 17.

$$fn = \sqrt{\frac{\kappa}{m}} \quad (17)$$

Onde: fn é a frequência natural de vibração do sistema; κ é a rigidez do sistema e m é a massa do sistema.

3.6.5 Fadiga de componentes

Nos implementos agrícolas pode acontecer a ruptura dos elementos orgânicos que constituem a própria máquina, mesmo quando os clientes envolvidos no desenvolvimento do produto respeitem todos os limites de tensão admissíveis do diagrama tensão-deformação, e pode ocorrer o fenômeno da fadiga (TAVARES, 2014).

Conforme o autor, o fenômeno da fadiga ocorre quando existe incidência de fatores simultâneos ou não, chamados fatores primários. Um exemplo é a tensão máxima elevada, em que a peça trabalha no limite de tensão máxima admissível. Dessa forma, grandes diferenças nos valores de tensão máxima e mínima são aplicadas à peça que está solicitada por esforços alternados ou pulsantes e vibração mecânica, é o principal agente causador de fadiga em máquinas e implementos agrícolas.

Alguns fatores secundários aceleram o processo de ruptura por fadiga como concentração de tensões nas quais há o efeito do formato da peça e também sua rugosidade superficial, os defeitos metalúrgicos devidos aos processos de fabricação, heterogeneidades e tratamento térmico dos materiais envolvidos (NIEMCZEWSKI et al., 2014; CHEN; SHI, 2017; HOU et al., 2020; VELLOSO et al., 2020).

De acordo com Tabile et al. (2011), a vibração ou impacto, tem se revelado como método eficiente de colheita de diversos produtos agrícolas e as colhedoras de café desenvolvidas para área plana e de reduzida declividade utilizam esse princípio de colheita, mas se a vibração não for controlada, pode causar fadiga e possíveis rupturas de componentes da máquina.

Por isso, vários especialistas afirmam que o processo de ligação entre componentes divide-se em dois grupos (NIEMCZEWSKI et al., 2014; SILVA et al.,

2014; MOTT, 2015). Contudo, a resistência dos componentes está associada também ao processo de ligação entre os componentes constituintes.

- 1) Processo de ligação permanente: os componentes ligados não podem ser separados sem destruição de pelo menos um deles. Como exemplos têm-se as ligações pelo processo de solda e adesivos;
- 2) Processos de ligação não permanentes: os componentes separados podem-se separar sem destruição de pelo menos um deles. Como exemplo cita-se ligações por componentes roscados (parafusos e porcas) e ligações por efeito de molas.

4 Metodologia

4.1 Caracterização da fase preliminar

A metodologia utilizada no presente trabalho baseou-se nos modelos propostos por diversos autores (PAHL et al., 2005; ROZENFELD et al., 2006). Como cada projeto apresenta especificações únicas, a metodologia foi adaptada de acordo com as necessidades observadas durante o desenvolvimento do estudo.

Na sistematização da fase preliminar de projeto é possível demonstrar o desdobramento da fase preliminar, com suas tarefas descritas passo a passo. Na Figura 26 encontra-se a representação, de forma parcial, do conteúdo de informações da fase.

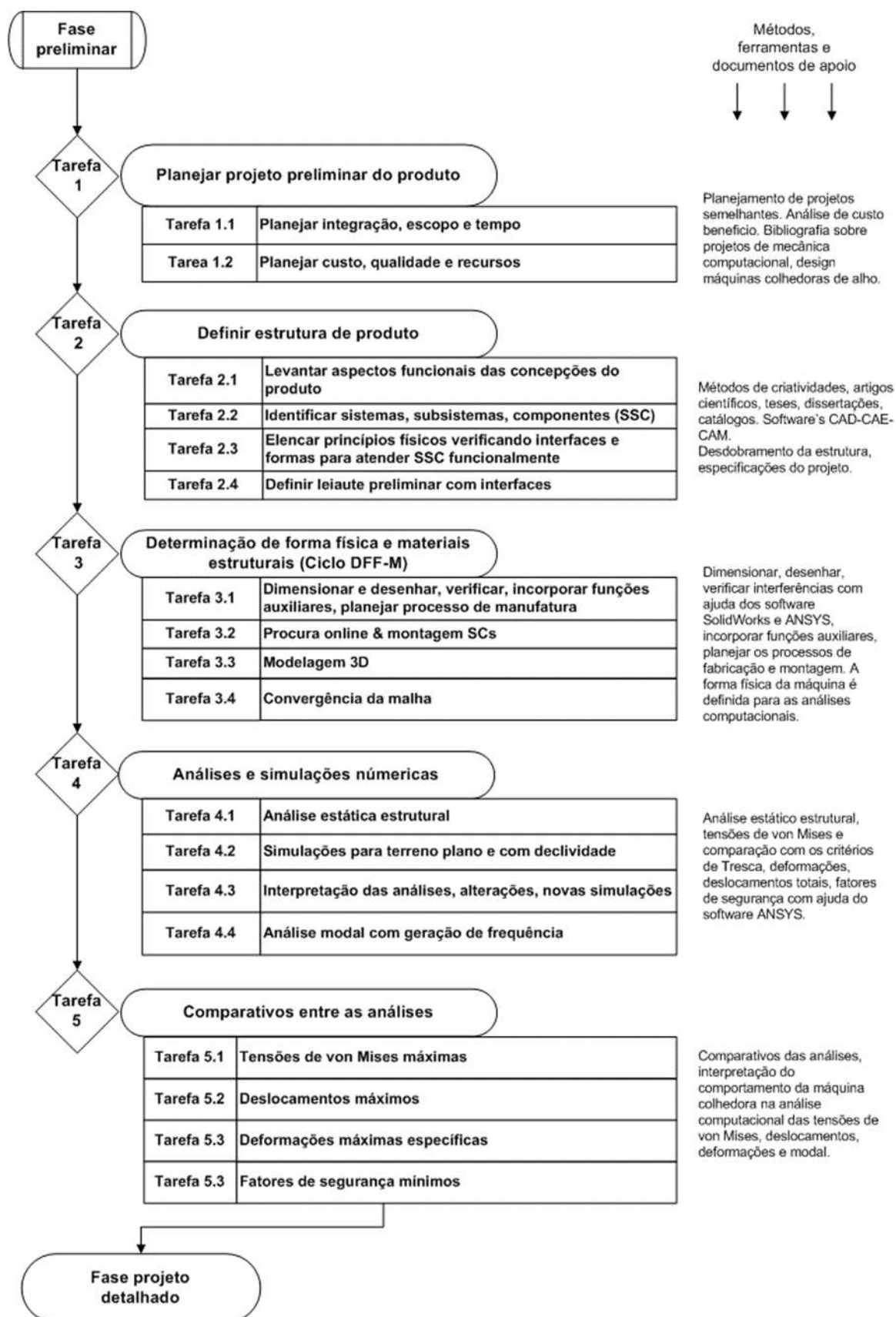


Figura 26. Representação da sistematização do Projeto preliminar.
Fonte: Adaptado de PAHL et al., 2005.

A metodologia do projeto pode ser descrita como uma função matemática, onde cada tarefa é apresentada em quadros de entrada – saída com métodos, ferramentas e documentos de apoio.

4.1.1 Tarefa 1 – Planejar o projeto preliminar do produto

A Tarefa 1 envolveu o planejamento do projeto preliminar do produto, dividindo-se em: i) planejamento de integração, escopo e tempo e ii) planejamento de custos, qualidade e recursos (Figura 27). Na Tabela 6 estão descritas as entradas e saídas da etapa, acompanhadas dos métodos, ferramentas e documentos de apoio necessários para sua realização.

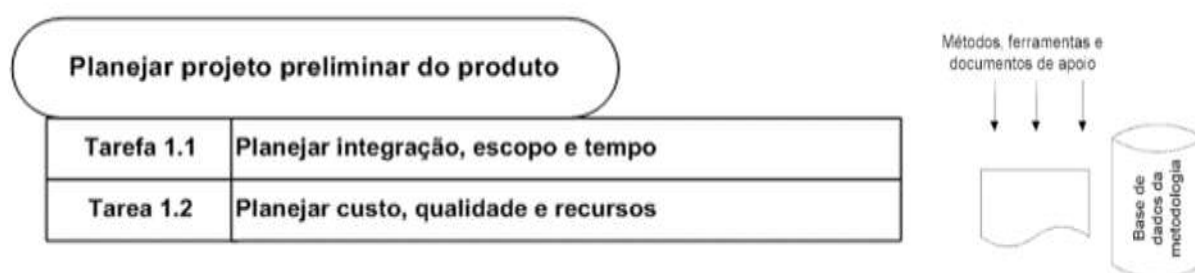


Figura 27. Tarefa 1: Planejar o projeto preliminar do produto.
Fonte: AUTORA, 2022.

Tabela 6. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 1 da fase preliminar.

Entrada	Saída	Métodos, ferramentas e documentos de apoio
Reavaliação do projeto, plano do projeto, diretrizes do produto, concepção do produto.	Planejamento da definição das atividades e tarefas a serem desenvolvidas; tempo das atividades e tarefas, marcos, comunicações, pessoal, custo, risco e qualidade, planejamento das atividades envolvidas na aplicação dos métodos auxiliares	Planejamento de projetos semelhantes, análise de custo-benefício, desdobramento da estrutura de trabalho, gráficos, estimativas de custo, bibliografias.

Fonte: AUTORA, 2022

4.1.2 Tarefa 2 – Definir a estrutura de produto

A Tarefa 2 foi relacionada a definição da estrutura do produto, dividindo-se em: i) levantamento de aspectos funcionais das concepções do produto; ii) identificação sistemas, subsistemas e componentes de SSCs; iii) definição das formas de atender funcionalmente os SSCs e iv) definição o leiaute preliminar (Figura 28). Na Tabela 7

estão descritas as entradas e saídas da etapa, acompanhadas dos métodos, ferramentas e documentos de apoio necessários para sua realização.

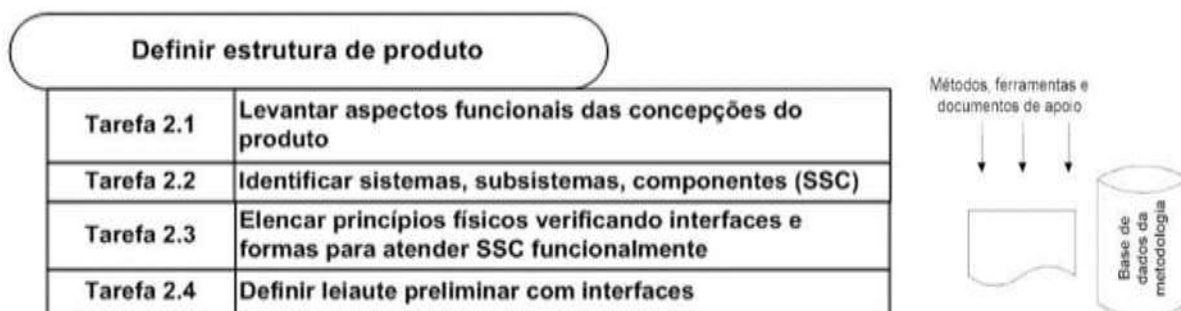


Figura 28. Tarefa 2: Definir estrutura de produto.
Fonte: AUTORA, 2022.

Tabela 7. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 2 da fase preliminar.

Entrada	Saída	Métodos, ferramentas e documentos de apoio
Plano preliminar do projeto do produto, lista de especificações, lista de requisitos, especificações de projeto, fichas técnicas de funções.	Estrutura do produto que compreende os designs dos sistemas e subsistemas, lista com desdobramento e identificação de SSC, princípios físicos com leiaute preliminar e interfaces, fichas técnicas.	Métodos de criatividade, catálogos, artigos científicos, dissertações, teses, sistemas CAD-CAE-CAM, normas técnicas, diagrama de desdobramento da estrutura, especificações de projeto.

Fonte: AUTORA, 2022.

4.1.3 Tarefa 3 – Determinação de forma física e materiais estruturais

A Tarefa 3 refere-se à compreensão do dimensionamento da máquina colhedora para relevos variados. Obtido o leiaute e dimensionamento do produto, verificaram-se as possíveis interferências entre os componentes análogos, incorporação de funções auxiliares e procura dos componentes.

Com o intuito de atender às diversas operações da máquina colhedora de alho, optou-se por utilizar a metodologia proposta por Oldoni (2016) – com detalhamento na procura dos SSCs. Neste trabalho foi necessário adaptar a metodologia para que as análises computacionais fossem realizadas (Figura 29).

Todo processo apresenta um desenvolvimento gradual, para que possam ser verificadas as necessidades específicas do produto. No presente trabalho, o intuito de desenvolver uma máquina capaz de realizar as operações propostas foi tão importante quanto a viabilidade econômica de mecanização do seu labor. É por isso

que as tarefas propostas por Oldoni (2016), no Ciclo DFF (em destaque na Figura 30), foram essenciais para a busca e a criação dos SSCs.

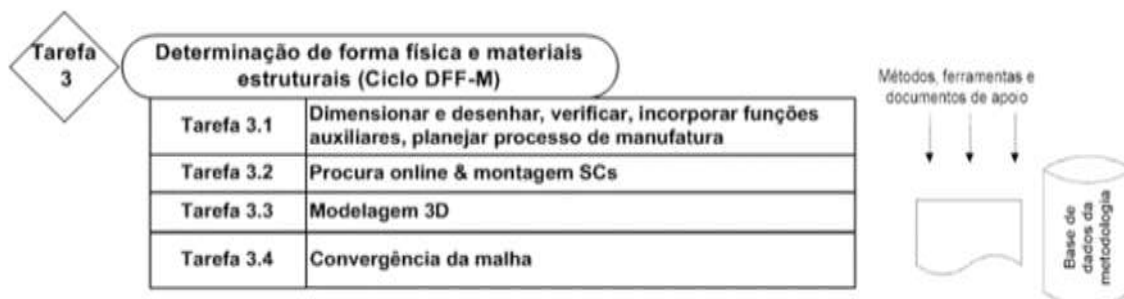


Figura 29. Tarefa 3: Determinação de forma e materiais estruturais (Ciclo DFF - M).
Fonte: AUTORA, 2022.

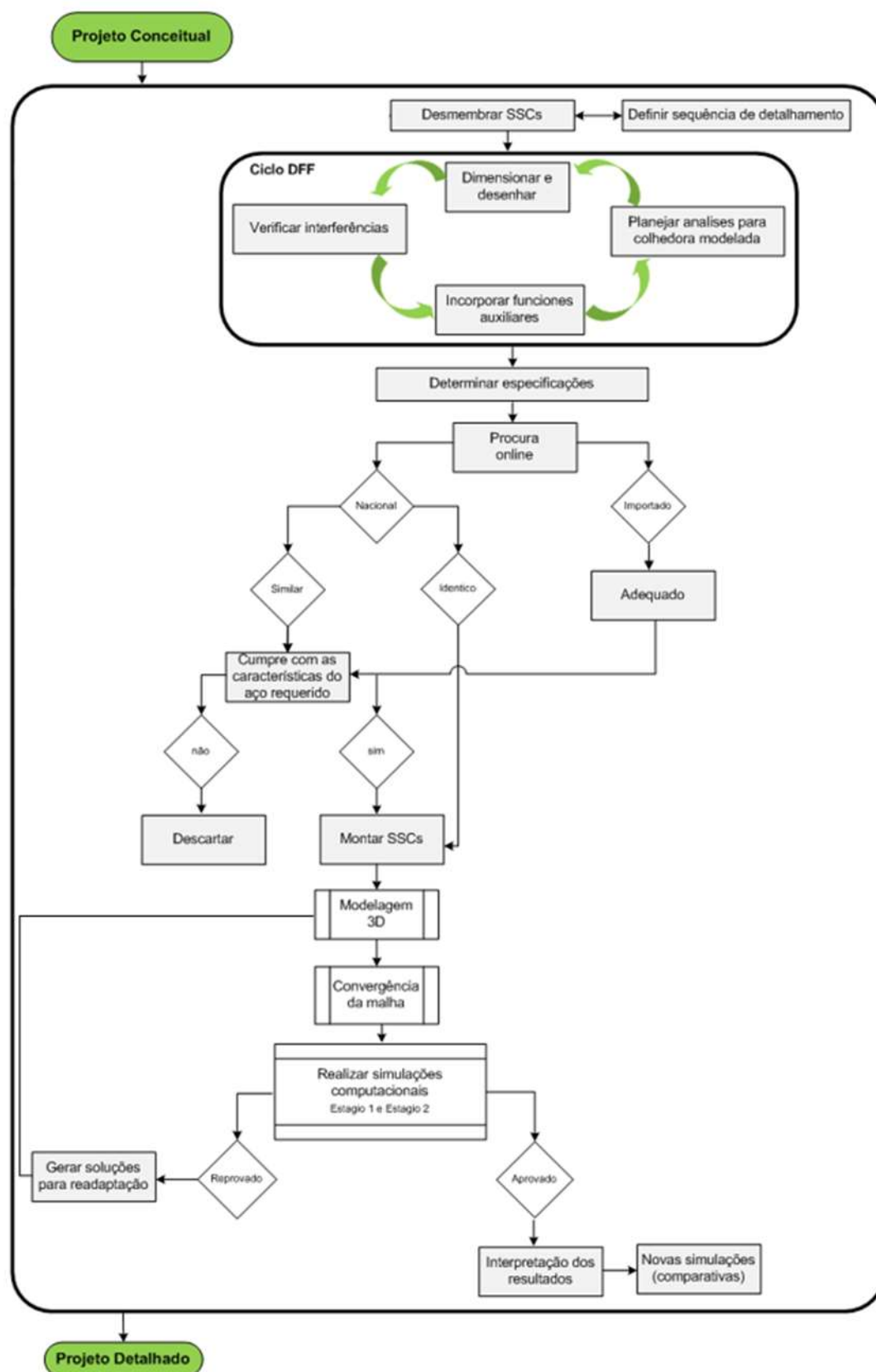


Figura 30. Ciclo DFF-M em destaque.
Fonte: Adaptado de OLDONI, 2016.

Determinadas as especificações do produto, buscou-se pesquisar no mercado físico (2018/2019) e online (2019/2021) os SSCs, cujas características físicas, econômicas e de disponibilidade no mercado sejam flexíveis com a tecnologia envolvida. Dessa forma, o resultado final tende a ser capaz de oferecer uma máquina para colheita em relevos variados, que possa operar conjuntamente com os agricultores familiares sem oferecer riscos. Após a montagem dos SSCs foram gerados, via CAD, modelos tridimensionais representando a estrutura física das geometrias analisadas.

Para a Tarefa 3.3 foram desenvolvidas as modelagens 3D da máquina, utilizando *softwares Solidworks* e *Ansys 18.2* (ANSYS, 2018). Para gerar as geometrias tridimensionais das peças envolvidas foi utilizado um computador com processador *Intel Core i7* Ger, memória RAM de 8GB e placa de vídeo integrada UHD *Graphics 620* (com memória de 2 GB GDDR5).

A Tarefa 3.4 consistiu na convergência da malha. Essa etapa do estudo foi aplicada com a finalidade de garantir a confiabilidade da malha adotada para o modelo geométrico, por intermédio do refinamento e da estabilização de custo computacional (MADENCI; GUVEN, 2015; MION et al., 2016). Neste trabalho foi atribuído um elemento de malha quadrático, de segunda ordem, tridimensional, com três graus de liberdade por nó, monitorando um ponto máximo. Por meio dessa etapa, foi possível verificar a estabilidade gráfica dos valores de deslocamento e tensão na estrutura do produto.

Na Tabela 8 seguem descritas as entradas e saídas da etapa, acompanhadas dos métodos, ferramentas e documentos de apoio necessários para sua realização.

Tabela 8. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 3 da fase preliminar.

Entrada	Saída	Métodos, ferramentas e documentos de apoio
Estrutura do produto, princípios físicos com leiaute preliminar, modelos matemáticos computacionais e cinemática do dispositivo (interação planta-máquina-solo) e interfaces, dados técnicos.	Estrutura do produto 3D, lista e diagrama com desdobramento, identificação, dimensões e parâmetros principais e aspectos críticos, análises computacionais dos materiais (1010/1020/A36) e processos de fabricação, malhado da estrutura, dados técnicos.	Métodos de criatividade, catálogos, artigos, dissertações, teses, bibliografia geral sobre análise computacional de máquinas agrícolas (Silva et al., 2018; Xiaolian et al., 2017; Zhao et al., 2020), cinemática do dispositivo para a colheita de alho (planta-máquina-solo), modelo matemático de Araújo (1993) e Zhao et al. (2020)

Fonte: AUTORA, 2022.

4.1.4 Tarefa 4 – Análise e simulações numéricas

A Tarefa 4 faz referência a etapa de simulações numéricas (Figura 31), sendo utilizado o *software* Ansys 18.2. O material atribuído para a estrutura foi o aço ASTM A36 e SAE 1020, por possuir boas propriedades mecânicas e soldabilidade (AWS, 2010; CELY et al., 2018; HIBBERLER, 2010), além de ser geralmente empregado pelos fabricantes de implementos agrícolas (CASTRO et al., 2016; SILVA et al., 2014).

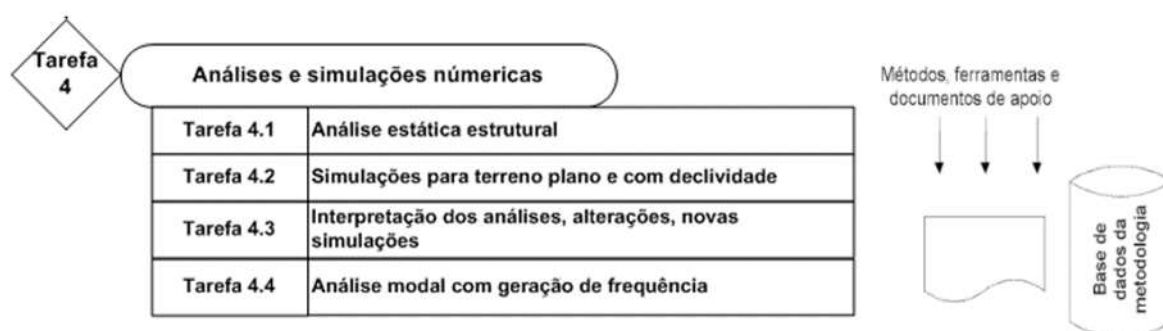


Figura 31. Tarefa 4: Análises e simulações numéricas.
Fonte: AUTORA, 2021.

Para a Tarefa 4.1 objetivou-se trabalhar com conexões entre as partes da estrutura da máquina. Dessa forma, todos os componentes foram unidos para transmissão de esforços entre eles, utilizando-se geometria fixa com limitações de movimentos no sistema cartesiano 3D.

A velocidade média de deslocamento pode ser calculada de acordo com a Equação 18 (MIALHE, 1980; MION, BENEZ; 2008).

$$Vm = \frac{L}{t} \cdot 3,6 \quad (18)$$

Onde: Vm velocidade de deslocamento (kmh^{-1}); L comprimento da parcela (m); t tempo gasto para percorrer a parcela (s); 3,6 é a constante.

Com a intenção de ampliar a otimização da máquina colhedora de alho em relevos variados, foram projetadas duas geometrias, a saber: haste inclinada com ponta facão e haste curva com ponta aiveca. O sulcador, segundo o plano espacial do cultivo e a estrutura da máquina, foi analisado por cálculos teóricos, a fim de determinar seus parâmetros. Para obtenção da largura e comprimento do sulcador,

além do ângulo de entrada e da força de tração recebida pelo sulcador utilizaram-se as Equações 19 e 20.

$$S = D + w + Cn + C1 \quad (19)$$

$$L = \frac{H}{\text{sen}\alpha} \quad (20)$$

Onde: D é o espaçamento entre linhas de plantio de alho (mm); w é a largura da superfície do sulcador (mm); Cn é a distância de desvio da linha de plantio de alho (mm); C1 é a linha da colhedora; H é a profundidade de escavação do alho (mm) e α é o ângulo de penetração.

Segundo Feng et al. (2017) deve-se ter em consideração a profundidade, que para este estudo é de 100mm e o α (ângulo de penetração). O autor Araújo (1993) indica que a relação geométrica entre a velocidade, o comprimento do sulcador e a velocidade de deslocamento também são relevantes para os resultados.

As forças que atuam na ponteira tem a seguinte relação: $F \cos \alpha - G \sin \alpha - Ff = 0$; $FN - F \sin \alpha - G \cos \alpha = 0$; $Ff = \mu FN$. Para obtenção da expressão α deve-se utilizar a Equação 21.

$$\alpha = \arctan F - \frac{\mu FN}{\mu F} + G \quad (21)$$

Onde: F é a força (N) requerida pela ponta do sulcador para o corte de solo; G é o peso próprio do solo (N); FN é a interação do sulcador com o solo (N); μFN é a força de atrito ao longo da superfície da ponta e μ é o fator de atrito (Nmm⁻²).

A força de tração recebida pelo sulcador pode ser definida por meio das Equações 22 e 23.

$$Fc = A \cdot L \cdot \rho \cdot \tan(\alpha + \varphi) + KA + KpG2 \quad (22)$$

$$F = G \tan(\alpha + \varphi) = A \cdot S \cdot \rho \cdot G \tan(\alpha + \varphi) \quad (23)$$

Onde: Fc é a força de tração do sulcador; A é a área do solo superficial (Δx) (mm²); L largura do sulcado (mm); ρ densidade do solo (gmm⁻³); KA força necessária para o

rompimento do solo (N); KpG2 resistência que a máquina colhedora de alho vence durante o deslocamento (Nmm⁻²).

Para mensurar as forças dos mecanismos de transporte da planta de alho e obter, assim, as melhores condições para o desenraizamento das plantas de alho após o corte do solo, aplicou-se uma força de tração para cima (F_m). Quando aplicada em direção ao centro de crescimento do alho a força de tração pode ser minimizada, facilitando a extração do solo, segundo Feng et al. (2017). Ainda conforme os autores, a direção dessa força deve ser igual a direção da velocidade absoluta da correia transportadora, na direção diagonal ascendente do sistema de transporte da máquina. Feng et al. (2017) confirmam que a velocidade da correia pode ser igual ao deslocamento da máquina.

O impulso produzido pelo sulcador, no momento do rompimento do solo e das raízes, de forma conjunta com a direção de tombamento da planta de alho e os pontos de entrada das plantas no sistema de agarre do transportador, tendem a inclinar a planta para a frente em um ângulo θ (CHEN; SHI 2008; XIAOLIAN et al., 2017; HOU et al., 2020), conforme Figuras 32 e 33.



Figura 32. Pontos de entrada das plantas no sistema de agarre.
Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 1993.

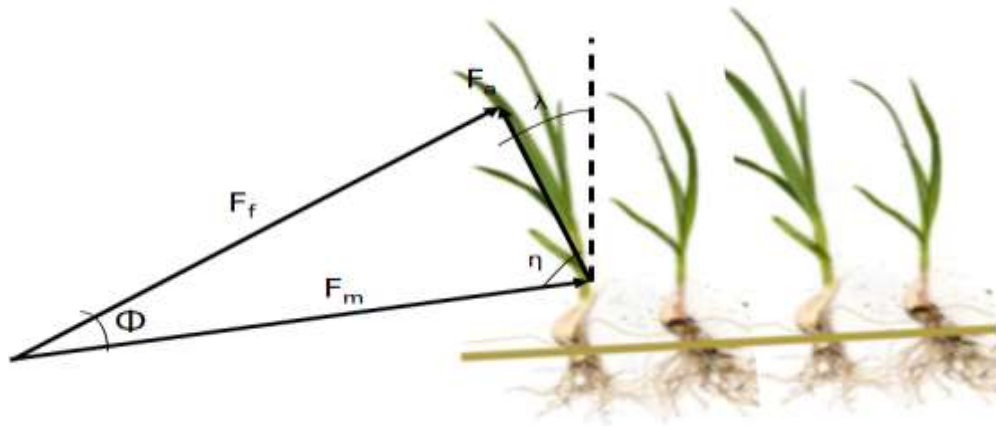


Figura 33. Interface máquina-planta.
Fonte: Adaptado de FENG et al., 2017.

A esta interface e seguindo as recomendações da pesquisa de Feng et al. (2017), é possível relacionar as equações com o teorema de Pitágoras, entendendo que $F_f = vr$, $F_m = vm$ e $F_a = vs$ conforme Equações 24, 25 e 26.

$$\frac{vr}{\text{sen}\eta} = \frac{vm}{\text{sen}(180^\circ - \theta - \eta)} \quad (24)$$

$$\eta + \lambda = 90^\circ \quad (25)$$

$$vr = \frac{\cos\lambda}{\cos(\lambda - \theta)} vm \quad (26)$$

Onde: vr é a velocidade relativa das correias do transportador (m s); vm é a velocidade de deslocamento da máquina com respeito ao alho (m s); vs é a combinação entre a velocidade da máquina e as correias no momento de pegar a haste de alho (m s); θ é o ângulo entre a correia eo solo (estrutura da correia apresentada na Figura 33); λ é o ângulo entre a estrutura da interfase e o solo no momento de alinhar a máquina para a planta de alho e η é o ângulo entre a direção de arranque da planta de alho e a velocidade de deslocamento como pode ser observado na Figura 34.

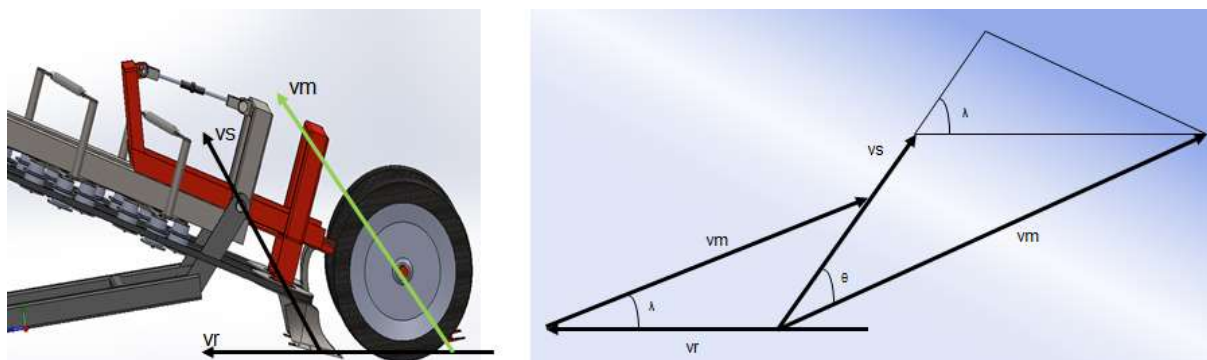


Figura 34. Sulcador e sistema de transporte da planta de alho.
Fonte: AUTORA, 2021.

Na Tarefa 4.2 foram utilizadas duas simulações denominadas estágios e com as seguintes condições (SILVA, 2018): i) simulada a situação de trabalho da máquina colhedora de alho em relevos variador de terreno plano (0%) e ii) inclinação máxima de operação correspondente a 25%.

Seguindo o recomendado por Mialhe (1980), Ojeda (2018) e Silva (2018), a inclinação de referência é descrita pelo plano perpendicular à direção de deslocamento da máquina colhedora de alho no processo de colheita. A altura máxima total da máquina colhedora de alho foi obtida em um intervalo de 1130 a 1420mm como pode-se observar no Apêndice 4, apresentando peso total entre 658 e 740kg, Resultados obtidos por OJEDA (2016).

Foram utilizados os parâmetros de Sinzing para segurança, tamanho do elemento máximo de 4mm, processamento computacional de 308s e critério de falha segundo von Mises. Segundo Budynas e Nisbett (2016), é possível reproduzir os resultados anunciados para materiais dúcteis, por meio da teoria da energia de distorção de materiais, no momento em que estes são submetidos a carregamentos estáticos que levam em consideração a tensão de von Mises. Cabe ressaltar que esta não deve ser maior que a tensão de escoamento do material.

A tensão de escoamento é obtida pelo coeficiente de Poisson do material (ASTM A36), o módulo de elasticidade (von Mises) e o ensaio de tração. Como recomenda Silva (2018).

Na Tarefa 4.3 foi possível destacar a operação em condições com relevo variado, assim como as perdas de controle existentes em aclives e declives. Foram realizadas simulações das forças que atuam na máquina colhedora de alho, seguindo as recomendações feitas por Mialhe (1980), Silva (2018) e Silva et al., (2018). Caso a estrutura atendesse as especificações, a análise modal poderia ser realizada.

Após, foram geradas frequências e formas de modais para a análise modal da estrutura. Por meio da utilização de *Ansys* foi possível analisar a estrutura de acoplagem ao trator, em escala de deformação de 10x e com frequências variando de 51,50 a 115,70Hz. Percebe-se que o acoplamento é inferior ao limite máximo permitido pela NBR ISO110 e ISO 730 para acoplagem do trator. Essas simulações também foram realizadas para os outros dois sistemas: sistema de transporte e sistema de arranquio.

Na Tarefa 4.4 todas as análises realizadas foram aprovadas. Dessa forma, percebe-se que todos os parâmetros analisados se encontram dentro das situações favoráveis de segurança, para fazer o estudo estrutural da máquina . Na Tabela 9 estão descritas as entradas e saídas da etapa, acompanhadas dos métodos, ferramentas e documentos de apoio necessários para sua realização.

Tabela 9. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 4 da fase preliminar.

Entrada	Saída	Métodos, ferramentas e documentos de apoio
Conexão estrutura, transmissão de esforços-geometria fixa, movimento no sistema cartesiana, parâmetro de contorno da ponteira, resistência específica do solo, dados Ansys 18.2 (CAE), peso dos componentes e operador, simulações - estágios, parâmetros de Sinzing, processamento computacional, malha, tensão de escoamento do A36/SAE1020, parâmetros de aclives e declives de tratores, frequências segundo A36/1020.	Geração de malha adequada para cada componente estudado, forças, esforços, prevenção de falhas da estrutura, aclave e declividade limite operacional, diferença entre o fator de segurança nos diferentes relevos variados, resultados de deslocamento, estabilidade e rigidez das peças, resultados de deformação, fatores de segurança segundo von Mises.	Catálogos, artigos, dissertações, teses, sistemas CAD/CAE, consulta online, normas técnicas, leis, análise de custo meta, especificações de projetos, fichas técnicas.

Fonte: AUTORA, 2021.

4.1.5 Tarefa 5 – Comparativos entre as análises

Após a realização das análises e simulações numéricas na máquina colhedora de alho, foram considerados os resultados obtidos nos estágios (i) e (ii) para as comparações entre eles. Por meio da Tarefa 5 foi possível realizar este comparativo por meio das tensões de von Mises máximas, deslocamentos máximos, deformações máximas, fator de segurança e diferenças no deslocamento para 0% e 25% de declividade (Figura 35).

Na Tabela 10 estão descritas as entradas e saídas da etapa, acompanhadas dos métodos, ferramentas e documentos de apoio necessários para sua realização.

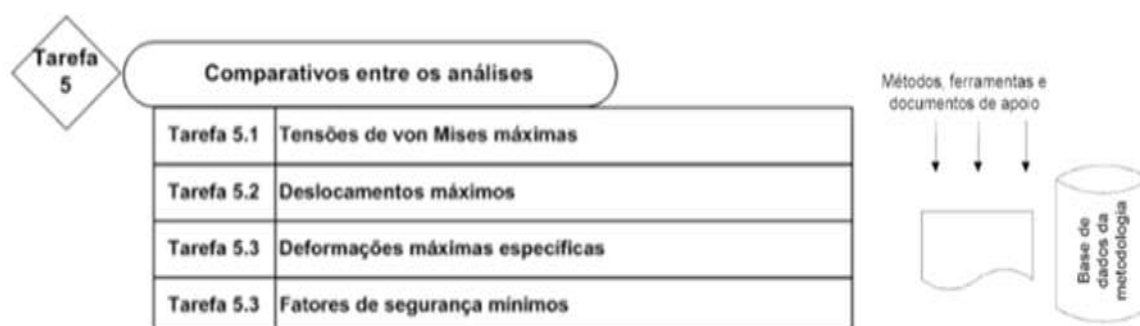


Figura 35. Comparativos entre as análises.
Fonte: AUTORA, 2021.

Tabela 10. Entradas, saídas e métodos, ferramentas e documentos de apoio referentes a Tarefa 5 da fase preliminar.

Entrada	Saída	Métodos, ferramentas e documentos de apoio
Valores tensão de von Mises; resultados estágios (i) e (ii); resultados de deslocamentos máximos; resultados das deformações máximas; fatores de segurança obtidos dos resultados de divisão da tensão de escoamento do A36 e SAE 1020.	Desenho do produto com os parâmetros de segurança desejados para o cumprimento do objetivo deste trabalho.	Análises e resultados da tarefa 5, <i>software Solidworks, Ansys</i> .

Fonte: AUTORA, 2021.

5 Resultados e Discussão

5.1 Tarefa 1: Planejando o projeto preliminar

Para realização da **Tarefa 1** foram abordados os princípios da gestão e do controle do projeto, conforme Pahl et al. (2005). A ideia principal era viabilizar as ferramentas e dados com a finalidade de levantar aspectos importantes para realização efetiva do projeto, dentro das condições e possibilidades abrangidas.

Após a realização da etapa de pesquisa bibliográfica, pode-se observar que para projetos relacionados a máquinas colhedoras de alho para bulbos comerciais, desenvolvidas por meio de análises computacionais, o nível de confiabilidade final exigido é igual e/ou superior a 95% (OJEDA, 2018).

Posteriormente, referindo-se a **Tarefa 1.2**, foi possível identificar os preços dos SSCs praticados no mercado nacional, com três fornecedores distintos (Apêndice 3). Após a análise referente aos preços no mercado nacional e internacional das máquinas colhedoras de alho, observou-se um preço médio de € 75.000 euros, equivalente a R\$ 457.500,00 reais. De forma positiva, os custos básicos para fabricação da máquina colhedora de alho para relevos variados desenvolvida neste estudo, adicionada a inflação atual de 5,15% no Brasil, possui um valor final de R\$ 130.173,94 reais. Os valores seguem descritos, de forma simplificada, na Tabela 11.

Tabela 11. Custos básicos para a fabricação de uma máquina colhedora de alho.

Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço (R\$)	
				Unitário	Total
MQ1	Estrutura Principal do Sistema Interface máquina-solo-planta	Corpo	1	4.445,00	4.445,00
MQ2	Estrutura da interface no Sistema Interface máquina-solo-planta	Corpo	1	38.185,27	38.185,27
MQ3	Estrutura da base de ligação entre a estrutura principal I e a estrutura da interface no Sistema Interface máquina-solo-planta.	Corpo	1	8.170,29	8.170,29
MQ4	Estrutura Principal II do Sistema de limpeza e ensaque dos bulbos de alho.	Corpo	1	29.622,16	29.622,16
MQ5	Estrutura de direcionamento e limpeza dos bulbos de Sistema de limpeza e ensaque dos bulbos de alho.	Corpo	1	25.894,99	25.894,99
MQ6	Montagem de todo o corpo da máquina colhedora de alho para relevos variados.		1	3.999,20	3.999,20
Subtotal (R\$)					110.316,90
IVA (18%)					19.857,04
Total (R\$)					130.173,94

Fonte: AUTORA, 2022.

5.2 Tarefa 2: Definindo a estrutura do produto

Na **Tarefa 2** foram propostas as especificações meta do produto. Para isso, foi necessário coletar informações, tais quais: necessidades dos clientes, pesquisas referentes ao mercado da cultura e entrevistas focando no tamanho das unidades produtoras. Posteriormente, foi possível reunir todos esses requisitos por meio de métodos e técnicas (QGIS, Análise de hierarquização, Diagrama de Mudge e QFD) com o intuito final de identificar as especificações metas do produto.

No Quadro 2 é possível visualizar as principais especificações meta para o desenvolvimento da concepção mais adequada para as necessidades dos agricultores familiares com unidades produtoras em relevos variados. Todas essas especificações encontram-se no Apêndice 4.

N°	Especificações de projeto	N°	Especificações de projeto
1	Interface máquina bulbo	12	Bulbos retirados do solo
2	Confiabilidade esperada	13	Acionamento independente das rodas
3	Velocidade de trabalho	14	Número de regulagens
4	Custo de produção	15	Massa da máquina colhedora de alho
5	Variação de profundidade	16	Custos de manutenção
6	Número de linhas da máquina colhedora de alho	17	Vida útil da máquina colhedora de alho
7	Altura do centro de gravidade	18	Materiais normatizados
8	Dimensão da máquina colhedora de alho	19	Raízes do bulbo cortadas
9	Erro máximo de controle	20	Comprimento da haste da planta de alho
10	Largura de trabalho	21	Bulbos ensacados
11	Bulbos danificados na colheita		

Quadro 2. Principais especificações meta para o desenvolvimento de maquinário que atenda às necessidades do público-alvo do estudo.

Fonte: OJEDA, 2018.

Os resultados contemplam, principalmente, três concepções: cortar a haste da planta de alho no fluxo contínuo sem solo; agrupar para cortar as hastes sem solo e podar as hastes e folhas no solo. Foram avaliadas as estruturas em relação aos requisitos do cliente pela experiência da equipe multidisciplinar. A seleção mais propícia na concepção é chamada de sistema de arranquio com corte contínuo de haste (cortar a haste da planta de alho no fluxo contínuo sem solo) (Figura 36).

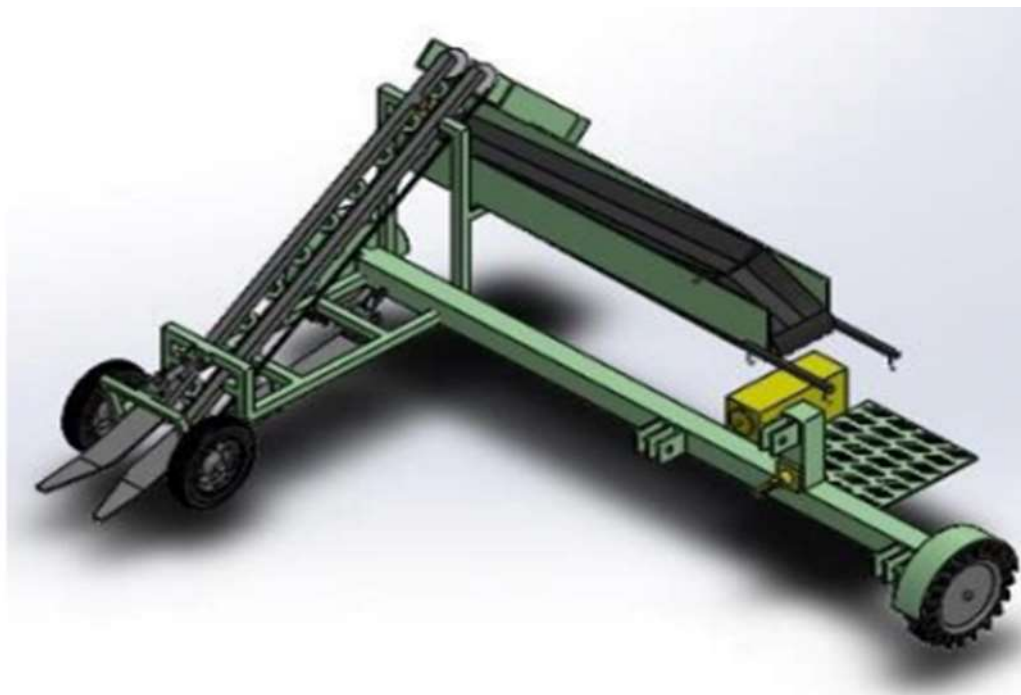


Figura 36. Sistema de arranque com corte contínuo de haste.
Fonte: OJEDA, 2018.

Na Tabela 12 seguem apresentados os sistemas, subsistemas e principais componentes (SSCs), bem como os principais parâmetros que foram considerados no transcorrer do desenvolvimento do produto nesta fase. Desenhos esquemáticos no apêndice 5.

Tabela 12. Especificações meta de uma máquina colhedora de alho para as cordilheiras Andinas da Venezuela.

Sistema	Subsistema/Componentes	Componentes	Principais parâmetros
Interface máquina planta de alho	Regular altura de agarre da haste	suporte de fixação da base de ligação A36; suporte de suporte da ponteira A36; parafuso sem fim; parafuso sem fim; pneus 8"; barra de suporte dos pneus; parafuso de fixação dos pneus; arruela de fixação; bucha do pneu; rolamentos SKF 6004-2RZ;	Altura máquina - planta; velocidade de deslocamento; ângulo de entrada.
	Transmitir potência	Engate de três pontos; chapa A1020.	Dimensões conforme as Normas ABNT NBR ISO 11001-3 e 730.
	Agarrar a haste e Elevar a planta de alho	Correia lisa V13mmx23mm; polias; braço guia; base de interação base do sulcador e transportador.	Velocidade de deslocamento; Ângulo de inclinação do sistema de transporte; ângulo de inclinação da haste da planta de alho.
	Regular interface máquina-solo-planta	Regulagem manual da base que suporta o sulcador	Altura das polias com as correias em relação à haste da planta de alho.
	Transmitir potência	engate de três pontos; chapa A1020.	Dimensões conforme as Normas ABNT NBR ISO 11001-3 e 730.
	Corte de solo e raízes	Sulcador tipo avisa com haste curvo - reguláveis.	Sulcador com filamento de corte no interior e ângulo de inclinação num intervalo de 10° a 12°; velocidade de deslocamento; largura e comprimento do sulcador.

Sistema	Subsistema/Componentes	Componentes	Principais parâmetros	Sistema
Base de ligação	Transporte da planta de alho	Conduzir planta sem raízes e Retirar detritos	polias guia e condutora; correias lisas em V13mmx8mm; molas; barra redonda; estrelas de vibração; rolamentos em nylon 10x56x23; parafusos sextavados; arruela lisa; porcas, chapa de suporte das estrelas; eixo de movimento;	Velocidade de deslocamento; pressão das polias da correia; tensão da correia.
		Expelir detritos, haste e folhas	Calha de condução de detritos; parafusos sextavados; arruela lisa; porcas autotravantes	Fixação na estrutura do transportador de condução da planta de alho, com inclinação longitudinal de 12°
	Transportador de bulbos limpos	Direcionar fluxo dos bulbos e Remoção da túnica superficial do bulbo	eixo de inversão; arruela; bucha; mancal; parafuso; arruela de pressão; banda transportadora.	Tensão da banda; largura; comprimento; peso; material inox e 0a1020.
Parte removível da máquina	Ensaque de bulbos	Ensacar os bulbos	Direcionamento dos bulbos de alho comerciais	Velocidade de deslocamento; controle de qualidade dos bulbos.
		Posicionar embalagem	Chapa de condução frontais,	Sacos de polipropileno com fitilho de 40kg para alho; dimensão e forma da seção da estrutura.
		Segurar as alças da embalagem	Suporte dos sacos 1020; eixo; chapa de dos braços do suporte	Dimensões conforme o saco de embalagem dos alhos.
		Gerar alarme de peso de peso	sensor AHC 004.	Alarme visual.

Fonte: OJEDA, 2018

Na **Tarefa 2.3**, a equipe multidisciplinar analisou o diagrama de bloco proposto por Ojeda (2018) e foram observados dois pontos críticos: i) Sistema interface máquina bulbo e ii) Sistema de ligação entre as estruturas da frente.

Dessa forma, focou-se em solucionar estes problemas por meio da elaboração de um fluxograma individual, com os princípios de operação e visando que as tarefas seguintes auxiliassem na tomada de decisão para o produto final.

No Apêndice 5 considera-se que os subsistemas estão representados pelo contorno de linhas pontilhadas e os componentes são representados pelos retângulos nomeados, sujeitando-se em uma sequência de conexões dos sistemas da máquina, identificando conexões como: regulagem do sulcador, regulagem de altura para pegar a haste da planta de alho e estrutura principal I (estrutura na parte frontal da máquina) (AREND, 2003).

Para a **Tarefa 2.4**, a equipe observou se as interfaces escolhidas para a definição do produto eram suficientes, conforme proposto por Rozenfeld et al. (2006). Optou-se pela proposta de Mazetto (2000), onde foi possível classificar as especificações e os princípios da concepção como básicos e especiais (Quadro 3).

Básicas	Especiais
Estrutura principal I (frente)	Arruelas, parafusos, porcas.
Estrutura principal II (traseira).	Mancal, molas, pneu.
Estrutura do elevador.	Rolamentos, motor, válvula, mangueiras.
Esticador das correias. transportadoras da planta de alho	Correia transportadora, banda transportadora, polias, rolamentos de nylon.
Sulcador.	Chapa, aço.
Guia de condução da planta.	Fonte de potência.
Estrutura da interface.	Arruelas, parafusos, porcas e polias.

Quadro 3. Classificação dos módulos da concepção entre básica e especial.

Fonte: OJEDA, 2018.

Pode-se observar que os módulos básicos, necessitam de total desenvolvimento de seus subsistemas e componentes. Entretanto, nos módulos especiais, existe a disponibilidade de utilizar componentes similares, desenvolvidos e encontrados no mercado nacional. Dessa forma, é possível justificar ambos

desenvolvimentos para o sistema transportador da planta de alho e sistema de corte de solo e raízes (Figura 37 e 38).

No design da Figura 37, a equipe multidisciplinar propôs mudanças nas rodas guia, largura da estrutura principal I (a qual suporta a estrutura do transportador) e no sulcador. Além disso, também foram propostas modificações no tipo de haste e na ponta do sulcador. Neste design o centro de gravidade encontra-se abaixo do centro dos pneus traseiros, mas o plano espacial da lavoura e massa total da colhedora não foram viáveis. No Apêndice 6 pode-se analisar as variantes desenvolvidas e o plano espacial da lavoura no cultivo de alho.



Figura 37. Vista direita de máquina colhedora com frontal maior.
Fonte: AUTORA, 2021.

Para a Figura 38 o design pensado foi focado no comprimento e na largura da máquina colhedora, além do tipo de haste, ponta do sulcador e a fonte de potência, tomando como referência o proposto por Sun et al. (2018).

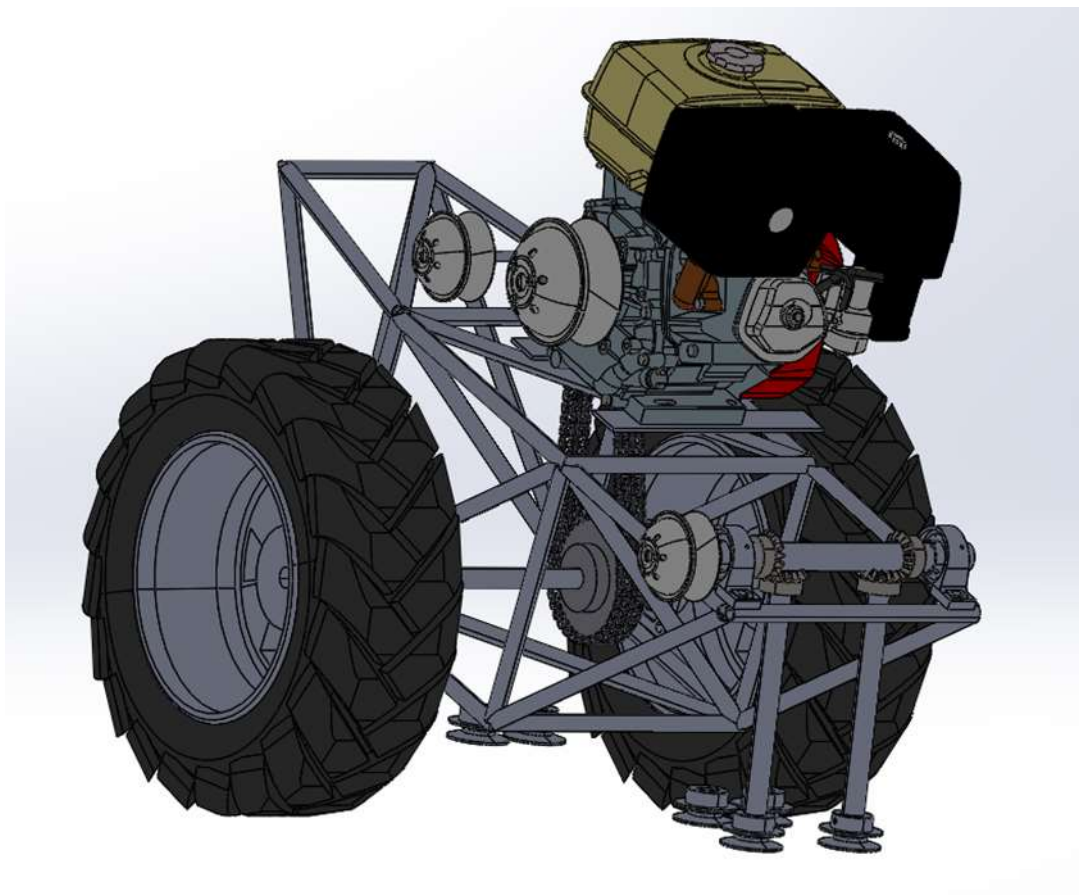




Figura 38. Vista direita de proposta II máquina colhedora com frontal maior.
Fonte: AUTORA, 2021.

Após as análises e o brainstorming, no referente a **Tarefa 2.4** são definidos os leiautes preliminares, representados por meio dos desenhos 3D (Quadro 4). Foram estipuladas as dimensões e as posições preliminares com auxílio da classificação dos módulos da concepção (Tabela 13).

Tabela 13. Comparativo entre as características básicas da concepção de Ojeda (2016) e a concepção atual.

Classificação básica	Concepção Ojeda (2018)	Autora (2021)
Estrutura principal I (frente)	Estrutura rígida; união com solda na base do regulador de profundidade e a barra da parte posterior da máquina e suporta a haste do sulcador	Estrutura flexível, unida na estrutura que suporta o sulcador e o regulador de profundidade e de altura; união por meio de parafusos a estrutura traseira; suporta a estrutura do sistema de transporte e comprimento maior, gerando menor altura o que favorece o centro de gravidade da máquina
Estrutura principal II (traseira)	Barra rígida com pneus nas extremidades; suporte cardan, motor, base saco de embalagem e suporta estrutura da banda transportadora para direcionar e limpar os bulbos	Estrutura adimensional unida ao trator nos três pontos; suporta a estrutura da banda transportadora para direcionar e limpar os bulbos e suporta a base aérea para o ensaio dos bulbos comerciais
Estrutura do elevador	Suportado pela estrutura principal I; suporta a polia conduzida e condutora, correia, rolamentos de nylon; suporta sistema de engrenagens e suporta sistema dispensador de detritos	Suportado pela estrutura principal I; suporta a estrutura do sulcador; união com solda na base do regulador de altura; suporta o sistema de pressão da haste da planta de alho e limpeza de detritos e suporte base das polias motrizes, servo motor
Estrutura que suporta o sulcador (ligação)	Estrutura principal I (frente)	Estrutura de ligação entre a estrutura de transporte da planta de alho e estrutura principal I (frente); regulagem de profundidade mecânico; suporta as guias da entrada das plantas de alho na máquina; suporta as rodas guias e suporta o sulcador
Sulcador	Suportado pela estrutura principal I (frente); sistema de profundidade mecânico e tipo de haste inclinada, com ponta estreita, quantidades um	Suportado na estrutura que suporta o sulcador (ligação) e tipo de haste curva, com ponta larga de aiveca, quantidade dois
Guia de condução da planta	Suportada pela estrutura principal I (frente) e Formato de lâmina plana e ponta retangular	Suportada na estrutura que suporta o sulcador (ligação) e design tubular com lâmina de corte de folhas.
Esticador das correias transportadoras da planta de alho	Não aplica	Design geométrico em forma de isósceles que suporta os rolamentos de nylon, dá pressão na correia, transmite movimento na base das molas e movimenta a planta de alho para retirada do excesso de terra e detritos

Fonte: AUTORA, 2022.

Concepção de colhedora desenvolvida por Ojeda (2018)	Leiaute final da concepção
	

Quadro 4. Produto desenvolvido por Ojeda (2018) e produto proposto na atual pesquisa científica.
Fonte: AUTORA, 2022.

5.3 Tarefa 3: Determinando forma física e materiais estruturais

Na **Tarefa 3**, posteriormente a análise dos sistemas da colhedora de alho, o modelo inicial do produto desta pesquisa, apresentado no Quadro 4 para relevos variados, apresentou uma massa total de 487,55kg e dois sistemas rodantes nos extremos na direita e esquerda da estrutura traseira da máquina. A geometria do maquinário possui largura total de 2.164mm, largura da interação máquina-solo-planta frontal de 228mm e altura de 1.009mm. O centro de massa apresenta as coordenadas x: 198,77mm, y: 417,71mm e z: 160,55mm.

O sistema da interface máquina-solo-planta como princípio de funcionamento, atua da seguinte forma: 1) Direcionamento das hastes e 2) Corte do solo e raízes. À medida que o conjunto trator-máquina se desloca no plano espacial da lavoura, os direcionadores elevam as folhas e os detritos e direcionam as hastes para planta de alho, por meio de duas correias preensoras (estas funcionam com o auxílio de duas polias que as fazem girar).

Cada uma das correias gira entre duas polias, sendo uma delas motriz. Dessa forma, torna-se responsável pela transmissão do movimento (por meio de um servo motor), alimentado pelo sistema de válvulas de controle remoto (VCR) do trator. Quanto ao referente efeito que a extração e elevação da planta de alho do solo produz, este ocorre devido ao vetor resultante da velocidade das correias e o deslocamento

do conjunto trator-máquina colhedora de alho. No sistema, uma placa com formatos isósceles suporta três rolamentos de nylon, que exercem pressão nas correias. Estas, por sua vez, suportam dois cilindros que possuem, em seus vértices superiores, uma mola atuando como mecanismo de vibração para a eliminação do excesso de terra e detritos.

Na parte superior do sistema de transporte, pode-se observar um disco de movimento contínuo para o corte da haste e folhas, sendo expelidos e direcionados por uma lâmina a 45° do solo. O bulbo do alho é depositado na banda transportadora, sendo o atrito entre eles e a correia transportadora o responsável por direcionar as primeiras túnicas do bulbo ao sistema de ensaque, levando a obtenção dos bulbos comerciais (FIGURA 60).

No ponto de corte do solo e raízes, foi selecionado um sulcador dividido em duas partes, a saber: a ponteira (projetada em forma de aiveca) e com haste curva. A superfície da ponteira é removível na parte inferior e a haste curva apresenta parede com angulação de 30° (Figura 39). A largura da ponta é igual a 35mm e a superfície da ponta possui largura de 50mm.



Figura 39. Representação do sulcador.
Fonte: AUTORA, 2022.

Pelas recomendações de Feng et al. (2017) e Hout et al. (2020), a superfície da ponteira trabalha em uma fileira do plano espacial da lavoura, onde consegue remover o solo e cortar as raízes, com a finalidade de tornar o processo de mecanização desafogado. Para este plano espacial de trabalho, a largura da ponteira precisa ser menor que a largura média entre duas fileiras de alhos. Sendo assim, a distância média entre uma fileira deve ser igual a 80mm.

Para que o sulcador possa alcançar uma profundidade de escavação maior que o tamanho médio do bulbo de alho, foi utilizada uma altura de 45,50mm e um diâmetro

de 37mm, conforme sugerido por diversos autores (FILGUERA, 2013; EMBRAPA, 2015; FRANCISCO, 2018). O sistema de regulagem da profundidade variou de 0mm a 150mm.

Antes dos testes no *software Ansys*, a modelagem da máquina colhedora de alho projetada em 3D pode ser observada no Apêndice 7. Os materiais, lista dos SSCs com seus respectivos custos (diretos, indiretos e financiamentos) foram obtidos via *software LULO*, além de ser possível projetar a inflação no Brasil.

Para finalizar a modelagem 3D da máquina colhedora de alho para relevos variados, foi selecionado um trator classe II Case Farmall 90 (Figura 40) para garantir a geometria do acoplamento. Foram utilizadas as normas vigentes: ABNT NBR 11001-1 e ABNT NBR 11001-3.

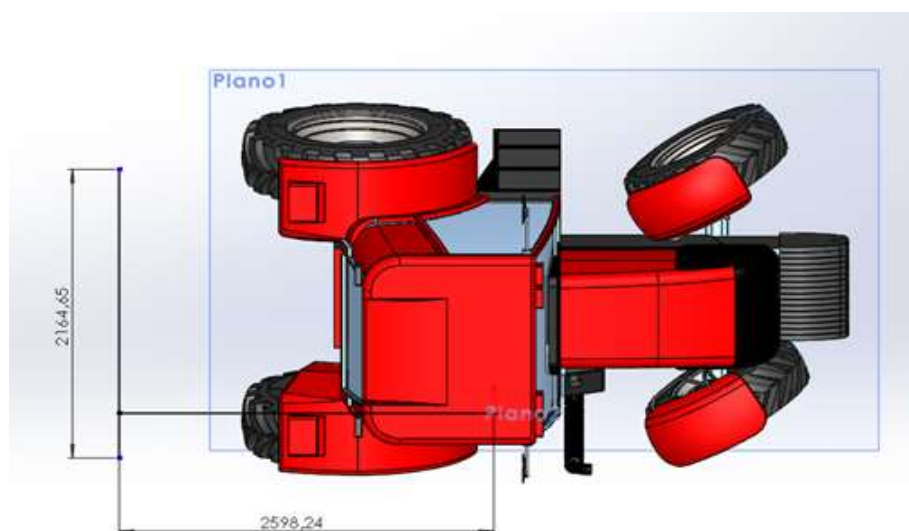


Figura 40. Trator classe II, cotas com largura por comprimento da colhedora de alho.
Fonte: AUTORA, 2022.

Após a definição do leiaute e dimensionamento, foi possível apresentar os resultados da convergência de malha (Figuras 41, 42 e 43).

Nota-se que na Figura 41 ao atingir 452075 nós (o que corresponde a 255047 elementos na ponteira), na Figura 42 ao atingir 491884 nós (o que corresponde a 238176 elementos na base de ligação) e na Figura 43 ao atingir 491884 nós (o que corresponde a 238176 elementos na estrutura), os gráficos de tensão tendem a estabilizar. Dessa forma, essa quantidade de elementos representa a confiabilidade das simulações na ponteira, na base de ligação e na estrutura com menor custo computacional.

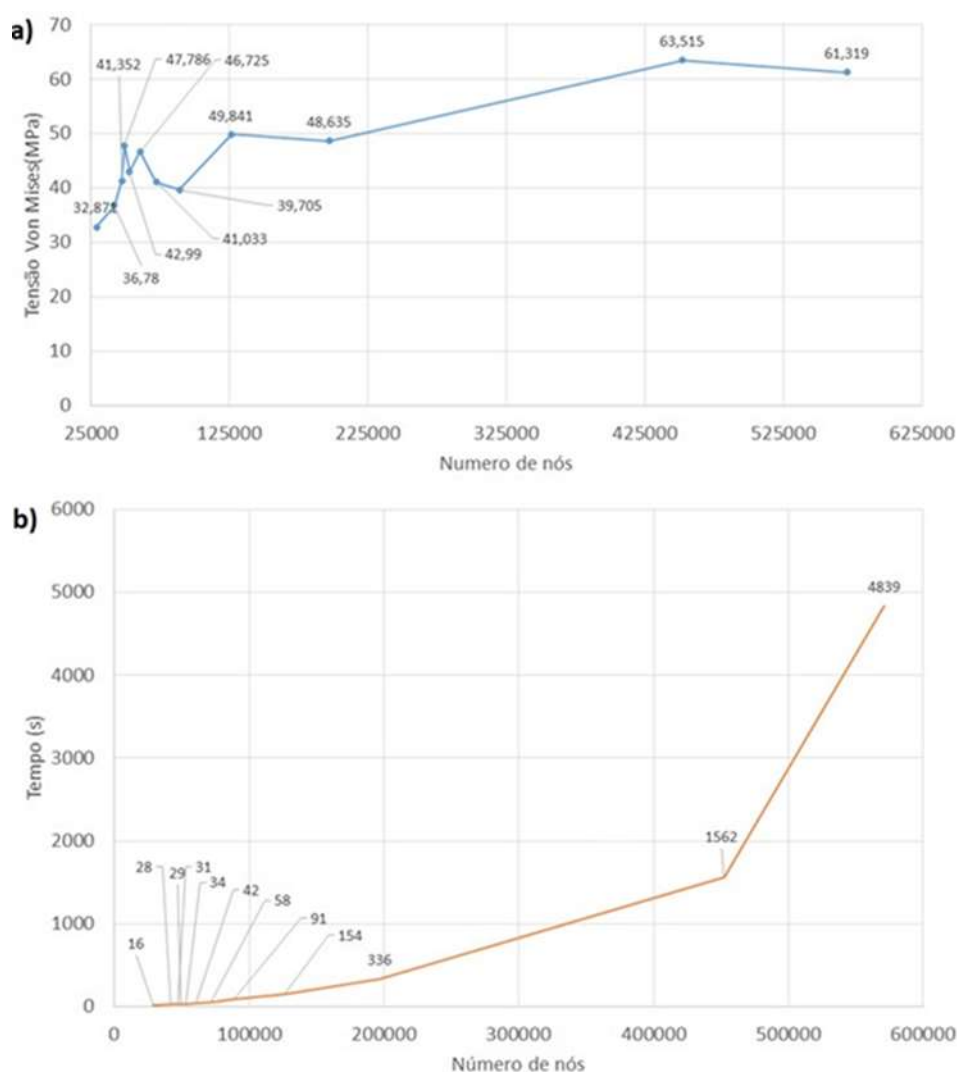


Figura 41. Processo de convergência de malha apresentado em função da (a) tensão de von Mises e (b) tempo computacional para ponteira.
Fonte: AUTORA, 2022.

Baseado na geometria dos três principais sistemas da máquina colhedora de alho, o tempo para a realização das análises nas interações estáticas e dinâmicas foi em média de 579,67 segundos por cada componente dos sistemas.

No momento em que atinge 452075 nós (o que corresponde a 255047 elementos na ponteira), pode-se observar que o custo computacional é exponencial, optando-se por trabalhar com essa quantidade de nós (452075) em uma malha entre 2 e 4mm e com tamanho de elementos de 3 a 4mm. Para as demais partições, foram gerados 491884 nós, correspondendo: 238176 elementos a base de ligação e 491884 a estrutura.

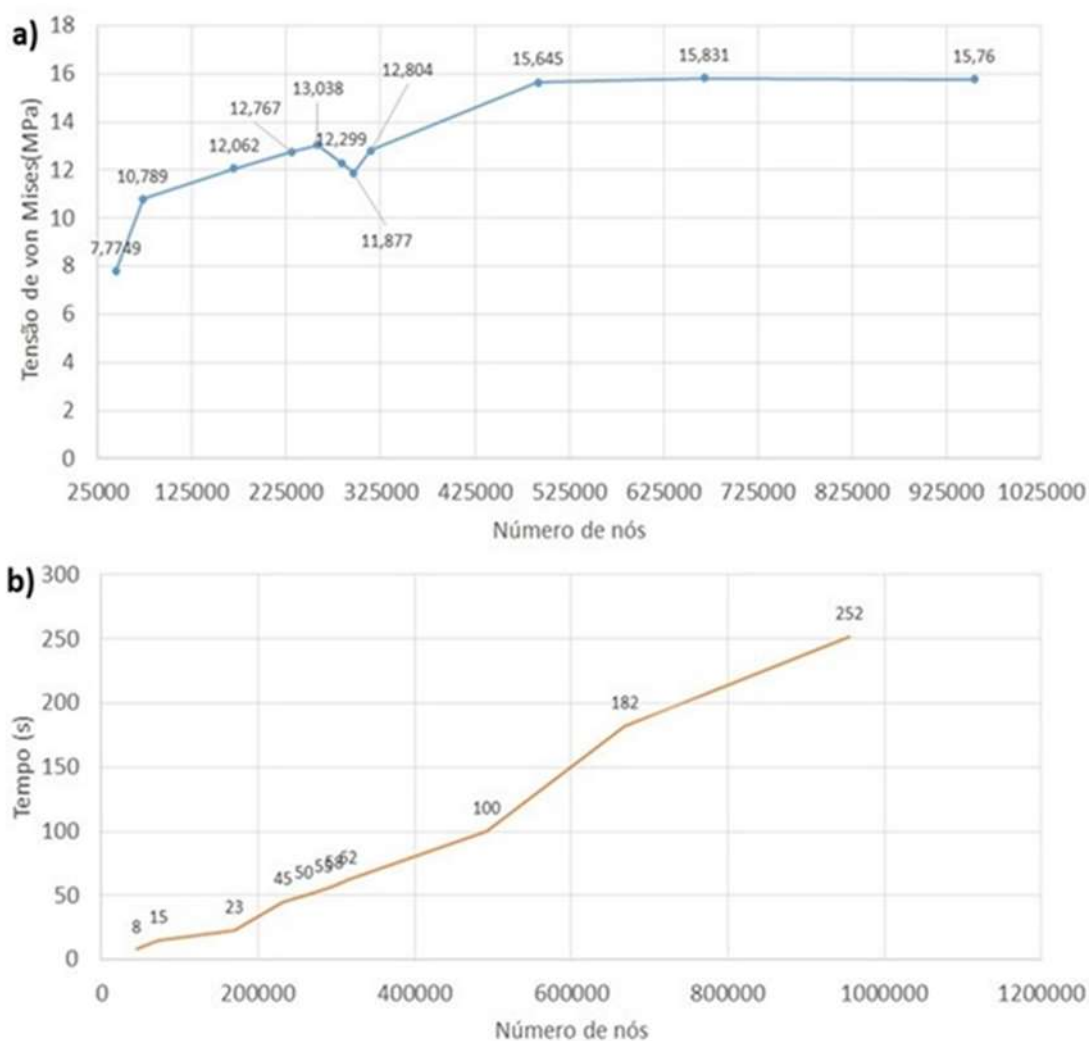


Figura 42. Processo de convergência de malha apresentado em função da (a) tensão de von Mises e (b) tempo computacional para base de ligação do sistema de transporte da planta.
Fonte: AUTORA, 2022.

Na Figura 42(a) pode-se observar que a estabilidade iniciou em uma tensão de 15645 MPa. Foi possível obter um mapeamento da qualidade de malha igual a 0,95, com um comprimento mínimo nas bordas de 0,0075mm. Sendo assim, percebeu-se que a obtenção da resposta se dá em virtude da métrica e das mudanças permitidas entre um e outro (2%). Por meio da análise computacional da colhedora de alho, com malha de 2 a 4 mm, foi possível propor um comportamento adequado para os equipamentos do pesquisador, os parâmetros de qualidade e o fator de segurança.

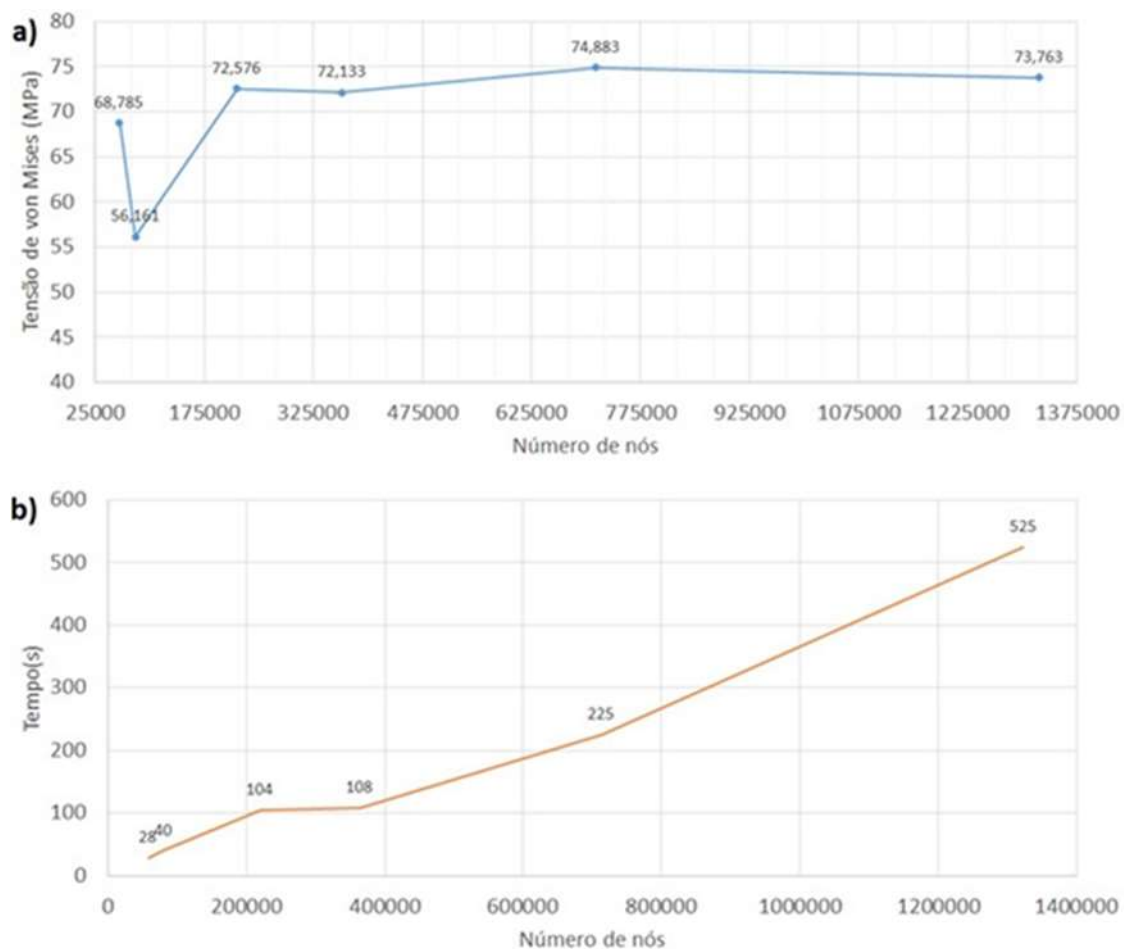


Figura 43. Processo de convergência de malha apresentado em função da (a) tensão de von Mises e (b) tempo computacional para estrutura.
Fonte: AUTORA, 2022.

Na Figura 43(3), a partir dos resultados de convergência de malha, ficou estabelecido para ponteiro tamanho máximo de 2 mm (para o elemento), para base de ligação tamanho máximo de 4 mm (para o elemento) e para estrutura tamanho máximo de 6 mm (para o elemento). Em ambos os casos o parâmetro de qualidade utilizado foi “médio”, tanto para os contornos quanto para a qualidade da conversão dos elementos.

Na Tabela 14 seguem descritos os parâmetros analisados para tipo de estudo estrutural, de uma peça PPO3 em aço ASTM36. Por meio do Gráfico 1, foi possível evidenciar que, em um sistema básico de fabricação de máquina colhedora de alho, as tensões de von Mises são aceitáveis em malhas de 6mm à 4mm, com 74,88MPa e um fator de segurança médio de 3,40.

Tabela 14. Parâmetros básicos para a fabricação de uma máquina colhedora de alho.

Parâmetros		Tamanho Máx.	Elementos	Nós	Deformação	Tensão	Processamento computacional
Qualidade	Sizing	(mm)	-	-	(mm)	MPa	tempo (s)
Baixo	Baixo	Default	31932	58072	0,97295	68,785	28
Médio	Médio	Default	43338	80384	1,0399	56,161	40
Médio	Médio	20	116478	219699	1,1089	72,576	104
Médio	Médio	12	192762	364596	1,1182	72,133	108
Médio	Médio	6	383980	713136	1,1203	74,883	225
Médio	Médio	4	734211	1323467	1,1203	73,763	525

Fonte: AUTORA, 2022.

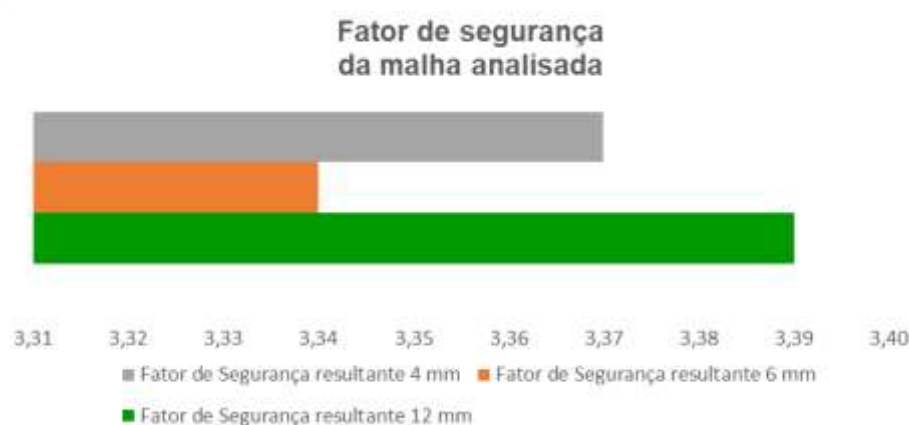


Gráfico 1. Fator de segurança da malha analisada.

Fonte: AUTORA, 2022.

Baseando-se nos resultados do estudo das tensões de von Mises, os pontos multi-iguais encontram-se entre 74,88 e 73,76MPa. Dessa forma, optou-se por executar as análises para uma malha de 6mm, uma vez que, o processamento computacional é inferior ao exigido para uma malha de menor espessura (4mm) e possui igual qualidade. No que diz respeito ao fator de segurança, observa-se que para um aço A36 com resistência igual a 74,88MPa o fator de segurança é 3,34.

5.4 Tarefa 4 e 5: Análises, simulações e comparativos

Cabe ressaltar que, sempre que identificada alguma falha na Tarefa 5, deve-se retornar a Tarefa 4, de modo a reavaliar e solucionar o problema. Sendo assim, optou-se pela discussão conjunta das **Tarefas 4 e 5**.

Para um sistema da máquina colhedora de alho que suporta a ponteira, foram analisados os parâmetros descritos na Tabela 15, onde foi possível observar as tensões de von Mises aceitáveis estão relacionadas a malhas entre 3mm a 1,9mm, com 57,82MPa e fator de segurança médio de 4,20 (Gráfico 2).

Tabela 15. Parâmetros básicos para a análise da estrutura da interface de uma máquina colhedora de alho.

Parâmetros		Tamanho Máx.	Elementos	Nós	Deformação	Tensão	Processamento computacional
Qualidade	Sizing	(mm)	-	-	(mm)	MPa	tempo (s)
Baixo	Baixo	Default	14763	20985	0,14809	32,071	16
Médio	Médio	9	24067	47138	0,14826	41,352	21
Médio	Médio	10	25105	49174	0,14919	47,786	29
Médio	Médio	8	52053	52853	0,1483	42,99	34
Médio	Médio	7	30582	60589	0,14944	46,725	42
Médio	Médio	6	37284	72005	0,15084	41,083	58
Médio	Médio	5	45305	88880	0,15044	39,705	91
Médio	Médio	4	65635	126337	0,15143	49,841	154
Médio	Médio	3	1055265	196976	0,15165	48,635	336
Médio	Médio	2	255017	452075	0,15265	63,515	1562
Médio	Médio	1,9	263104	51063	0,15263	61,319	4339

Fonte: AUTORA, 2022.

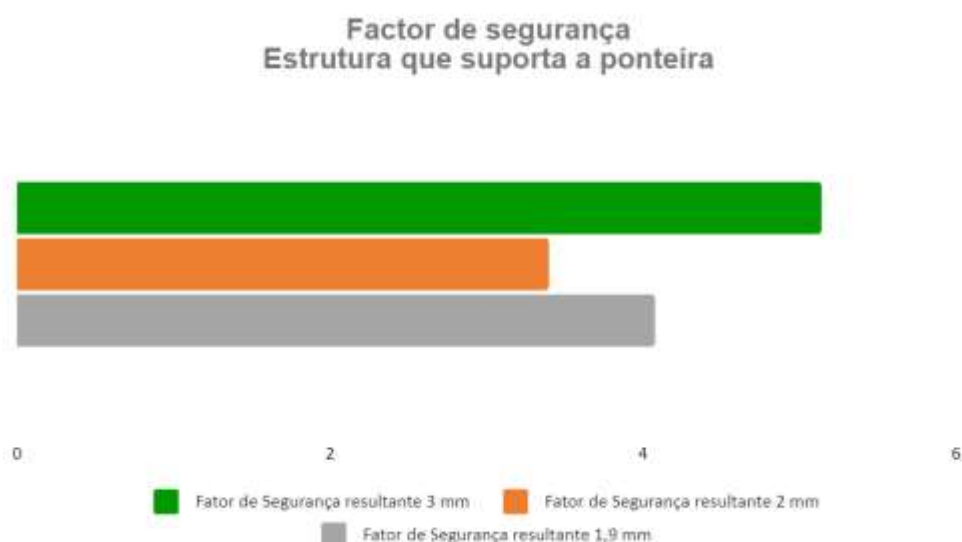


Gráfico 2. Fator de segurança da malha analisada para estrutura da interface.

Fonte: AUTORA, 2022.

Baseando-se nos resultados do estudo das tensões de von Mises, os pontos multi-iguais encontram-se entre 48,64 e 61,32MPa. Dessa forma, optou-se por executar as análises para uma malha de 2mm, uma vez que, o processamento computacional é inferior ao exigido para uma malha de menor espessura (1,9mm) e possui igual qualidade. No que diz respeito ao fator de segurança, observa-se que para um aço A36 com resistência igual a 63,52MPa o fator de segurança é 3,94.

Por meio da verificação de qualidade da malha para os estudos das análises estruturais, deslocamentos modais tendem a justificar a veracidade dos dados. Sendo assim, o refinamento da malha consistiu na aplicação dos esforços ao produto em

determinados pontos com valores calculados de tensão e deformação da resistência (ASTM) e geometria da estrutura.

Observou-se, por meio das simulações, que a estrutura da interface excedeu o limite de escoamento de 250MPa, conforme a AWS (2010). Dessa forma, foram propostas melhorias para que a ponteira obtivesse um fator de segurança mínimo igual ou superior a 3,8. Assim, foi possível identificar a geometria da ponteira ideal para o estudo em questão. A evolução do processo encontra-se representada na Figura 44.

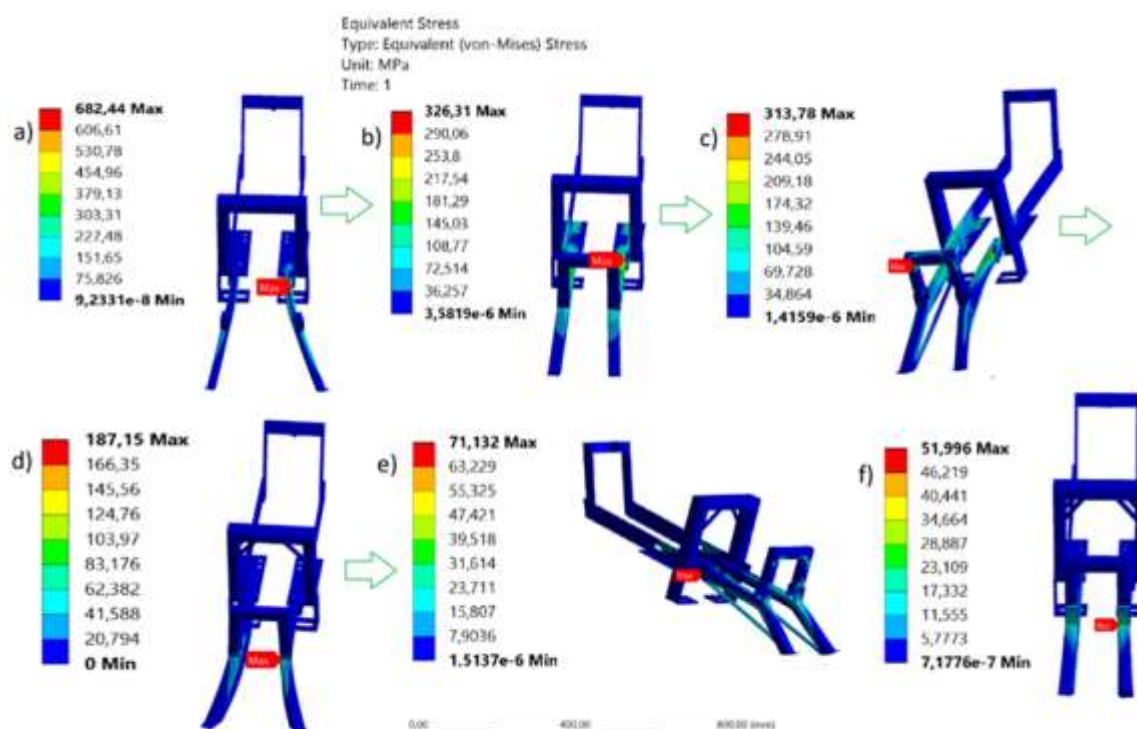


Figura 44. Evolução do processo de simulação da estrutura da interface.
Fonte: AUTORA, 2022.

As melhorias propostas na geometria da estrutura da interface (Figura 45) foram: inicialmente, de (a) para (b) foi adicionado um reforço na posição das rodas, formando um U de 20mm x 20mm. Após, de (b) para (c) foi inserida uma barra de 10mm para travar a estrutura e de (c) para (d) foram inseridos reforços no quadro da estrutura para impedir a abertura e reduzir as tensões.

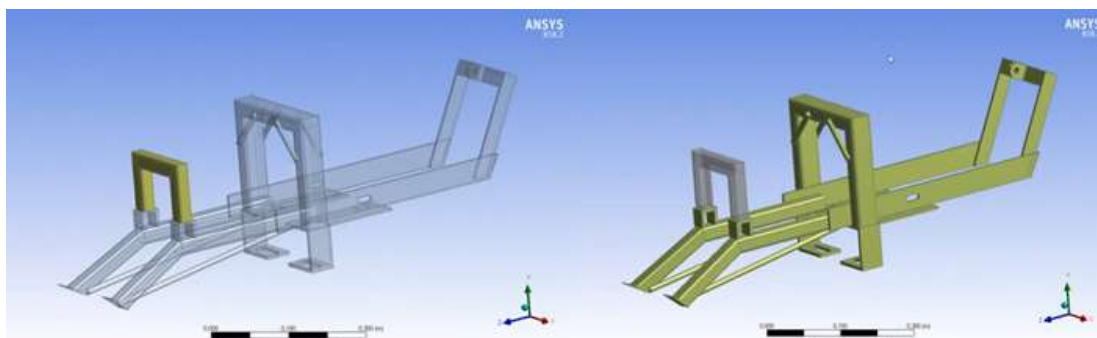


Figura 45. Melhorias propostas para reforçar a estrutura da interface.
Fonte: AUTORA, 2022.

O tubo presente na caixa dianteira, que antes era de 20mm x 20mm, foi substituído por um tubo 30mm x 30mm. Na sequência, de (d) para (e), foi substituído o tubo da ponteira (inicialmente 20mm x 20mm) por um tubo de 30mm x 30mm, igualando-se ao da caixa dianteira. Por fim, de (e) para (f), o diâmetro das barras foi alterado, de 10mm para 12mm (Figura 45).

Os parâmetros do contorno da estrutura de interface para a resistência específica do solo (P_k) para solo médio ($147,15\text{Nmm}^{-2}$) e $0,46\text{MPa}$ – constituindo o valor máximo observado por meio de experimentação. Estes foram aplicados na superfície frontal de contato direto do implemento (em 100mm de profundidade). Os valores obtidos para os momentos torçor e fletor foram, respectivamente, $0,2197$ e $0,02\text{Nmm}^{-1}$. Todos os cálculos dos momentos torçor e fletor foram executados pelo software *Ansys 18.2* do sistema *Computer-Aided Engineering (CAE)*. As forças aplicadas diretamente ao processo de colheita foram: vertical ($261,30\text{N}$), horizontal ($-189,50\text{N}$) e transversal ($442,00\text{N}$).

Na Figura 46 estão representadas as aplicações dos esforços, tanto na estrutura como nos pontos de fixação empregados na análise.

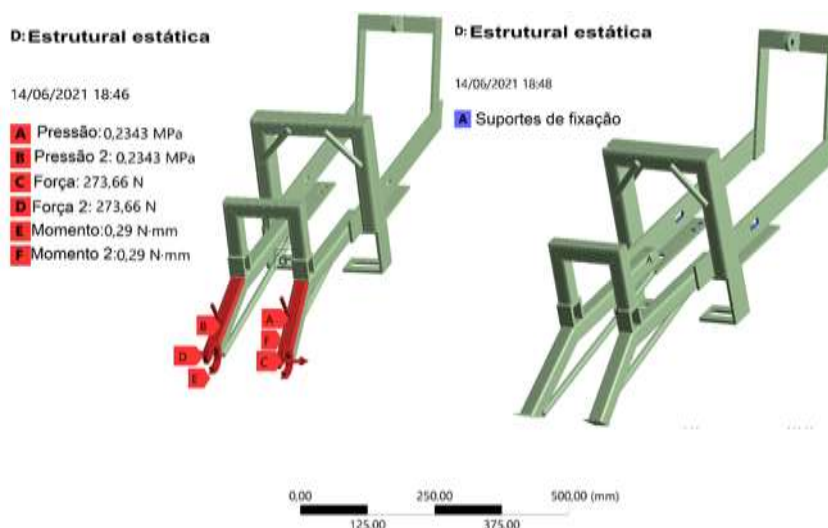


Figura 46. Aplicação dos esforços nos pontos de fixação e na estrutura de interface.
Fonte: AUTORA, 2021.

Nos parâmetros de contorno para a base de ligação entre a estrutura de transporte da planta e a estrutura de interface, correspondem a transmissão de esforços da base que suportam a ponteira para o suporte nos pontos de fixação (Figura 47).



Figura 47. Aplicação dos esforços nos parâmetros de fixação da base de ligação.
Fonte: AUTORA, 2021.

Depois dos parâmetros de contorno para a base de ligação entre a estrutura de transporte da planta e a estrutura de interface, os quais são obtidos pelo método indireto. Estes possuem frequência de 16Hz (em segunda marcha), comprimento do plano espacial do cultivo de 100mm e uma constante de 3,6 para determinar a velocidade média do deslocamento

Nas Figuras 48 e 49, estão apresentados os deslocamentos máximos e as distribuições das tensões equivalentes de von Mises, para a versão final da geometria

da estrutura da interface. Sobre o estudo do deslocamento em uma estrutura, Niemczewski et al. (2014) indica que, os cálculos feitos pelo MEF são confiáveis após a submissão de um protótipo em escala real a carregamentos de forças verticais, para que possam ser comparados com os deslocamentos obtidos via *software*.

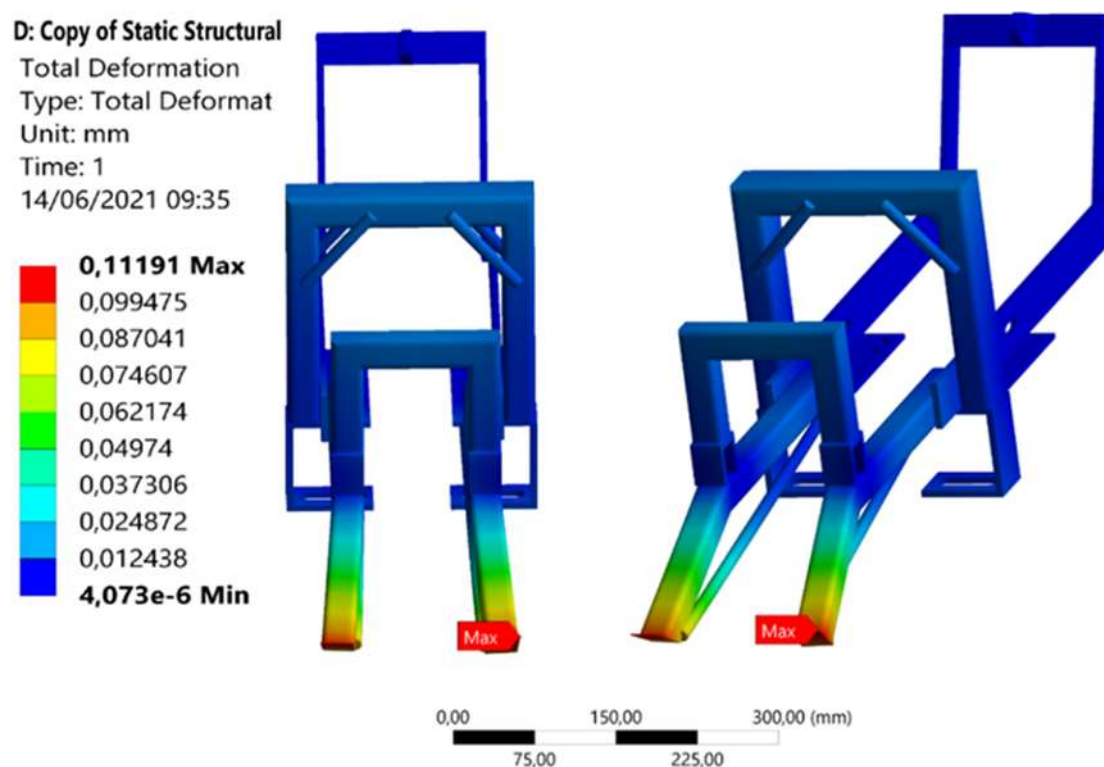


Figura 48. Deformação estrutural na estrutura da interface, com máximo de 0,11mm.
Fonte: AUTORA, 2022.

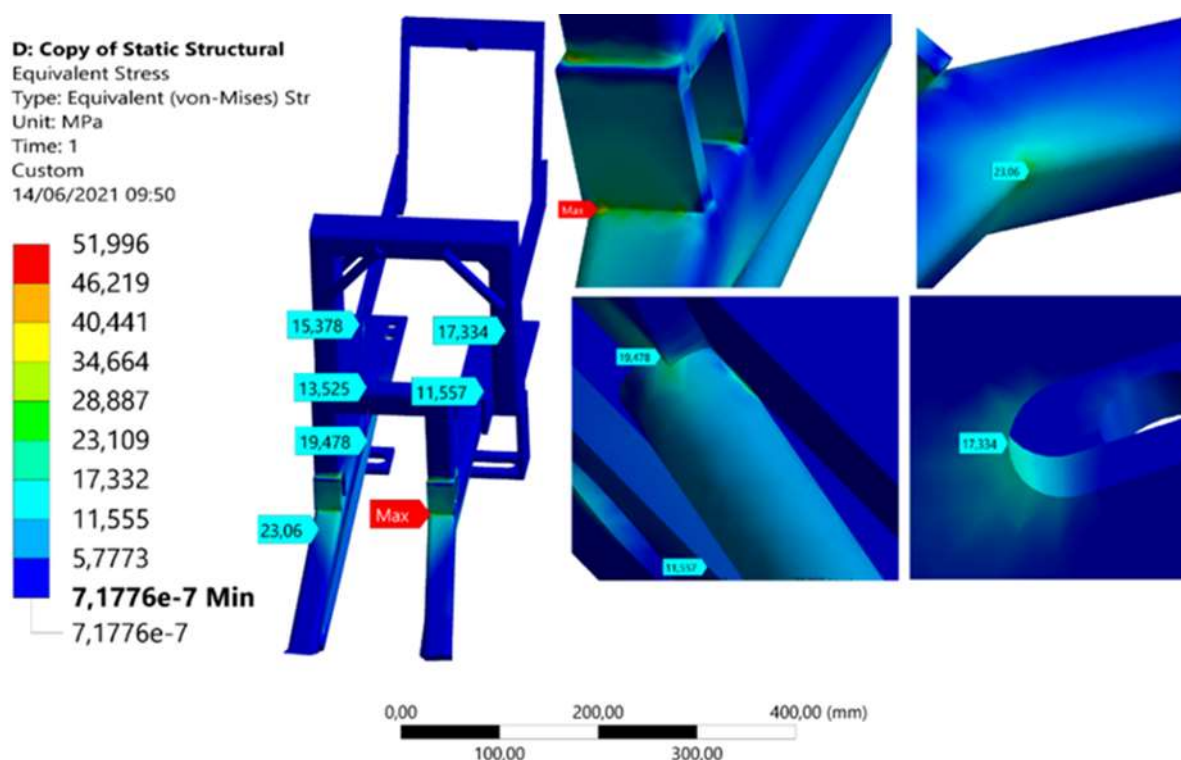


Figura 49. Tensões de von Mises na estrutura da interface.
 Fonte: AUTORA, 2022.

Por meio das Figuras 48 e 49, é possível perceber que a deformação máxima na estrutura da interface foi limitada em 0,11mm e, que o estresse máximo, foi de 51,99MPa. Este valor encontra-se abaixo do limite do aço ASTM A36 (250MPa), tendo um fator de segurança (FOS) de 4,81 nos pontos de concentração de tensão. Sendo assim, a estrutura da interface tende a suportar as cargas propostas após as adequações realizadas.

Os deslocamentos máximos e as distribuições das tensões equivalentes de von Mises para a estrutura do sistema de transporte da planta de alho, estão apresentados nas Figuras 50 e 51, respectivamente.

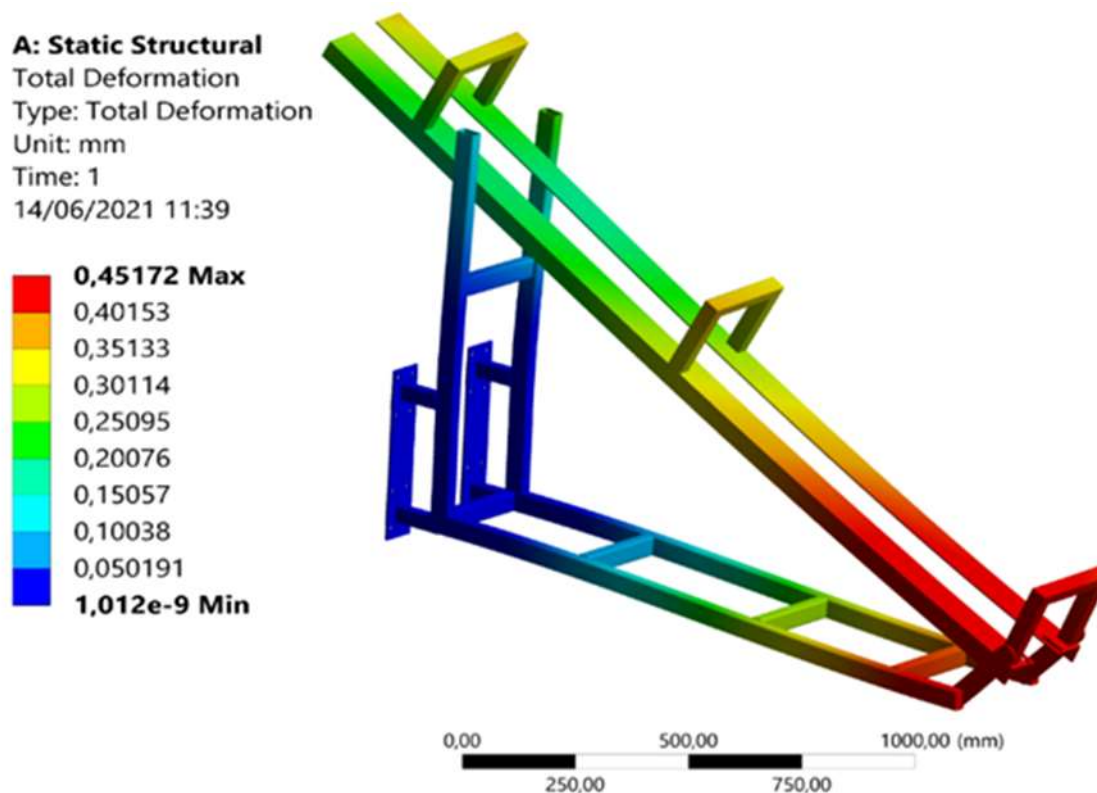


Figura 50. Deslocamento do sistema de transporte da planta de alho.
Fonte: AUTORA, 2022.

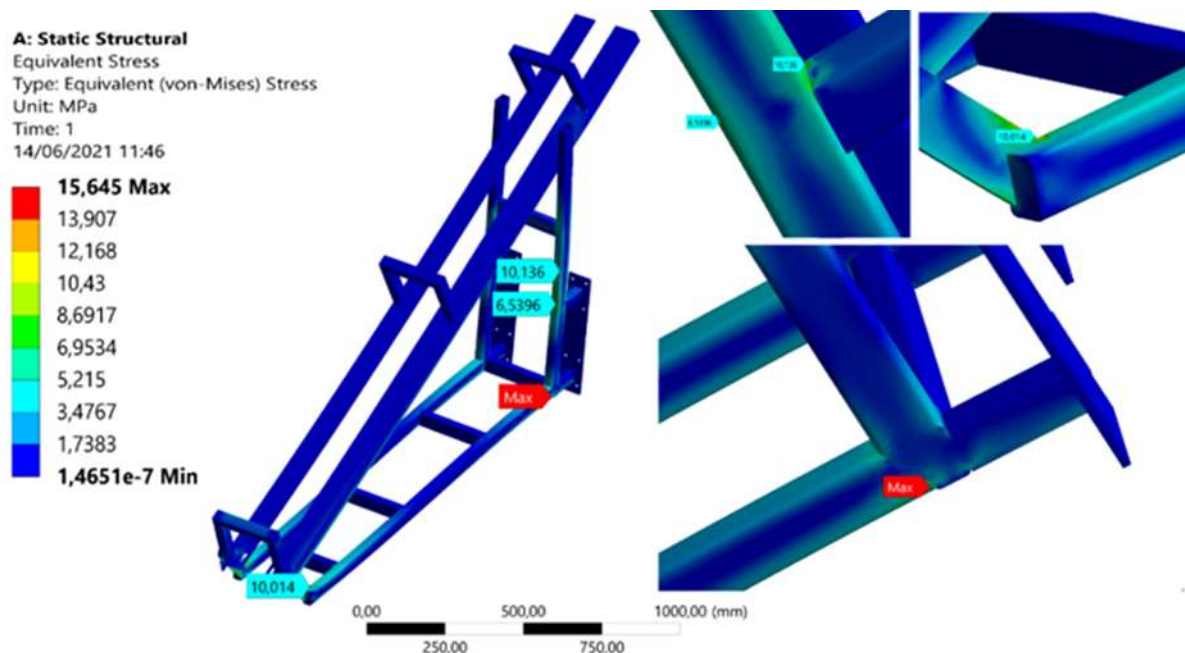


Figura 51. Tensões de von Mises na estrutura do sistema de transporte da planta de alho.
Fonte: AUTORA, 2022.

Nas Figuras 50 e 51 ficou evidente que a deformação máxima da estrutura do sistema de transporte da planta e da estrutura da interface foi limitada em 0,45mm e,

que a tensão máxima foi de 15,64MPa. Este valor encontra-se bem abaixo do limite do aço ASTM A36 (250MPa), apresentando FOS: 15,98 nos pontos de concentração de tensão. Sendo assim, a estrutura do sistema de transporte da planta de alho e a estrutura da interface também tendem a suportar as cargas propostas.

Para o contorno da estrutura os parâmetros na parte posterior do produto, foram os mesmos transmitidos pela base de ligação entre a estrutura de transporte da planta de alho e a estrutura de interface. A eles, foi acrescido o peso do operador (-980 N), peso do saco de alho (-392 N), esteira e componentes (-294 N) e seus pontos de fixação, que são as rodas e a conexão com o trator (Figura 38).

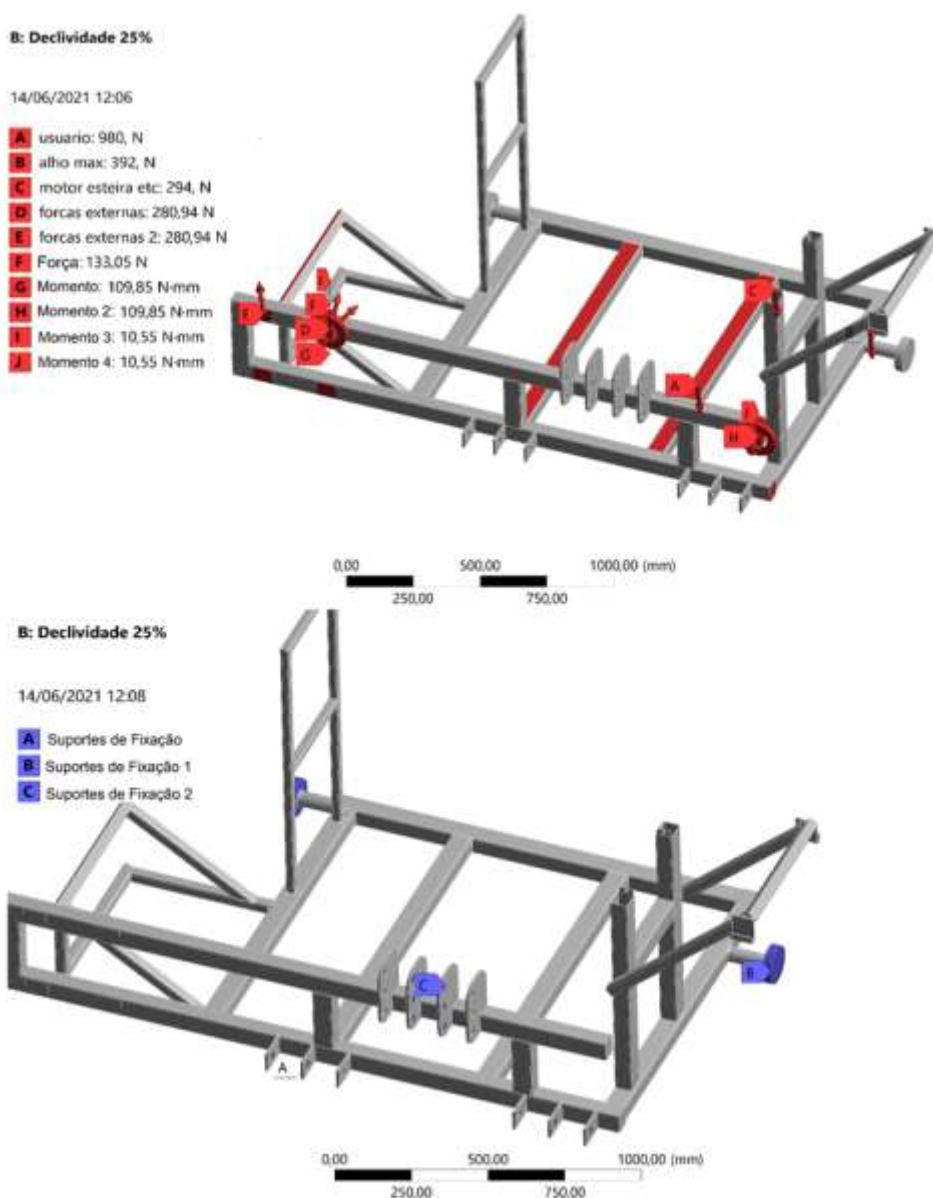


Figura 52. Aplicação dos esforços nos pontos de fixação da estrutura da parte posterior da máquina colhedora de alho.

Fonte: AUTORA, 2021.

Os deslocamentos máximos em 25% e 0% de inclinação estão representados, respectivamente, nas Figuras 53 e 54. A distribuição das tensões equivalentes de von Mises em 25% e 0% de inclinação estão apresentadas nas Figuras 56 e 57, respectivamente.

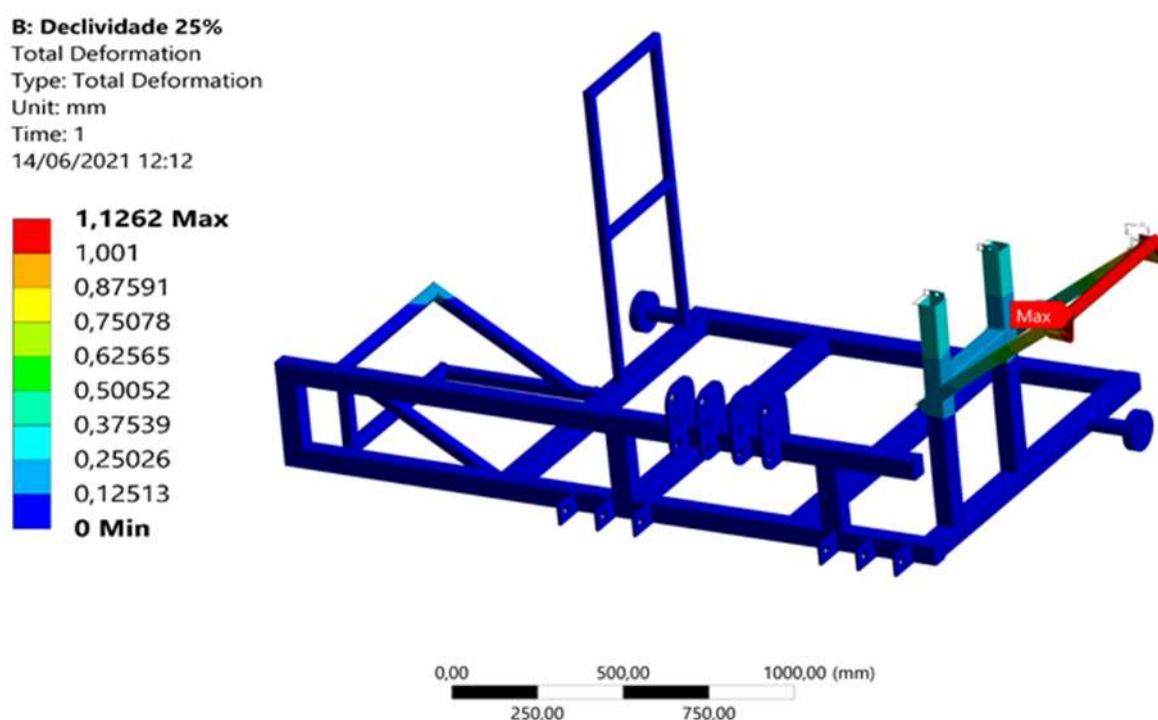


Figura 53. Deformação da estrutura na parte posterior da máquina colhedora de alho, para inclinação de 25%.

Fonte: AUTORA, 2022.

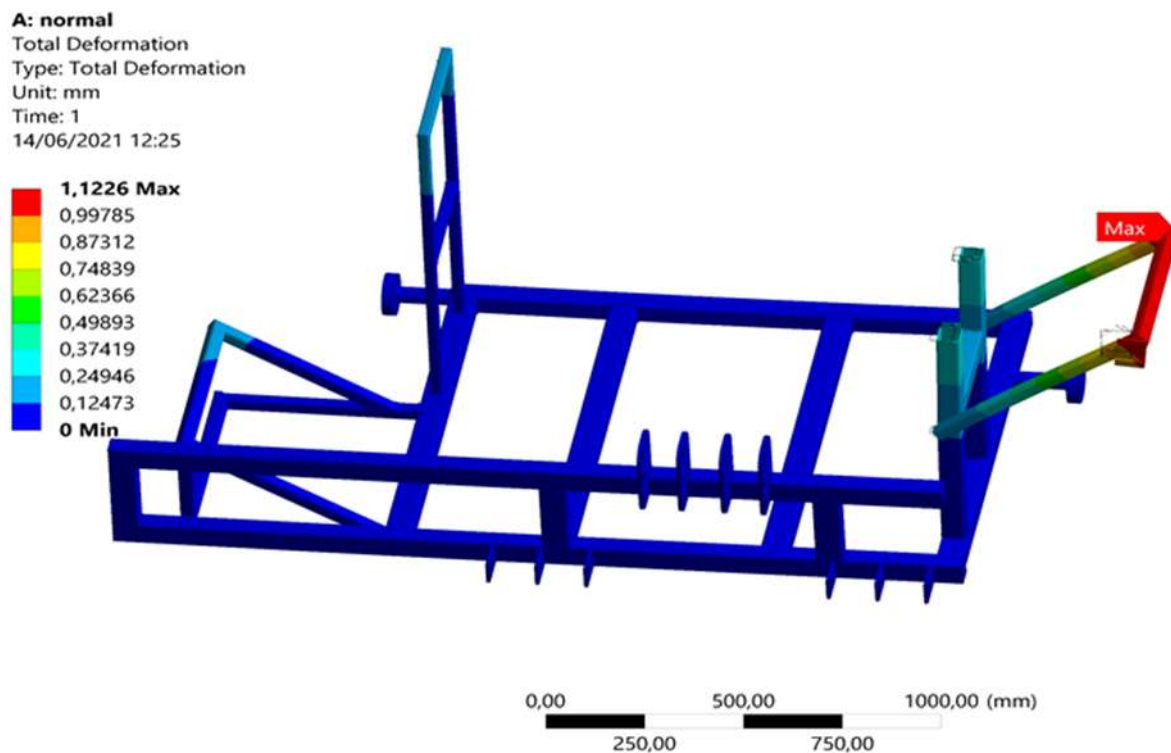


Figura 54. Deformação da estrutura na parte posterior da máquina colhedora de alho, para inclinação de 0%.

Fonte: AUTORA, 2022.

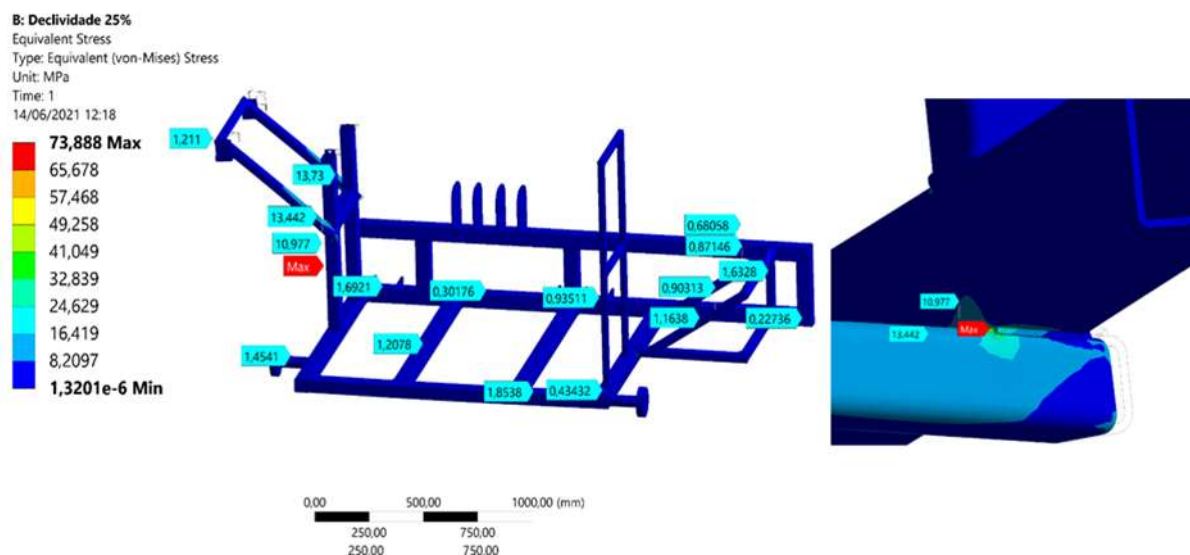


Figura 55. Tensões de von Mises da estrutura na parte posterior da máquina colhedora de alho, com inclinação de 25%.

Fonte: AUTORA, 2022.

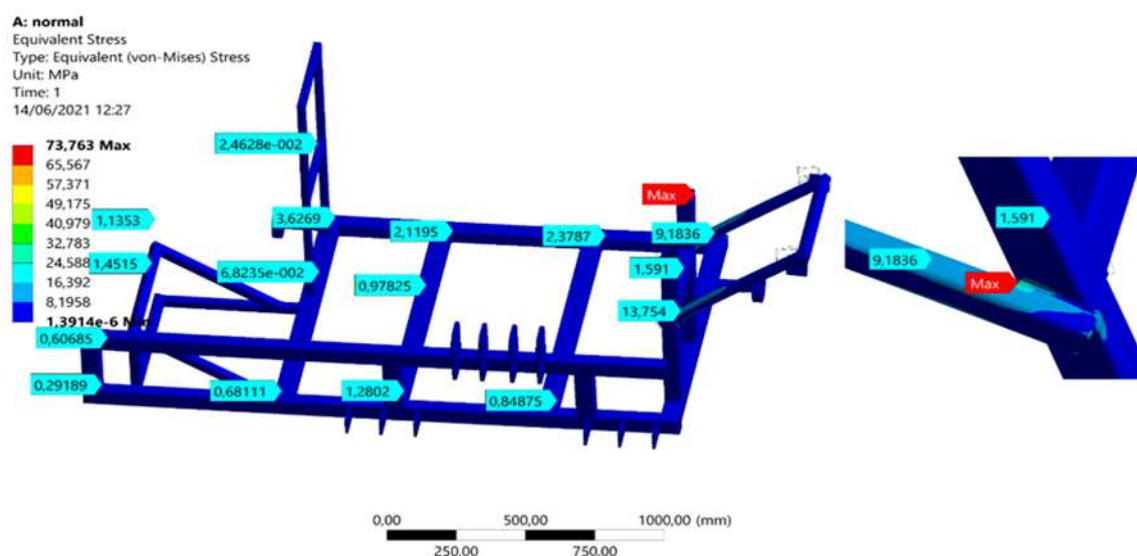


Figura 56. Tensões de von Mises da estrutura na parte posterior da máquina colhedora de alho, com inclinação de 0%.

Fonte: AUTORA, 2022.

Nas Figuras 53, 54, 55 e 56 é possível observar que a deformação máxima na estrutura da parte posterior da colhedora de alho foi limitada em 1,26mm para uma inclinação de 25% e que, o estresse máximo, também foi encontrado na inclinação de 25% no valor de 73,89MPa. Este valor encontra-se abaixo do limite do aço ASTM A36 (250 MPa), tendo um FOS: 3,38 nos pontos de concentração de tensão. Sendo assim, baseado nas simulações numéricas realizadas, a estrutura tende a suportar as cargas propostas.

5.4.1 Análise Modal

A abordagem da dinâmica, sustentação e propriedades mecânicas de uma parte da estrutura de um maquinário foram estudadas por Pegorogo, Gomes e Novak (2018), ampliando a eficácia das operações em máquinas agrícolas. Da mesma forma, foi observado por Silva et al. (2018) no sistema CAE, que os resultados da modelagem numérica obtidos pelo *software Ansys* foram eficazes.

Nas Figuras 57, 58 e 59 estão apresentados os seis primeiros módulos de cada elemento da estrutura.

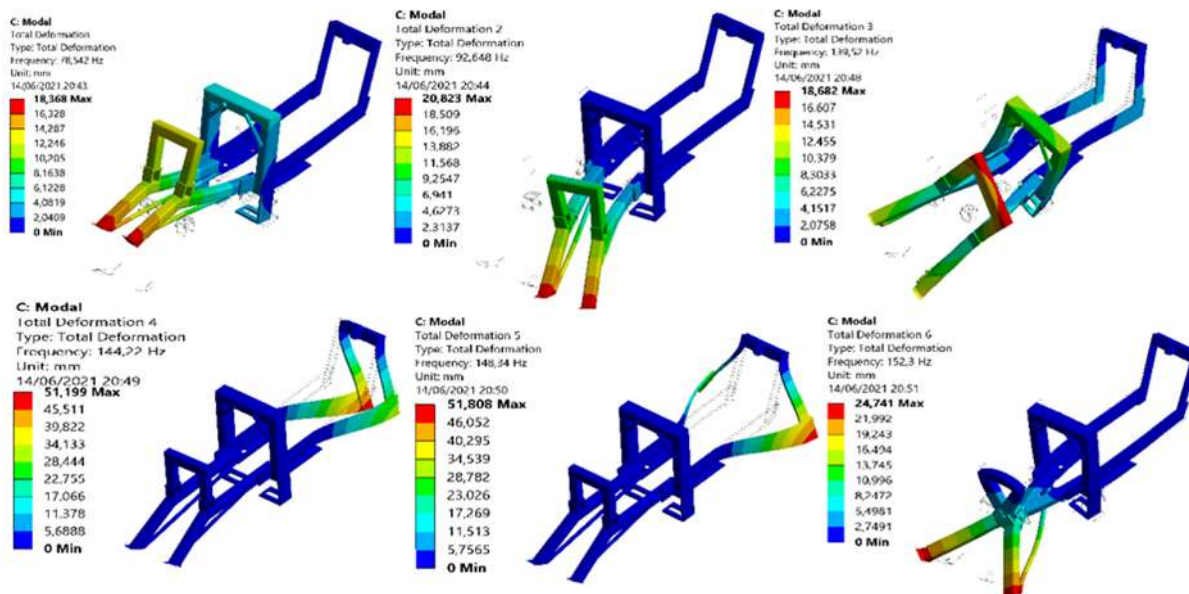


Figura 57. Resultado dos deslocamentos (mm) para simulações modais de corpo fixo na estrutura que suporta a ponteira.
Fonte: AUTORA, 2022.

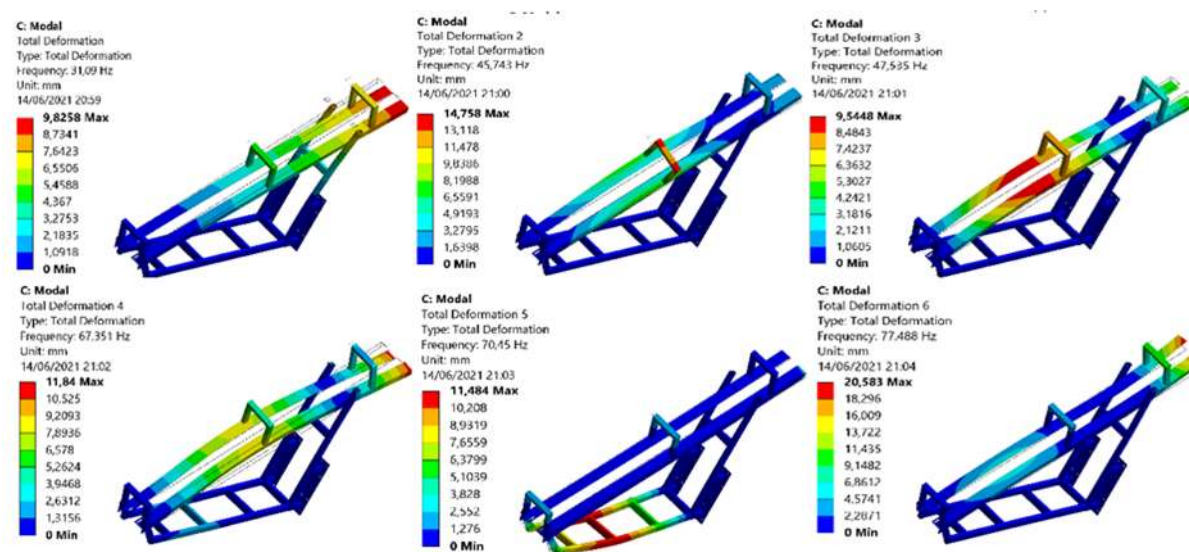


Figura 58. Resultado dos deslocamentos (mm) para simulações modais no sistema de transporte da planta de alho.
Fonte: AUTORA, 2022.

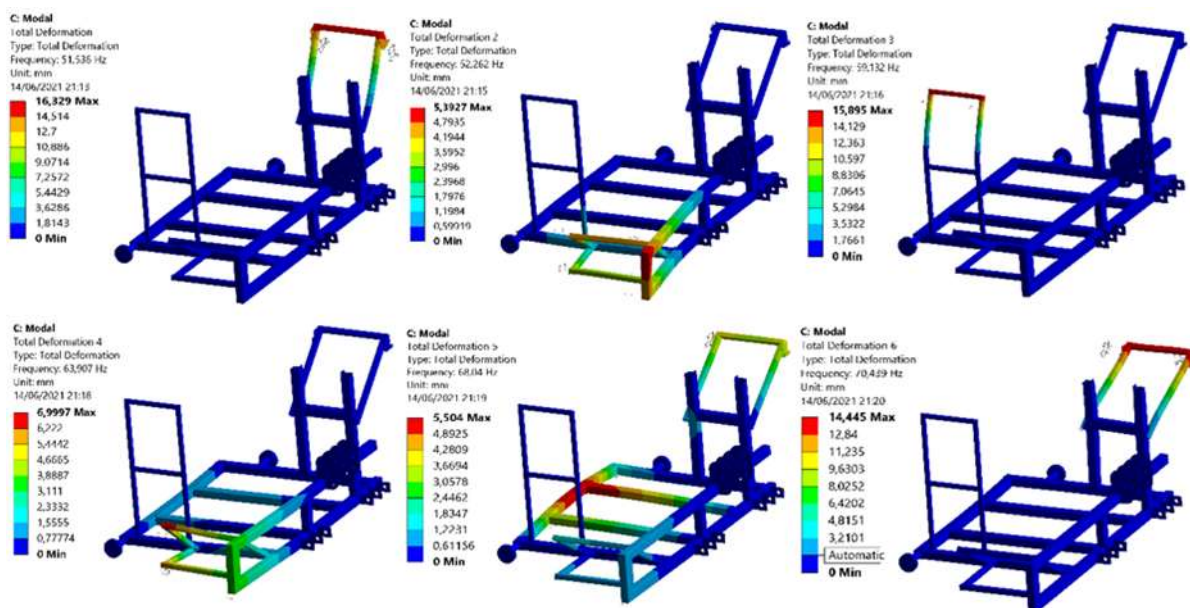


Figura 59. Resultado dos deslocamentos (mm) para simulações modais na estrutura posterior da máquina colhedora de milho.
Fonte: AUTORA, 2022.

Nos Gráficos 3, 4 e 5 estão descritos os resultados das simulações de corpo livre, para os dez primeiros módulos. Os módulos iniciais para análise de corpo livre são tratados como nulos.

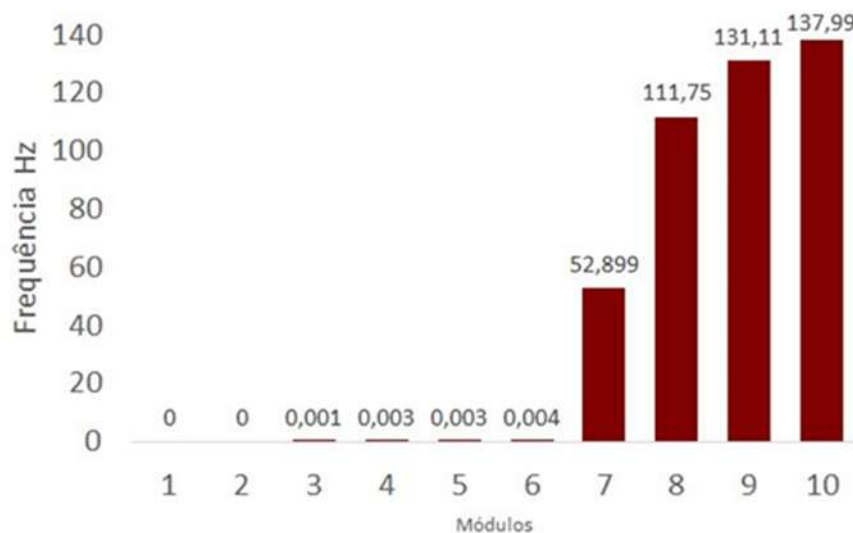


Gráfico 3. Resultado de frequência modal de corpo livre na estrutura da interface.
Fonte: AUTORA, 2022.

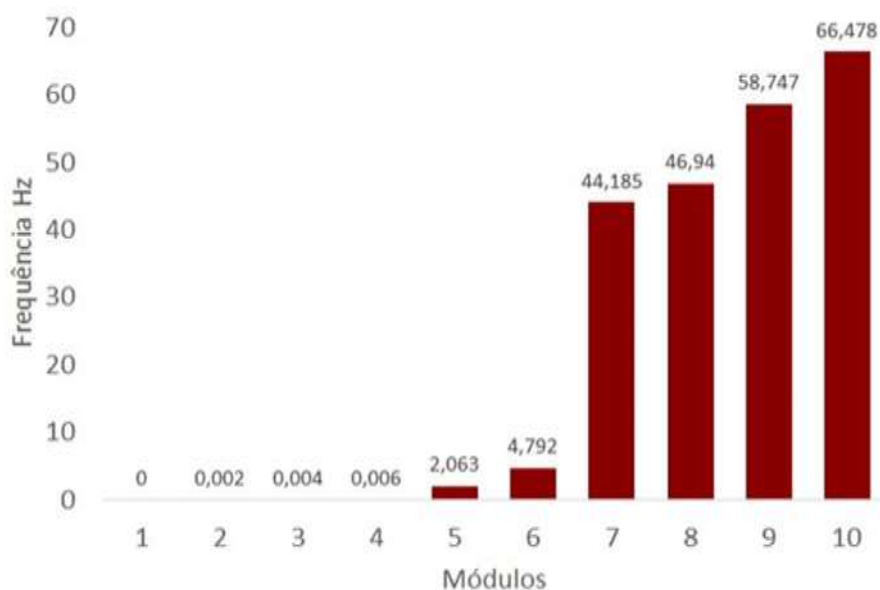


Gráfico 4. Resultado de frequência modal de corpo livre no sistema de transporte.
Fonte: AUTORA, 2022.

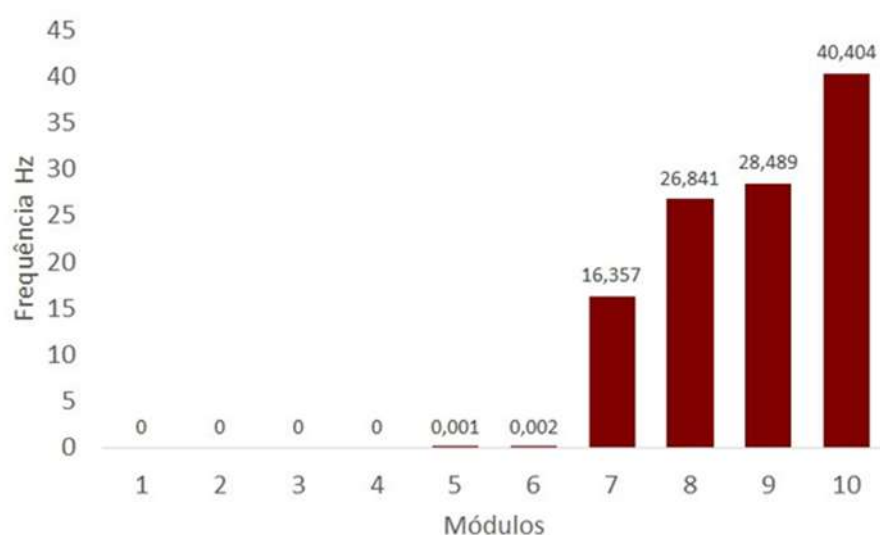


Gráfico 5. Resultado de frequência modal de corpo livre na estrutura posterior da máquina colhedora de alho.
Fonte: AUTORA, 2022.

Feng et al. (2017), Xiaolian et al. (2017), Silva (2018) e Tian et al. (2018), realizaram estudos em um trator agrícola classe II com motor à Diesel de quatro cilindros. Segundo os autores, todos observaram que os deslocamentos tendem a apresentar valores em marcha lenta variando de 30 a 42Hz, em média. Comparando os estudos realizados na análise modal, foi possível observar que os deslocamentos compreendidos na faixa de operação do motor do trator aparecem, apenas, na estrutura de ligação suporte entre estrutura e ponteira. Essa estrutura obteve uma frequência natural de 31,09Hz e deformação máxima de 9,82mm, tornando-se a

principal frequência vibratória a qual se deve controlar. As outras frequências encontram-se acima de 45,74Hz, sendo mais difíceis em sofrer algum tipo de interferência do motor do trator.

Na análise de corpo livre, observou-se que o sistema de transporte apresentou frequências abaixo de 10Hz, o que pode ser influenciado pelos deslocamentos do trator ao excitar o sistema eixo-pneus posteriores. A estrutura posterior da máquina, porém, apresentou uma frequência de 16,35Hz, que se aproxima a de rompimento do solo pelas garras dos pneus e do escarificador que varia entre 11 e 13Hz.

Diversos autores relacionados ao desenvolvimento de máquinas agrícolas para a mecanização da cultura de alho, como: Zhang (2004), Che e Shin (2008), Li (2017), Jiang et al. (2018) e Sun et al. (2018), estudaram o comportamento dinâmico das colhedoras de alho e, concluíram que, foi possível validar o estudo das frequências extraídas das simulações por meio dos testes realizados em laboratório.

5.5 Leiaute final da máquina colhedora de alho

O leiaute final da máquina colhedora de alho para relevos variados possui uma estrutura em formato de “L”, dividida entre: estrutura principal I e estrutura principal II (Figura 60).

Uma das principais funções da máquina é a remoção do solo, fixação, levantamento e transporte da planta de alho. Além disso, o maquinário também conta com um dispositivo de remoção de detritos, corte das folhas e da haste, limpeza do bulbo e ensaque (Figura 60).

Conforme a Figura 60, podemos descrever os componentes presentes no maquinário, sendo: (1) são os servo-motores; (2) é o sistema de válvulas; (3) são as mangueiras de conexão as válvulas do trator, que permitem transmitir a potência. Em seguida temos o transportador (4) que serve para direcionar os bulbos de alho; (5) é a base para o ajudante do operador; (6) é o porta saco; (7) é o pneu traseiro e (8) é o engate ao trator. Seguindo temos (9) a estrutura principal II; (10) é o acople da estrutura ppal. I e estrutura ppal. II; (11) é a estrutura principal I; (12) são os sulcadores; (13) são as guias de direcionamento da planta de alho e (14) o pneu guia. Por fim, (15) é a estrutura de interface; (16) é o sistema de eliminação de detritos e o esticador de correias; (17) é a estrutura do sistema de transporte; (18) é o disco de corte de folhas e da haste e (19) é o dispensador de folhas e haste.

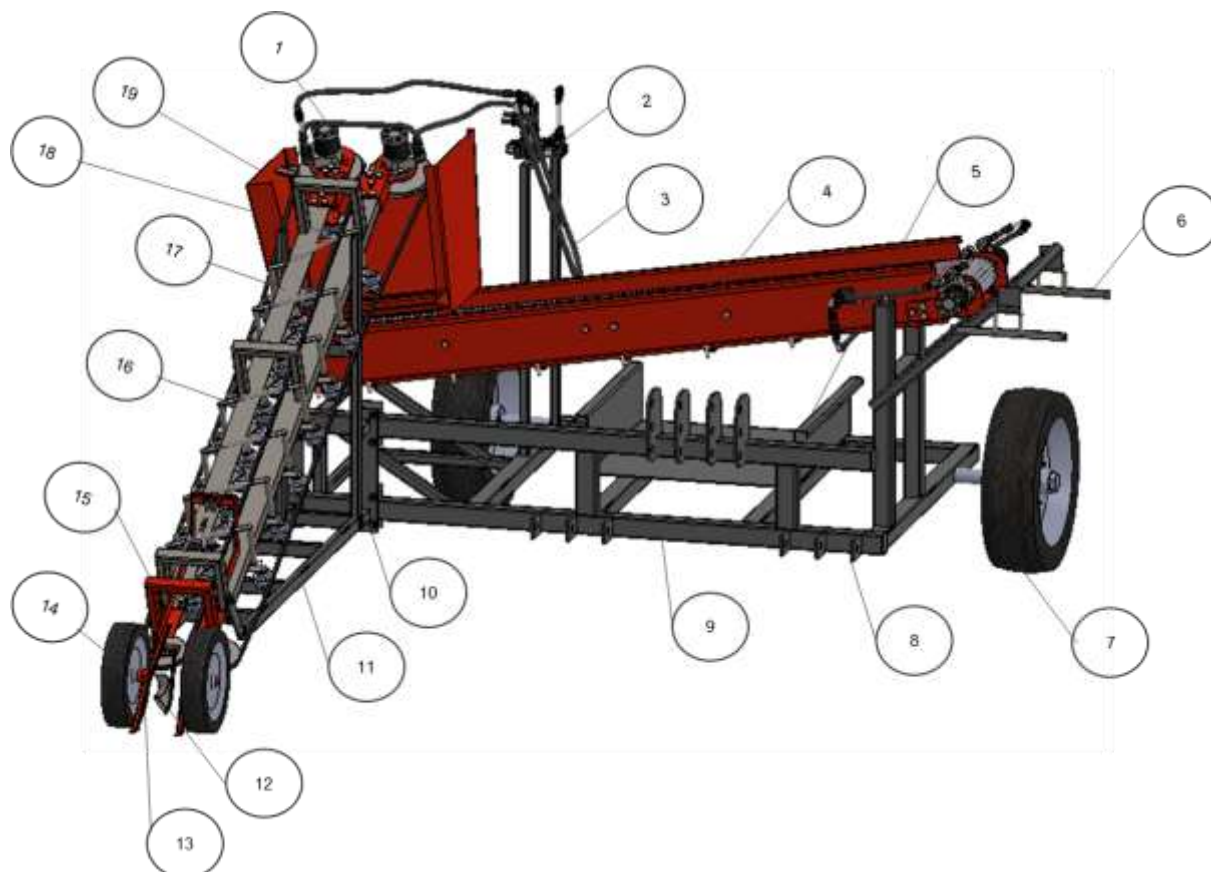


Figura 60. Máquina colhedora de alho para relevos variados.
Fonte: AUTORA, 2022.

A estrutura principal I compõe a interface e o sistema de transporte da planta de alho. Na estrutura da interface é possível observar rodas guia de 8" macias, sulcador com haste curva e sulcador, base para *machifit* reguladora de altura, regulagem mecânica de profundidade e base para polias conduzidas. Os componentes e peças que contemplam o sistema de transporte são: polias, correias lisas em V, rolamentos de nylon tensor RZ5MO, mancal suporte para mola, esticador, base e servomotor ES-D508, direcionador de hastes-folhas e detritos e base para *machifit* reguladora de altura.

Na parte posterior da máquina colhedora de alho (FIGURA 61) encontra-se a estrutura principal II, composta pelos sistemas de: direcionamento dos bulbos de alho, ensaque e engate aos três pontos (com as dimensões exigidas pela ABNT NBR 11001-1). Além destes sistemas, também pode-se observar uma base para o ajudante do operador (com peso máximo de 90kg), rodas 7.00x20x281x10Fx26,5x335MB, protetor 9.00x20, câmara 9.00x20, pneu 9.00x20-14, lonas OK, eixo 1045, roda MB com mancal, rolamento 32218 com caixa de rodado e ponta eixo R2.1/2UN GASPCR-EHD.

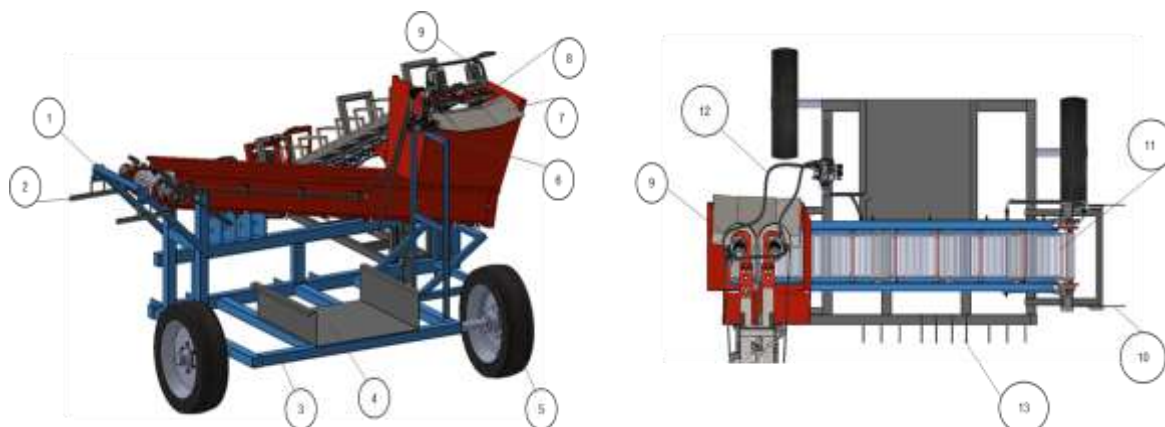


Figura 61. Máquina colhedora de alho para relevos variados.
Fonte: AUTORA, 2022.

Pode-se observar na vista posterior da máquina (Figura 61) os seguintes elementos: (1) suporte de saco para embalagem dos alhos; (2) porta saco; (3) estrutura principal II; (4) base do operador ajudante e (5) pneu traseiro. Também pode-se visualizar que (6) é o suporte de válvulas; (7) o dispensador de folhas e de haste; (8) é a polia motriz; (9) são os servomotores; (10) é sistema de direcionamento dos bulbos; (11) engate de três pontos ao trator e (12) mangueira de alimentação de energia.

O princípio de funcionamento da máquina colhedora de alho se dá por meio do arraste, com um acoplamento de três pontos e um sistema de interface máquina-solo-planta (Figura 62). O funcionamento tem início com duas guias dianteiras para que seja realizado o correto direcionamento da planta de alho. Nesse processo, as folhas são elevadas e a haste é alinhada com as correias tensoras de transporte. Uma vez que, a planta do alho está envolta as correias, os sulcadores removem o solo das laterais da planta proporcionando maior facilidade na extração do alho e no corte de suas raízes.

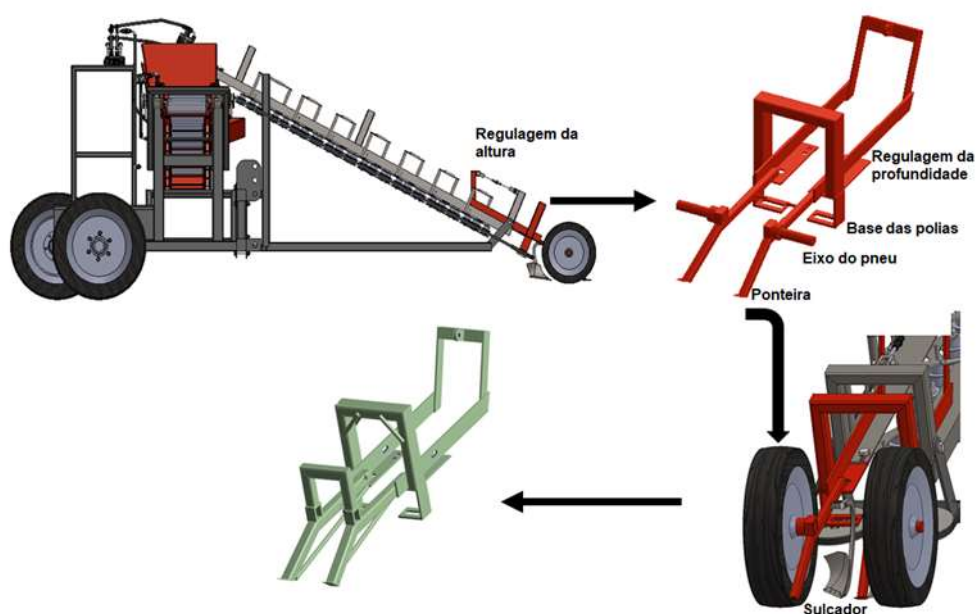


Figura 62. Máquina colhedora de alho com estrutura de interface.
Fonte: AUTORA, 2022.

As correias transportadoras são tensionadas por um esticador em formato isósceles, com vértices em rolamento de nylon, permitindo que parte dos detritos sejam eliminados por um sistema de vibração mecânica. Esses componentes são acionados por dois servomotores alimentados por o sistema de válvulas do trator, permitindo que o disco de corte consiga eliminar a haste da parte foliar do alho, conduzindo o bulbo ao transportador direcionador (Figura 63).



Figura 63. Máquina colhedora de alho com sistema de pressão nas correias.
Fonte: AUTORA, 2022.

Por conseguinte, por meio do estudo da interface solo-sulcador, correia-haste a velocidade de deslocamento é possível obter-se a interface máquina-planta-solo para a remoção de solo e da raiz (Figura 64).

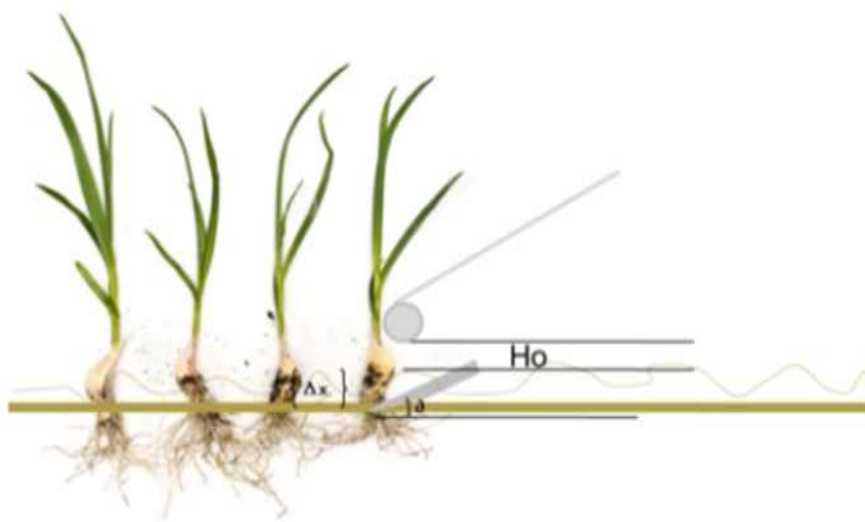


Figura 64. Detalhe do sistema de remoção do solo e arranquio das raízes da planta de alho com o sulcador.

Fonte: AUTORA, 2021.

O transportador direcionador é composto por uma esteira com filamentos sintéticos, que permitem facilidade na limpeza das túnicas superficiais do bulbo de alho, bem como a rotação dos mesmos até o ensaque (Figura 65). Por fim, o sistema de ensaque manual possui capacidade máxima de 40kg, com display LCD 16x2 que permite o monitoramento do peso.

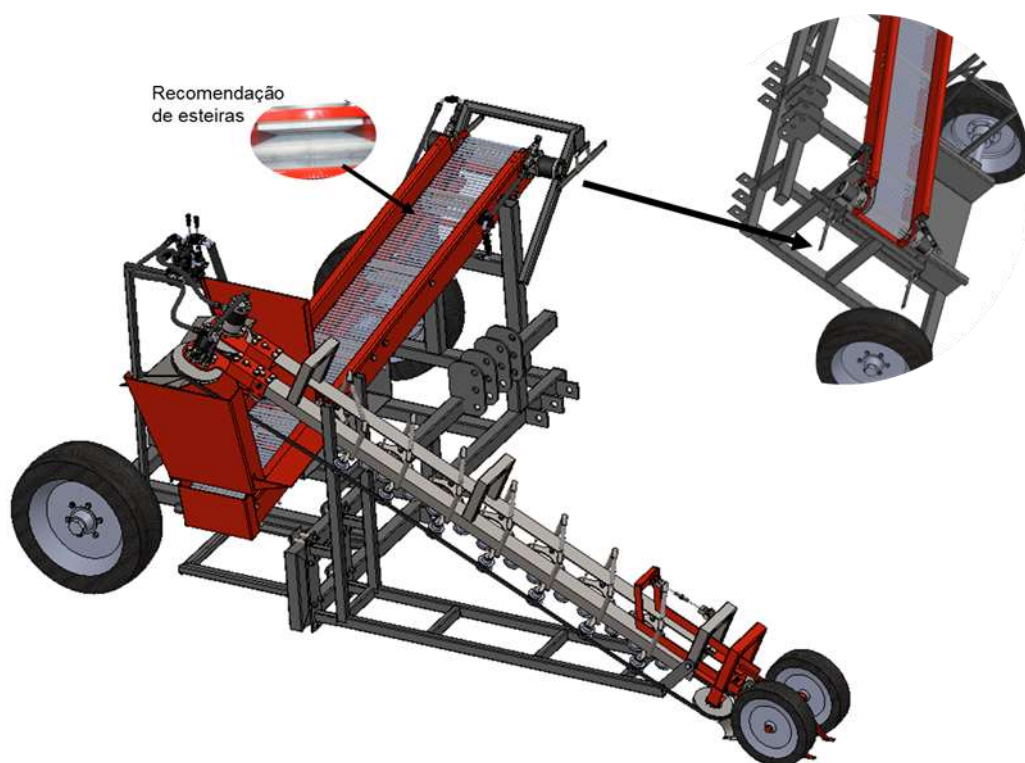


Figura 65. Máquina colhedora de alho com sistema de esteira transportadora e sistema de ensaque.
Fonte: AUTORA, 2022.

6 Conclusão

A pesquisa apresenta relevância para a área agrícola, uma vez que foi possível o dimensionamento estrutural de uma colhedora de alho direcionada a agricultores familiares, para relevos variados e de custo estimado abaixo da média nacional e internacional. Segundo a modelagem, o maquinário é capaz de desfragmentar o solo, arrancar a planta de alho, transportar e limpar os detritos e, para conclusão do ciclo da mecanização, ensacar os bulbos comerciais.

Foi possível, por meio do processo de melhorias implantadas nas geometrias analisadas, reforçar a estrutura da interface do equipamento. Essas melhorias foram essenciais para o desenvolvimento do produto, auxiliando na eliminação de gastos desnecessários e falhas nas peças.

Cabe ressaltar que, por meio das simulações realizadas, foi possível observar que a variação das tensões na estrutura é praticamente igual, tanto para 0% quanto para 25% de inclinação. Também foi possível evidenciar que, a variação na declividade quase não surtiu influência nos resultados do MEF. Entretanto, o suporte de ligação do transportador na simulação modal fixa foi o único elemento com tendências a sofrer influências do motor a 25% de declividade.

É necessário evitar frequências acima de 45,74Hz, para que não ocorram interferências na estrutura da máquina colhedora de alho. Sendo assim, projetou-se a máquina com engate de três pontos, já que este sistema propõe maior elasticidade e folga, que dificilmente irão transmitir energias relevantes do motor ao maquinário proposto.

Na simulação modal de corpo livre o suporte de ligação do transportador apresentou módulos de frequências de 2,06 e 4,79 Hz. Já, a estrutura posterior da máquina apresentou um módulo de frequência de 16,35 Hz, que deverá ser controlado durante a operação do equipamento.

Isto posto, também foi observado que, nas análises computacionais, a ponteira guia sofreu torções e quebras, existindo a possibilidade de ser o principal componente a falhar durante a colheita. Dessa forma, torna-se essencial a realização de maiores análises em físico durante o processo de desenvolvimento desse implemento, a fim de aperfeiçoar a colhedora de alho para uso dos agricultores familiares.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, de forma a complementar e/ou aperfeiçoar o estudo, algumas recomendações podem ser necessárias:

- a) Considerando-se a relevância da interface máquina-solo-planta e do produto desenvolvido, é possível adaptar a máquina colhedora de alho à colheita de outros tipos de hortaliças, desde que sua morfologia constituída por hastes semirrígidas e possua comprimento mínimo de 200mm;
- b) Para a realização de testes com outra colhedora, fixando os parâmetros de ângulo de inclinação do sistema de transporte e ângulo de inclinação da haste da planta de alho; recomenda-se que cada teste apresente repetibilidade e reprodutibilidade superior a cinco vezes, com ângulos 12°, 10°, 5°;
- c) Recomenda-se cuidar as vibrações transversais entre o trator e a máquina colhedora de alho, sendo de elevada importância o desenvolvimento de um tradutor de frequência para a análise prévia das vibrações;
- d) Faz-se necessário adaptar os sistemas de comunicação eletrônica existentes do mercado de baixo ou nenhum valor adicional, para a contagem de plantas de alho arrancadas e bulbos comerciais ensacados (sensores).

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 11001-1**: Tratores e implementos agrícolas de rodas acopladores de engates de três pontos. Parte 1: Acoplador por estrutura ""U"". Ed. 1. 2018. ISBN 978-85-07- 07646-9.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 11001-3**: Tratores e implementos agrícolas de rodas acopladores de engates de três pontos. Parte 3: Acopladores por braço de ligação. Ed. 1. 2018. ISBN 978-85-07-07644-5.

AGRIEXPO. **Maquinários agrícolas**: Colheitadeiras para alho. Disponível em: <https://www.agriexpo.online/pt/fabricante-agricola/colheitadeira-alho-515.html>. Acesso em: 01 jul. 2021.

ALA, Naveen; REDDY, Tedjeep.; BHARADWAJA, Bvvs. Static analysis of truck chassis using different materials. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, p. 326-337, 2016.

ALVES, Lucas Máximo. **Métodos dos Elementos Finitos**. Apostila Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná: Curitiba, 2007.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Código de Soldagem Estrutural – Aço**. AWS D 1.1., 22 ed., 2010.

ANSYS, I. **Ansys Is-dyna user's guide**. Canonsburg: ANSYS, Inc, 2018.

ARAÚJO, Claudiano Sales Jr. **Desenvolvimento de tecnologias adaptadas à mecanização da colheita do alho**. 1993. 182f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

AREND, Lucas. **Sistematização das fases de projeto preliminar e detalhado do desenvolvimento de produtos e sua aplicação no projeto de um multicultor modular**. 2003. 293f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ASHBY, Micheal; JONES, David. **Engineering materials**: An introduction to properties, applications and design. 2. ed. Oxford: Kidlington, 1996.

AVITABILE, Peter. **Modal testing: A practitioner's Guide**. Wiley; 1º Ed. 2017. 544 p. ISBN-Hardback: 9781119222897.

AZEVEDO, Álvaro. **Método dos Elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1ª Ed. Porto: Portugal, 2003.

BACK, Nelson; OGLIARI, Andre; DIAS, Acires; SILVA, Jonny Carlos da. **Projeto integrado de produtos**: planejamento, concepção e modelagem. Barueri: Malone, 2008.

BASTOS, João Pedro. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. Florianópolis: Marcel Dekker, Inc. 2005.

BEER, Ferdinand; JOHNSTON, Russel. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Makton Books, 1995.

BELTRAME, Thiago; SCHMIDT, Alberto. Development of product and innovation: mechanized system for garlic culture (*Allium sativum* L.). **Revista Espacios**, v. 34, n. 6, p. 11, 2013.

BOEIRA, Alexandre; BECK, Daniel. **Tecnologia dos materiais**. Curso Técnico em Mecânica Industrial. Passo Fundo: UEPS, 2007. 97 p.

BRABAZON, Dermont. **Encyclopedia of materials: Composites**. New York: Elsevier, 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura Familiar: Afinal, o que é agricultura familiar?** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/agricultura-familiar-1>. Acesso em: 01 jul. 2021.

BUDYNAS, Richard.; NISBETT, Keith. **Elementos de Máquinas de Shihley**. 10. ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2016.

CASTRO, Richard; LOCH, Marcos; PERUCH, Fabio; HELENA, Julio; SEPÚLVEDA, F. Projeto conceitual da estrutura mecânica para testes do sistema hidráulico do levante de máquinas agrícolas. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 34, 2016.

CELY, Mauricio; SOTOMAYOR, Veronica; MONAR, Willian; Castro, Patricio. Identificación de defectos en soldaduras de acero estructural ASTM A36 mediante ensayos no destructivos según el código AWS D1.1. **Revista Puce**, n. 106, p. 81-109, 2018.

CETINA-QUIÑONES, José; BASSAM, Tayeh; HERNÁNDEZ, Guillermo; HERNÁNDEZ, José; HERNÁNDEZ, Iago; CHÁVEZ, Dalton. Modelación térmica de un colector solar de canal parabólico mediante el método de elementos finitos. **Ingeniería**, v. 21, n. 1, p. 1-12, 2017.

CHEN, Wenlong; SHI, Rongling. **Colheitadeira manual de alho**. Depositante: Escritório Estadual de Propriedade Intelectual da República Popular da China; Instituto de Tecnologia Patente Xuzhou. CIN 206506874 U. Depósito: 12 dez. 2016. Concessão: 22 set. 2017.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 550 p.

CLOUGH, Ray. The Finite Element Method in Plane Stress Analysis. **Proceedings of American Society of Civil Engineers**, v. 23; p. 345-37, 1960.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Análise Mensal do Alho**: Mercado Nacional / Brasil. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e

Abastecimento, 2021. (Boletim Técnico). Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/> >. Acesso em: 01 jun. 2021.

DYM, Clive; LITTE, Patrick. **Introdução à engenharia**: uma abordagem baseada em projeto. 3ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 346 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Como plantar alho?** Ano 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalicas/alho/alho-semente>. Acesso em: 28 nov. 2019.

EWINS, David. **Modal testing**: theory and practice. 1. ed. Somerset: Research Studies Press, 1984.

FENG, Wu; DONGWEI, Wang; RUICHUAN, Li; SHUQUI, Shang. **Projeto e pesquisa experimental de colhedora de alho**. 12 Ed. Escola de Engenharia mecânica e Elétrica, Universidade Agrícola de Qingdao, 2017. Disponível em: <http://www.cnki.net>. Acesso em: 16 de janeiro de 2022.

FERREIRA, Luiz de Gonzaga Jr; SILVA, Fábio Moreira; FERREIRA, Danton Diego; SALES, Ronan Souza. Recommendation for mechanical harvesting of coffee based on vibration behavior settings rods harvesters. **Ciência Rural**, v. 46, p. 273-278, 2016.

FILGUEIRA, Fernando Antônio. **Novo manual de olericultura**: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013.

FILHO, Avelino Alves. **Elementos Finitos**: a base da tecnologia CAE. Brasília: Saraiva, 2012. 320 p.

FORCELLINI, Fernando Antônio. **Projeto Conceitual**. Apostila. NEDIP/UFSC, Florianópolis, 2003.

FRANCISCO, Andrea. Área de cultivo e número de produtores de alho no Brasil. Associação Nacional dos Produtores de Alho (ANAPA). **Nosso Alho**, n. 30, p. 33, 2018.

GHENO, Simoni; SILVA, Rival. Caracterização mecânica e estrutural do aço: aço ASTM A31 classe DH36 em comparação com aço ASTM A36 utilizado para projetos estruturais. **Anais [...]** In: Simpósio de Tecnologia. SITEFA/Fatec, 2015.

HIBBELER, Russel Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HOLZAPFEL, Gerhard. **Nonlinear solid mechanics a continuum approach for engineering**. Chichester: John Wiley and Sons, 2000.

HOU, Jialin; CHEN, Yaniu; LI, Tianhua; WANG, Liyuan; ZHOU, Jianfeng. Development and Test of 4S-6 garlic combine harvester. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v.13, p. 106-114, 2020.

HU, Yamin; HU, Gangpu. **Colhedora de alho**. Depositante: Escritório Estadual de Propriedade Intelectual da República Popular da China; Agência de patentes Jinan Xinda Patent Office Co., Ltd. CN 103999625 A. Depósito: 12 jun. 2014. Concessão: 27 ago. 2014.

HUANG, Ting; KONG, C.W.S; GUO, H.L.; BALDWIN, Andrew. LI, Heng. A virtual prototyping system for simulating construction processes. **Elsevier**, v. 16, n. 5, p. 576-585, 2007.

HUEBNER, Kenneth. **The Finite Element Method for Engineers**. 4ª Ed. New York: John Wiley and Sons, 1976.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017**. Brasil, 2017. Disponível em: https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/index.html. Acesso em: 26 nov. 2019.

JIANG, Tao; ZHANG, Yingying; SUN, Qun; XUEBIN, Cheng. **Colhedora de alho de uma carreira automatiz**. Depositante: Escritório Estadual de Propriedade Intelectual da República Popular da China; Universidade de Patente Liaocheng. CN 207460810 U, 201721558436.8. Depósito: 21 nov. 2017. Concessão: 06 jun. 2018.

JUVINALL, Robert; MARSHEK, Kurt. **Projeto de componentes de máquinas**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 518p.

KIM, Kyu-Bong; LEE, Myung-Hee; KIM, Dae-Cheol; CHO, Yongjin. Finite element analysis approach for the stress of digging part of garlic harvesters. **Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers**, v. 19, n. 11, p. 78-86, 2020.

KNIGHT, Charles. **The Finite Element Method in Mechanical Design**. Boston: PWS-Kent, 1993. 326 p.

LAW, Averill; KELTON, David. **Simulation Modeling and Analysis**. 2ª Ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 795 p.

LI, Shibin. **Colhedora de alho**. Depositante: Escritório Estadual de Propriedade Intelectual da República Popular da China; Desenvolvimento da tecnologia da agricultura e da criação de animais de Xuzhou Longxing, Ltd.; CIN 107258201 A, 201710506448.4. Depósito: 06 jul. 2017. Concessão: 20 out. 2017.

LOUREIRO, Danilo Roberto. **Projeto de um recolhedor de frutos para uma colhedora de café em áreas inclinadas**. 2015. 84f. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2015.

MADENCI, Erdogan; GUVEN, Ibrahim. **The Finite Element Method and Applications in Engineering using ANSYS®**. London/UK: Springer, 2015. 657 p.

MADHU, Prakash; VENUGOPAL, Rick. Static Analysis, Design Modification and Modal Analysis of Structural Chassis Frame. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 4, n. 5, p. 06-10, 2014.

MAGALHÃES, Ricardo; FONTES, Cristiano; MELO, Silvio. Failure analysis and design of a front bumper using finite element method along with durability and rig tests. **International Journal of Vehicle Design**, v. 60, p. 71-83, 2012.

MAHIEUX, Celine. **Environmental degradation of industrial composites**. 1. ed. New York: Elsevier, 2006. 297 p.

MAZETTO, Giovano Marcos. **Desenvolvimento de um sistema modular para mecanização agrícola conservacionista em pequenas propriedades**. 2000. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

MEDEIROS, Fabrício Ardaís. **Desenvolvimento de uma semeadora adubadora para plantio direto com sulcador rotativo acoplado em tratores de rabiças**. 2013. 250f. Tese (Doutorado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Universidade Federal de Pelotas, 2013.

MIALHE, Luiz Gerardo. **Máquinas motoras na agricultura**. 1 Ed. São Paulo: EDUSO, 1980.

MIALHE, Luiz Geraldo. **Máquinas motoras na agricultura**. 2 Ed. São Paulo: EDUSP, 2012.

MION, Renildo L.; BENEZ, Sérgio H. Esforços em ferramentas rompedoras de solo de semeadoras de plantio direto. **Revista Ciências Agrotecnológicas**, v. 32, n. 5, p. 1594-1600, 2008.

MION, Renildo L.; HOLANDA, Aurea; BARROSO, Suelly; SILVA, Samuel. Soil tensions from different pressures caused by farm tractor tires. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 1, 2016.

MOTT, Robert. **Elementos de máquinas em projetos mecânicos**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015. 904 p.

NIEMCZEWSKI, Bóris Kluwe. **Desenvolvimento de chassi de uma semeadora-adubadora de quatro linhas para tratores de baixa potência**. 2012. 88f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

NIEMCZEWSKI, Bóris Kluwe; REIS, Ângelo V. dos; MACHADO, Roberto; MACHADO, Antônio. Validação de um modelo de cálculo por elementos finitos do chassi de uma semeadora de quatro linhas. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 161-170, 2014.

NOH, K. M.; CHANG, Y. G.; PARK, J. G.; YONG, S. H. Development of a walking garlic harvester with pulling mechanism. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 27, p. 513-520, 2002.

NORTON, Robert. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OJEDA, Elka. **Projeto informacional e conceitual de uma colhedora de alho para áreas declivosas**. 2018. 93f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Federal de Pelotas, 2018.

OLDONI, André. **Colhedora – Beneficiadora de cebolas para a agricultura familiar: Projeto informacional e conceitual**. 2012. 110f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Universidade Federal de Pelotas, 2012.

OPEN RESEARCHER AND CONTRIBUTOR ID (ORCID). **Patents, Copyright and Intellectual Property**: Guide about covers patents, what they are, how to find them and how to apply for a patent. 2019. Disponível em: <https://guides.lib.uchicago.edu/c.php?g=297338&p=1984811>. Acesso em: 10 jul. 2021.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHOUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich. **Projeto na engenharia**: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 411p.

PARK, Donghyeok; LEE, Chu Gu; PARK, Hana; BAEK, Seung Hwan; RHEE, Joong Yong. Discrete element method analysis of the impact forces on a garlic bulb by the roller of a garlic harvester. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 44, p. 208-217, 2019.

PATIL, Mukesh; THAKARE, Rohit; BAM, Anyket. Analysis of a Tanker Truck Chassis. **International Journal on Mechanical Engineering and Robotics**, v. 3, n. 3, p. 2321-2347, 2015.

PEGORORO, Maurício; GOMES, Francisco Augusto; NOVAK, Paulo Rogerio. Study of modal analysis based on fluid-structure interaction. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 11, p. 1391-1417, 2018.

PIMENTA, Paulo de Mattos. **Fundamentos da mecânica dos sólidos e das estruturas**. São Paulo: EDUSP, 2006. 388 p.

RAO, Singiresu. **Mechanical vibrations**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.

REIS, Ângelo Vieira dos. **Desenvolvimento de concepções para a dosagem e deposição de precisão para sementes miúdas**. 2003. 277f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

REIS, Ângelo Vieira dos; FORCELLINI, Fernando Antônio. Functional analysis in the evaluation of four concepts of planters. **Ciência Rural**, v.32, n.6, p. 969-975, 2002.

REYES, Efrain. **Aportaciones a la mecanización de la siembra del ajo diseño de una sembradora neumática de precisión**. 2015. 190f. Tese (Doutorado) Universidade Politécnica de Valencia, Espanha, 2015.

RIBEIRO, Fernando. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2004. 93 p.

ROMANO, Leonardo Nabaes. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas**. 2003. 285f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ROMITER GROUP. **Black Garlic Machine**: Ring pull PET Cans. 2019. Disponível em: <https://www.garlicprocess.com/black-garlic-ring-pull-pet-cans/>. Acesso em: 01 jul. 2021.

ROZENFELD, Henrique; FORCELLINI, Fernando Antônio; AMARAL, Daniel; TOLEDO, José Carlos de; SILVA, Sérgio Luis; ALLIPRANDINI, Dário Henrique; SCALICE, Régis. **Gestão de desenvolvimento de produtos**: Uma referência para a melhoria do processo. 5v. São Paulo: Saraiva, 2006. 542p.

SAEED, Moaveni. **Finite Element Analysis**: Theory and Application with ANSYS. New York: Prentice Hall, 2007.

SCHWARTZ, Charles. Effect of Stress-Dependent Base Layer on the Superposition of Flexible Pavement Solutions. **The International Journal of Geomechanics**, v. 2, n. 3, p. 331–352, 2002.

SEGERLIND, Larry. **Applied Finite Element Analysis**. New York: John Wiley and Sons, 1976. 653 p.

SHEN, Qing; GAUSEMEIER, Jurgens; BAUCH, Jochen; RADKOWSKI, Rafael. A cooperative virtual prototyping system for mechatronic solution elements-based assembly. **Advanced Engineering Informatics**, v. 19, n. 2, p. 169-177, 2005.

SILVA, Sameila Carini. **Redução do consumo de Ferro Ligas no processo de elaboração do aço**. 2013. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química), Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

SILVA, Evandro Pereira; SILVA, Fábio Moreira; MAGALHÃES, Ricardo Rodrigues. Application of finite elements method for structural analysis in a coffee harvester. **Engineering**, v.6, p.138-147, 2014.

SILVA, Marcos; PEREIRA, Marinalda; CODARO, Eduardo; ACCIARI, Heloisa. Corrosão do aço-carbono: uma abordagem do cotidiano no ensino de química. **Química Nova**, v. 38, n. 2, p. 293-296, 2015.

SILVA, Evandro Pereira. **Projeto estrutural de uma colhedora de café operando em terrenos declivosos**. 2018. 114 f. Tese (Doutorado em Máquinas Agrícolas), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, 2018.

SILVA, Evandro; SILVA, Fábio; ANDRADE, Ednilton; MAGALHÃES, Ricardo. Structural static and modal frequency simulation in a coffee harvester's chassis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 7, p. 511-515, 2018.

SPAGNOLO, Roger Toscan. **Máquina para o controle de plantas concorrentes**. 2014. 159 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Universidade Federal de Pelotas, 2014.

SUN, Qun, SUI, Yong, ZHAO, Ling; HOU, Jialin; WONG, Chang; YING, Chang; SHANGGUAN, Jinyong. Design and Development of Self-Propelled Garlic Harvester. **Agricultural Research**, v. 7, p. 495–505, 2018(a).

SUN, Qun; SUI, Yongxiang; ZHAO, Ling; HOU, Jialin; WANG, Chong; YING, Chengqiang; SHANGGUAN, Jinyong. Design and development of self-propelled garlic harvester. **National Academy of Agricultural Sciences**, v. 4, p. 495–505, 2018(b).

SZABÓ, Barna; BABUŠKA, Ivo. **Introduction to Finite Element Analysis: formulation, verification and validation**. United Kingdom: Chichester, 2011. 83 p.

TABILE, Rubens; GODOY, Eduardo; PEREIRA, Robson; TANGERINO, Giovana; PORTO, Arthur. Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 130-142, 2011.

TAVARES, Gilmar. **Elementos orgânicos fundamentais de máquinas e implementos agrícolas**. Lavras: UFLA, 2014. 259 p.

TIAN, Zhonglai; ZHAO, Ying; SUI, Yongxiang; HOU, Jialin; SUN, Qun; WANG, Chong; WANG, Zhenyou; ZHAO, Ling. Design and experiment of replant crops separating garlic harvester. **The Open Mechanical Engineering Journal**, v. 12, p. 67-80, 2018.

TURNER, M.; CLOUGH, R.; MARTIN, H.; TOPP, L. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structure. **Journal of the Aeronautical Sciences**, v. 23, n. 9, p. 805-823, 1956.

UGURAL, Ansel. **Mecânica dos materiais**. 1. ed. São Paulo: LTC, 2009. 650 p.

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE (USPTO). **Patents: Patents basics**. Patent life cycle. 2019. Disponível em: <https://www.uspto.gov/patents/basics>. Acesso em: 01 jul. 2021.

VELLOSO, Nara; MAGALHÃES, Ricardo; SANTOS, Fábio; SANTOS, Alexandre. Modal properties of coffee plants via numerical simulation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, [online], 2020.

XIAOLIAN, Lü; ZHICHAO, Hu; XIAORONG, Lu; BAOLIANG, Peng. Design and performance test of the half-fed and self-propelled garlic harvester. **Agricultural Engineering**, v.52, n.2, p. 39-46, 2017.

WANG, Chun; DUONG, Cong. **Bonded joints and repairs to composite airframe structures**. New York: Elsevier, 2015. 295 p.

YU, Yongchang; NIU, Yuanyuan; XU, Mingchen; YU, Xiaowei; AN, Xue; XU, Hongwei; LI, Ning; FENG, Chunyu. **Dispositivo de transferência flexível para colheita de alho pequena**. Depositante: Escritório Estadual de Propriedade

Intelectual da República Popular da China, Universidade Agrícola Patente Henan. CIN 205179773 U. Depósito: 09 dez. 2015. Concessão: 27 abr. 2016.

ZARDO, Claiton Rogério. **Desenvolvimento de um equipamento beneficiamento de bulbos de alho**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

ZARDO, Cleiton Rogério; FAGUNDES, Emílio Ribes; FORCELLINI, Fernando Antônio. Desenvolvimento e teste de um equipamento para beneficiamento de bulbos de alho. **Anais [...]** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, São Pedro (SP), v. 1, 2004.

ZHANG, Yuqing. **Dispositivo de escavação de alho**. Depositante: Escritório Estadual de Propriedade Intelectual da República Popular da China, Agência de patentes Zhang Yuqing. Depósito: 11 abr. 2003. Concessão: 14 jun. 2004.

ZHAO, Xiong; YE, Jun; CHU, Mengyan; DAI, Li; CHEN, Jiannneng. Automatic scallion seedling feeding mechanism with an asymmetrical high-order transmission gear train. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 33, n. 10, 2020.

ZHU, Meizhen; SU, Xiao; HU, Jianfeng; ZHANG, Ruoke. **Colhedora de alho**. Depositante: Escritório Estadual de Propriedade Intelectual da República Popular da China; Indústria e comércio de equipamentos agrícolas Feixian Huayuan, requerente, Ltd; CN 108207270 A; PI 201810301632.X. Depósito: 04 abr. 2018. Concessão: 29 jun. 2018.

Apêndices

APÊNDICE 1 – Análise e avaliação das máquinas no mercado

Características	Marcas										
Marca	ZOCAPI						J. J. BROCH				
Tipo	Atadoras		Cortadoras				Atadoras		Cortadoras		
Modelo/Submodelo	ZF1	ZF2	CZ1	CZ3	CZ4	CZ5	ARAT-1	ARAT-2	ARCO-1	ARCO-2	ARCO-4
N° Filas	1	2	1	3	4	5	1	2	1	2	4
Comprimento (m)	3,2	3,2	3,7	4,2	4,2	4,2	2.6-3	3	4,4	4,4	8,8
Largura (m)	2	2	2,3	1,9	2,2	2,2	2	2	3	2,5	3,5
Altura (m)	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	1.55-2.05	1.55-2.05	2,35	2,35	2,6
Peso (kg)	750	1250	850	2400	2800	3200	680	1210	1280	1570	3400
Velocidade nominal (km/h)	5 a 7	5 a 7	5	5	5	5	Sem dados				
Potência do trator (Hp)	50	70	50	80	90	100	35	60	70	100	100
Distância entre filas (cm)	Sem dados						40	40-50	40-50	45-50	40-50
Largura de trabalho (cm)							55	110	50	100	100
Carga máxima (kg)							Sem dados				
Sistema de enganche	3 pontos	3 pontos	3 pontos	3 pontos	3 pontos	3 pontos	2-3 pontos	2-3 pontos	3 pontos	3 pontos	arrastrada
Sistema de coleta do trator	Sem dados						Sem dados				
Capacidade de trabalho (ha/8h)							2 a 3.2	4	1 a 2	2 a 4	4 a 5
Características	Marcas										
Marca	FEYME			ERME							
Tipo	Atadoras		Cortadoras	Atadoras			Cortadoras				
Modelo/Submodelo	FL-1	FL-2	-	RL1	RL2	RL3	Multi-filas RECL				
N° Filas	1	2	1	1	2	3	2	3	4	5 y 6	Solicitação
Comprimento (m)	2,75	2,75	2,8	3,4	3,4	3,8	7,4	7,4	7,4		
Largura (m)	Sem dados		2	2,1	2	3	3,7	2,4	2,6		
Altura (m)	1,37	1,37	1,6	1,6	2	2	2,7	2,7	2,7		
Peso (kg)	690	1000	800	800	1430	2200	3000	3600	4000		
Velocidade nominal (km/h)	Sem dados			4 a 6	4 a 6	4 a 6	3	3	3		Solicitação
Potência do trator (Hp)	29,58	49,3	39,44	49,3	69,02	69,02	78,88	88,74	98,6		

Distância entre filas (cm)	Sem dados			≥ 35	≥ 45	≥ 45	≥ 45	≥ 45	≥ 45	ção	
Largura de trabalho (cm)				Sem dados			Sem dados				
Carga máxima (kg)				Sem dados			1000	1000	1000		
Sistema de enganche	Sem dados		3 pontos	3 pontos	3 pontos	arrastada	arrastada	arrastada			
Sistema de coleta do trator			lado direito	atrás	atrás	atrás	atrás	atrás			
Capacidade de trabalho (ha/8h)	1,5	4	2 a 3	1	2	3	2,5	2,5	3,5		
Características	Marcas										
Marca	ERME										
Tipo	Cortadoras										
Modelo/Submodelo	RE1	RE2	Multi-filas RES				Multi-filas REP				
			RE2	RE3	RE4	RE5, RE6	RE2	RE3	RE4	RE5, RE6	
N° Filas	1	2	2	3	4	5 y 6	2	3	4	5 y 6	
Comprimento (m)	4,4	4,4	7,4	7,4	7,4	Solicita- ção	7,4	7,4	7,4	Solicita- ção	
Largura (m)	3,2	3,7	3,7	2,4	2,6		3,7	2,4	2,6		
Altura (m)	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7		2,7	2,7	2,7		
Peso (kg)	1300	2000	3000	3600	4000		3000	3600	4000		
Velocidade nominal (km/h)	4 a 6	4 a 6	3	3	3		3	3	3		
Potência do trator (Hp)	69,02	88,74	78,88	88,74	98,6		78,88	88,74	98,6		
Distância entre filas (cm)	≥ 35	≥ 45	≥ 45	≥ 45	≥ 45		≥ 45	≥ 45	≥ 45		
Largura de trabalho (cm)	Sem dados						Sem dados				
Carga máxima (kg)	750	750	750	750	750		750	750	750		
Sistema de enganche	3 pontos	3 pontos	arrastada	arrastada	arrastada		arrastada	arrastada	arrastada		
Sistema de coleta do trator	lado direito	lado direito	atrás	atrás	atrás		atrás	atrás	atrás		
Capacidade de trabalho (ha/8h)	1	2	2,5	2,5	3,5		2,5	2,5	3,5		

APÊNDICE 2 – Lista de patentes relevantes ao desenvolvimento da colhedora de alho

Patentes				
Nome	Link	Autor	Data de publicação	Universidade/ país
Mechanical harvester for harvesting bulb crops	https://patents.google.com/patent/US6484810B1/en	Richard D. Bendix	2002-11-26	
Beet harvester	https://patents.google.com/patent/US2331520A/en			
Garlic harvester	https://patents.google.com/patent/CN1473455A/en	Hitoshi Seki	2008/10/01	
One kind of stem cutting root cutting garlic harvester	https://patents.google.com/patent/CN103563539B/en	Guo Zhidong Guo Chunyao	2016/02/17	Shandong University of Technology / China
Garlic combine harvester	https://patents.google.com/patent/CN103999625A/en	Hu Yanmin Hu Yupu	2014/08/27	
Garlic harvesting device	https://patents.google.com/patent/CN105940849A/en	Zhao Dongjie	2016/09/21	Liaocheng University / China
Rack of garlic harvester	https://patents.google.com/patent/CN103999625A/en	Zhao Dongjie	2016/09/21	Liaocheng University / China
Garlic harvesting machine	https://patents.google.com/patent/CN204482335U/en	Hu Ying Liu Bing	2015/07/22	Industria

APÊNDICE 3 – Orçamentos

ANÁLISE DE PREÇOS UNITÁRIOS

Objeto: Máquina colhedora de alho para geomorfologias variadas

Item (Codificação): Sistema Interface máquina-solo-planta. Estrutura principal I Unidade: Corpo
 PM01-C Quantidade: 1

Rendimento (Und / Dia): 5,5 Tempo Ejec. (DIAS): 15

Descrição: **Estructura Principal do Sistema Interface máquina-solo-planta**

Data: 20/01/2022

MATERIAIS E DESPENSAS

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo Unitário	Total
estrutura Aço Sae 1020 redondo trefilado 7/8"	Pza	1	R\$ 351,90	352,90
estrutura Aço A36 redondo trefilado 7/8"	Pza	1	R\$ 245,90	246,90
estrutura Aço A36 redondo trefilado 7/8", 12mmX690mm	Pza	1	R\$ 285,10	286,10
estrutura Aço A36 redondo trefilado 7/8", 25mmX500mm	Pza	1	R\$ 229,68	230,68
arruela aço baixo carbono, diametro int =12	Pza	50	R\$ 16,83	66,83
arruela aço alto carbono, m12 aba curta, zincada	Pza	50	R\$ 28,43	78,43
lisa	Pza	100	R\$ 32,14	132,14
média zincada	Pza	16	R\$ 31,11	47,11
passivada	Pza	16	R\$ 32,98	48,98
sextavado rosca inteira m12x20	Pza	4	R\$ 45,41	49,41
sextavado rosca inteira m20x25	Pza	4	R\$ 60,52	64,52
cavidade cab sext. m12 1,5 19Mm	Pza	50	R\$ 102,60	152,60
cavidade cab sext. m20	Pza	16	R\$ 102,60	118,60
electrodo E7018 Utp 2,50mm utpperfor 5kg por caixa	SG	3	R\$ 160,69	163,69
eletrodo E6013 2,5mm 5kg brige	SG	1	R\$ 79,99	80,99
discos para cortar aço	Pza	2	R\$ 24,28	26,28
Total Materiais:				2.146,16
Custo Unit. Materiais:				2.146,16

EQUIPOS

Descrição	Quantidade	Aluguel de Equipó	Depreciação em %	Total
-----------	------------	-------------------	------------------	-------

máquina de solda inverte Tiranium T1150 220v	1	R\$ 365,90		365,90
Dx-808 80A solda a ponto por pulso	1	R\$ 158,15		158,15
cortador de aço	1	R\$ 573,90		573,90
Total Equipos:				1.097,95
Preço Unitário Equipos:				199,63

Mão de Obra Pessoal base

Descrição			Quantidade	Nº de Dias	Diária R\$/ Dia	Total
Soldador	Soldador	Soldador	1	8	R\$ 69,17	553,36
Ferreiro	Ferreiro	Ferreiro	2	16	R\$ 49,40	1.580,80
Outros	Outros	Outros	4	16	R\$ 8,00	512,00
Pintor	Pintor	Pintor	1	4	R\$ 10,00	40,00
Total folha de pagamento <i>obrer</i> os:						2.686,16
Prest. Sociais (65%):						1.746,00
Total Pessoal <i>obrero</i> :						4.432,16
Prec. Unit. Passoa <i>obrero</i> :						805,85

Sub-Total Preço Unitário (Materiais + Equipos + <i>Obreros</i>):	3.151,64
Administração 15%:	472,75
Van:	3.624,38
Utilidade 10%:	362,44
Sub-Total Preço Unitário Acumulado:	3.986,82

Mão de Obra Pessoal Profissional

Descrição e Categoria CIV	Quantidade	Dedicação H-H	Taxa R\$/ H-H	Total
Tecnico Especialista	1	16	R\$ 10,00	160,00
Profesional Electromecánico	1	20	R\$ 20,00	400,00
Diseñador de la Maquinaria	1	44	R\$ 40,00	1.760,00
Administrador	1	10	R\$ 20,00	200,00
Total Folha de pagamento Profesionales:				2.520,00
Preço Unitrio Pers. Profissional:				458,18

Preço Unitário Partida: **4.445,00**

ANÁLISE DE PREÇOS UNITÁRIOS

Objeto:

Máquina colhedora de alho para geomorfologias variadas

Item (Codificação):

Sistema Interface máquina-solo-planta. Estrutura da interface

Unidade:

Corpo

PM01-C

Quantidade:

1

Rendimento (Und / Dia):

5,5

Tempo Ejec. (DIAS):

15

Descrição:

Estrutura do sistema de transporte e a estrutura da interface

Data: 20/01/2022

MATERIAIS E DESPENSAS

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo Unitário	Total
estrutura Aço Sae 1020 redondo trefilado 7/8"	Pza	1	R\$ 238,00	238,00
arruela aço baixo carbono, diametro int =12	Pza	50	R\$ 2,93	146,50
arruela aço alto carbono, m12 aba curta, zincada	Pza	50	R\$ 3,49	174,50
lisa	Pza	100	R\$ 3,00	300,00
média zincada	Pza	20	R\$ 2,87	57,40
passivada	Pza	20	R\$ 3,50	70,00
sextavado rosca inteira m12x20	Pza	4	R\$ 45,41	181,64
sextavado rosca inteira m20x25	Pza	4	R\$ 60,52	242,08
cavidade cab sext. m12 1,5 19Mm	Pza	50	R\$ 102,60	5.130,00
cavidade cab sext. m20	Pza	20	R\$ 102,60	2.052,00
electrodo E7018 Utp 2,50mm utpperfor 5kg por caixa	SG	3	R\$ 160,69	482,07
eletrodo E6013 2,5mm 5kg brige	SG	1	R\$ 79,99	79,99
cortador de aço	Pza	1	R\$ 2.739,00	2.739,00
discos para cortar aço	Pza	2	R\$ 24,28	48,56
máquina de solda inverte Tiranium TI150 220v	Pza	1	R\$ 365,90	365,90
Dx-808 80A solda a ponto por pulso	Pza	1	R\$ 1.586,15	1.586,15
Rolamento de nylon tensor para correia em V Kitcom rolamento interno de esfera 625	Pza	42	R\$ 39,50	1.659,00
SKF6004-2RZ	Pza	4	R\$ 63,01	252,04
Servomotor 12n.m 120kgf, Easy servodrive ES-D508, 5metros de RZ5MO de força,	Pza	2	R\$ 3.003,26	6.006,52
Polia condicida	Pza	2	R\$ 300,00	600,00
Polia motriz	Pza	2	R\$ 379,11	758,22
Vorreira em V lisa (metro equivale a 665,60) total de metros 12 (6 e 6)	Pza	2	R\$ 665,60	1.331,20
Polia esticador, polia cabezote, rolete de retorno, três peres de roletes de carga, correia	Pza	1	R\$ 670,00	670,00
Mola elastica	Pza	7	R\$ 158,81	1.111,67

viga aço 1010	Pza	14	R\$ 17,50	245,00
rpm max 15000	Pza	1	R\$ 35,88	35,88
Medida: 4-3/8" x 3/4" – 110 x 20 mm, rpm max 15000	Pza	1	R\$ 21,42	21,42
ultrafino, Dimensões: 110x2x10x20mm - Maximo Rpm: 13800	Pza	1	R\$ 37,89	37,89
SKF 6004 - 2RZ	Pza	4	R\$ 42,79	171,16
mangueira de pressão de retomo válvula	Pza	2	R\$ 90,00	180,00
para base de polias e servomotor lamina de aço carbonada SAE1070	Pza	1	R\$ 55,96	55,96
suporte articulado para machifit regulador de altura	Pza	1	R\$ 56,21	56,21
parafuso de aço inoxidável, porca de aluminio, diâmetro do parafuso m15, espasame	Pza	1	R\$ 253,26	253,26
electrodo E7018 Utp 2,50mm utpperfor 5kg por caixa	Pza	6	R\$ 160,69	964,14
eletrodo E6013 2,5mm 5kg brige	Pza	6	R\$ 79,99	479,94
discos para cortar aço	SG	4	R\$ 24,28	97,12
Total Materiais:				28.880,42
Custo Unit. Materiais:				28.880,42

EQUIPOS

Descrição	Quantidade	Aluguel de Equip	Depreciação em %	Total
cortador de aço	1	R\$ 573,90		573,90
máquina de solda inverte Tiranum TI150 220v	1	R\$ 365,90		24,28
Dx-808 80A solda a ponto por pulso	1	R\$ 158,15		158,15
Total Equipos:				756,33
Preço Unitário Equipos:				137,51

Mão de Obra Pessoal base

Descrição	Quantidade	N° de Dias	Diaria R\$./ Dia	Total
Soldador	1	8	R\$ 69,17	553,36
Ferreiro	2	16	R\$ 49,40	1.580,80
Outros	4	16	R\$ 8,00	512,00
Pintor	1	4	R\$ 10,00	40,00
Total folha de pagamento obreros				2.686,16
Prest. Sociales (65%):				1.746,00
Total Pessoal obrero:				4.432,16
Prec. Unit. Passoal obrero:				805,85
Sub-Total Preço Unitário (Materiais + Equipos + Obreros):				29.823,78
Administração 15%:				4.473,57
Van:				34.297,35
Utilidade 10%:				3.429,73
Sub-Total Preço Unitário Acumulado:				37.727,08

Mão de Obra Pessoal Profissional

Descrição e Categoria CIV	Cantidade	Dedicação H-H	Taxa R\$/ H-H	Total
Técnico Especialista	1	16	R\$ 10,00	160,00
Profesional Electromecânico	1	20	R\$ 20,00	400,00
Diseñador de la Maquinaria	1	44	R\$ 40,00	1.760,00
Administrador	1	10	R\$ 20,00	200,00
Total Folha de pagamento Profissionais:				2.520,00
Preço Unitário Pers. Profissional:				458,18

Preço Unitário Partida:

38.185,27

ANÁLISE DE PREÇOS UNITÁRIOS

Objeto:

Máquina colhedora de alho para geomorfologias variadas

Item (Codificação):

PM01-C

Sistema Interface máquina-solo-planta.
Estrutura da base de ligação entre a estrutura principal I e a estrutura da interface

Unidade:

Corpo

Cantidade:

1

Rendimento (Und / Dia) :

5,5

Tempo Ejec. (DÍAS):

15

Descrição:

Estrutura da interface - estrutura principal I e o sistema de transporte

Data: 20/01/2022

MATERIAIS E DESPENSAS

Descrição		Unidade	Quantidade	Custo Unitário	Total
Cantoneira aço A36	25,40 x 4,76, 0,81	Pza	1	R\$ 161,35	161,35
Viga "U" A36	30 x 30	Pza	1	R\$ 433,98	433,98
Arruela de pressão M: média zincada		Pza	20	R\$ 2,87	57,40
Parafuso m20	sextavado rosca inteira m20x25	Pza	4	R\$ 60,52	242,08
Porca m20	cavidade cab sext. m20	Pza	4	R\$ 102,60	410,40
Base em aço A36	base para sulcador	Pza	2	R\$ 36,09	72,18
Arruela de pressão M: arruela aço baixo carbono, diametro int = 12		Pza	4	R\$ 2,93	11,72
Parafuso m12	sextavado rosca inteira m12x20	Pza	4	R\$ 45,41	181,64
Portca m12	cavidade cab sext. m12 1,5 19Mm	Pza	4	R\$ 102,60	410,40
Sulcador aiveca	Para o haste: comercial haste desarmável	Pza	2	R\$ 1.122,06	2.244,12
Parafuso	parafuso exagonal m14x30	SG	1	R\$ 2,86	2,86
Porca	porca exagonal m14	SG	1	R\$ 36,96	36,96
Arruela	de pressão m14	Pza	1	R\$ 2,06	2,06
Anel espaciador	anel espaciador m14	Pza	2	R\$ 1,52	3,04
Viga "U" A36	30 x 30	Pza	1	R\$ 146,66	146,66
Pneu dianteiros (guias 8"		Pza	2	R\$ 60,00	120,00
Electrodo	electrodo E7018 Utp 2,50mm utpperfor 5kg por caixa	Pza	2	R\$ 160,69	321,38
Eletrodo	eletrodo E6013 2,5mm 5kg brige	Pza	2	R\$ 79,99	159,98
Discos de corte	discos para cortar aço	Pza	3	R\$ 24,28	72,84
Total Materiais:					5.091,05
Custo Unit. Materiais:					5.091,05

EQUIPOS

Descrição	Quantidade	Aluguel de Equipos	Depreciação em %	Total
cortador de aço	1	R\$ 573,90		573,90
máquina de solda inverte Tiranium T1150 220v	1	R\$ 365,90		365,90
Dx-808 80A solda a ponto por pulso	1	R\$ 158,15		158,15
Total Equipos:				1.097,95
Preço Unitário Equipos:				199,63

Mão de Obra Pessoal base

Descrição	Quantidade	Nº de Dias	Diaria R\$./ Dia	Total
Soldador	1	8	R\$ 69,17	553,36
Ferreiro	2	16	R\$ 49,40	1.580,80
Outros	4	16	R\$ 8,00	512,00
Pintor	1	4	R\$ 10,00	40,00
Total folha de pagamento <i>obrerros</i> :				2.686,16
Prest. Sociais (65%):				1.746,00
Total Pessoal <i>obrero</i> :				4.432,16
Prec. Unit. Passoal <i>obrero</i> :				805,85
Sub-Total Preço Unitário (Materiais + Equipos + <i>Obreros</i>):				6.096,53
Administração 15%:				914,48
Van:				7.011,00
Utilidade 10%:				701,10
Sub-Total Preço Unitário Acumulado:				7.712,10

Mão de Obra Pessoal Profissional

Descrição e Categoria CIV	Quantidade	Dedicação H-H	Taxa R\$./ H-H	Total
Tecnico Especialista	1	16	R\$ 10,00	160,00
Profesional Electromecânico	1	20	R\$ 20,00	400,00
Diseñador de la Maquinaria	1	44	R\$ 40,00	1.760,00
Administrador	1	10	R\$ 20,00	200,00
Total Folha de pagamento Profissionais:				2.520,00
Preço Unitrio Pers. Profissional:				458,18

Preço Unitário Partida:**8.170,29**

ANÁLISE DE PREÇOS UNITÁRIOS

Objeto:

Máquina colhedora de alho para geomorfologias variadas

Item (Codificação):

PM01-C

Sistema de limpeza e ensaque dos bulbos de alho

Estrutura principal II

Unidade:

Corpo

Cantidade:

1

Rendimento (Und / Dia) :

5,5

Tempo Ejec. (DIAS):

15

Descrição:

Estructura Principal II de Sistema de limpeza e ensaque dos bulbos de alho

Data: 20/01/2022

MATERIAIS E DESPENSAS

Descrição		Unidade	Quantidade	Custo Unitário	Total
Estrutura em aço	estrutura Aço Sae 1020 redondo trefilado 7/8"	Pza	1	R\$ 351,90	351,90
Estrutura em aço	estrutura Aço A36 redondo trefilado 7/8"	Pza	1	R\$ 245,90	245,9
Estrutura em aço	estrutura Aço A36 redondo trefilado 7/8", 12mmX690mm	Pza	1	R\$ 285,10	285,10
Estrutura em aço	estrutura Aço A36 redondo trefilado 7/8", 25mmX500mm	Pza	1	R\$ 229,68	229,68
Arruela de pressão M12	arruela aço baixo carbono, diametro int =12	Pza	4	R\$ 16,83	67,32
Arruela de pressão M12	arruela aço alto carbono, m12 aba curta, zincada	Pza	50	R\$ 28,43	1.421,50
Arruela de pressão M12	acabamento passivado	Pza	100	R\$ 32,14	3.214,00
Arruela de pressão M20	média zincada	Pza	20	R\$ 31,11	622,20
Arruela de pressão M20	lisa	Pza	100	R\$ 32,98	3.298,00
Parafuso m12	sextavado rosca inteira m12x20	Pza	4	R\$ 45,41	181,64
Parafuso m20	sextavado rosca inteira m20x25	SG	4	R\$ 60,52	242,08
Porca m12	cavidade cab sext. m12 1,5 19Mm	SG	4	R\$ 102,60	410,40
Porca m20	cavidade cab sext. m20	Pza	20	R\$ 102,60	2.052,00
Electrodo	electrodo E7018 Utp 2,50mm utpperfor 5kg por caixa	Pza	3	R\$ 160,69	482,07
Eletrodo	eletrodo E6013 2,5mm 5kg brige	Pza	1	R\$ 79,99	79,99
Discos de corte	discos para cortar aço	Pza	2	R\$ 24,28	48,56
Total Materiais:					13.232,34
Custo Unit. Materiais:					13.232,34

EQUIPOS

Descrição	Quantidade	Aluguel de Equip	Depreciação em %	Total
cortador de aço	1	R\$ 573,90		573,90
máquina de solda inverte Tiranium TI150 220v	1	R\$ 365,90		365,90

Dx-808 80A solda a ponto por pulso	1	R\$ 158,15		158,15
			Total Equipos:	1.097,95
			Preço Unitário Equipos:	199,63

Mão de Obra Pessoal base

Descrição	Quantidade	N° de Dias	Diaria R\$./ Dia	Total
Soldador	1	160	R\$ 69,17	11.067,20
Ferreiro	2	160	R\$ 49,40	15.808,00
Outros	4	160	R\$ 8,00	5.120,00
Pintor	1	8	R\$ 10,00	80,00
Total folha de pagamento <i>obrer</i> os				32.075,20
Prest. Sociais (65%):				20.848,88
Total Pessoal <i>obrero</i> :				52.924,08
Prec. Unit. Passoa <i>obrero</i> :				9.622,56
Sub-Total Preço Unitário (Materiais + Equipos + <i>Obreros</i>):				23.054,53
Administração 15%:				3.458,18
Van:				26.512,71
Utilidade 10%:				2.651,27
Sub-Total Preço Unitário Acumulado:				29.163,98

Mão de Obra Pessoal Profissional

Descrição e Categoria CIV	Quantidade	Dedicação H-H	Taxa R\$./ H-H	Total
Tecnico Especialista	1	16	R\$ 10,00	160,00
Profesional Electromecânico	1	20	R\$ 20,00	400,00
Diseñador de la Maquinaria	1	44	R\$ 40,00	1.760,00
Administrador	1	10	R\$ 20,00	200,00
Total Folha de pagamento Profissionais:				2.520,00
Preço Unitrio Pers. Profissional:				458,18

Preço Unitário Partida: **29.622,16**

ANÁLISE DE PREÇOS UNITÁRIOS

Objeto: Máquina colhedora de alho para geomorfologias variadas

Item (Codificação): Sistema de limpeza e ensaque dos bulbos de alho Unidade: Corpo
 PM01-C Estrutura de direccionamento e limpeza dos bulbos Quantidade: 1

Rendimento (Und / Dia) : 5,5 Tempo Ejec. (DÍAS): 15

Descrição: Estrutura de direccionamento e limpeza dos bulbos de Sistema de limpeza e ensaque dos bulbos de alho

Data: 20/01/2022

MATERIAIS E DESPENSAS

Descrição		Unidade	Quantidade	Custo Unitário	Total
Lâmina	para base de polias e servomotor lamina de aço carbonada SAE	Pza	2	R\$ 55,96	111,92
Kit Correia transportadora	Polia esticador, polia cabezote, rolete de retorno, três peres de r	Pza	1	R\$ 670,00	670
Sensor de peso	célula de carga 50k, para ser adaptada a Arduino Rasberry, pic, r	Pza	1	R\$ 48,78	48,78
Arruela de pressão M12	arruela aço baixo carbono, diametro int =12	Pza	4	R\$ 16,83	67,32
Arruela de pressão M20	lisa	Pza	100	R\$ 32,98	3.298,00
Parafuso m12	sextavado rosca inteira m12x20	Pza	4	R\$ 45,41	181,64
Porca m12	cavidade cab sext. m12 1,5 19Mm	Pza	4	R\$ 102,60	410,40
Pneu traceiros	900 x 20 -14 lonas MB	Pza	2	R\$ 809,18	1.618,36
Eixo	eixo com malcais aço 1045,	Pza	2	R\$ 459,00	918,00
Suporte do saco	balança com contrapeso digital, capacidade máxima de 50kg (c	Pza	1	R\$ 1.970,92	1.970,92
Torneiro	usinagem entre as conexões dos três postos do implemento	SG	1	R\$ 380,00	380,00
Electrodo	electrodo E7018 Utp 2,50mm utpperfor 5kg por caixa	SG	3	R\$ 160,69	482,07
Eletrodo	eletrodo E6013 2,5mm 5kg brige	Pza	1	R\$ 79,99	79,99
Discos de corte	discos para cortar aço	Pza	2	R\$ 24,28	48,56
Total Materiais:					10.285,96
Custo Unit. Materiais:					10.285,96

EQUIPOS

Descrição	Quantidade	Aluguel de Equip	Depreciação em %	Total
cortador de aço	1	R\$ 573,90		573,90
máquina de solda inverte Tiranium TI150 220v	1	R\$ 365,90		365,90

Dx-808 80A solda a ponto por pulso	1	R\$ 158,15		158,15
Total Equipos:				1.097,95
Preço Unitário Equipos:				199,63

Mão de Obra Pessoal base

Descrição	Quantidade	N° de Dias	Diaria R\$./ Dia	Total
Soldador	1	160	R\$ 69,17	11.067,20
Ferreiro	2	160	R\$ 49,40	15.808,00
Outros	4	160	R\$ 8,00	5.120,00
Pintor	1	8	R\$ 10,00	80,00
Total folha de pagamento <i>obrer</i> os				32.075,20
Prest. Sociais (65%):				20.848,88
Total Pessoal <i>obrero</i> :				52.924,08
Prec. Unit. Passoa <i>obrero</i> :				9.622,56
Sub-Total Preço Unitário (Materiais + Equipos + <i>Obre</i> ros):				20.108,15
Administração 15%:				3.016,22
Van:				23.124,37
Utilidade 10%:				2.312,44
Sub-Total Preço Unitário Acumulado:				25.436,81

Mão de Obra Pessoal Profissional

Descrição e Categoria CIV	Cantidade	Dedicação H-H	Taxa R\$./ H-H	Total
Tecnico Especialista	1	16	R\$ 10,00	160,00
Profesional Electromecânico	1	20	R\$ 20,00	400,00
Diseñador de la Maquinaria	1	44	R\$ 40,00	1.760,00
Administrador	1	10	R\$ 20,00	200,00
Total Folha de pagamento Profissionais:				2.520,00
Preço Unitrio Pers. Profissional:				458,18

Preço Unitário Partida: **25.894,99**

ANÁLISE DE PREÇOS UNITÁRIOS

Objeto:

Máquina colhedora de alho para geomorfologias variadas

Item (Codificação):

PM01-C

Montagem de todo o corpo da máquina

Unidade:

Cantidade:

Corpo

1

Rendimento (Und / Dia):

2

Tempo Ejec. i (DIAS)

15

Descrição:

Montagem de todo o corpo da máquina colhedora de alho para geomorfologias variadas

Data: 20/01/2022

MATERIAIS E DESPENSAS

Descrição		Unidade	Quantidade	Custo Unitário	Total
Torneiro	usinagem entre as conexões dos três postos do implemento	SG	1	R\$ 380,00	380,00
Electrodo	electrodo E7018 Utp 2,50mm utpperfor 5kg por caixa	SG	3	R\$ 160,69	482,07
Eletrodo	eletrodo E6013 2,5mm 5kg brige	Pza	1	R\$ 79,99	79,99
Total Materiais:					942,06
Preço Unit. Materiais:					942,06

EQUIPOS

Descrição	Quantidade	Aluguel de Equipo	Depreciação em %	Total
cortador de aço	1	R\$ 573,90		573,90
máquina de solda inverte Tiranium TI150 220v	1	R\$ 365,90		365,90
Dx-808 80A solda a ponto por pulso	1	R\$ 158,15		158,15
Total Materiais:				1.097,95
Custo Unit. Materiais:				548,98

Mão de Obra Pessoal base

Descrição	Quantidade	Nº de Dias	Diaria R\$./ Dia	Total
Soldador	1	8	R\$ 69,17	553,36
Ferreiro	2	8	R\$ 49,40	790,40
Outros	4	8	R\$ 8,00	256,00

Pintor	1	8	R\$ 10,00	80,00
Total folha de pagamento <i>obrer</i> os:				1.679,76
Prest. Sociais (65%):				1.091,84
Total Pessoal <i>obrero</i> :				2.771,60
Prec. Unit. Passoal <i>obrero</i> :				1.385,80

Sub-Total Preço Unitário (Materiais + Equipos + *Obreros*): 2.876,84

Administração 15%: 431,53

Van: 3.308,36

Utilidade 10%: 330,84

Sub-Total Preço Unitário Acumulado: 3.639,20

Mão de Obra Pessoal Profissional

Descrição e Categoria CIV	Quantidade	Dedicação H-H	Taxa R\$./ H-H	Total
Técnico Especialista	1	8	R\$ 10,00	80,00
Profesional Electromecánico	1	8	R\$ 20,00	160,00
Diseñador de la Maquinaria	1	8	R\$ 40,00	320,00
Administrador	1	8	R\$ 20,00	160,00
Total Folha de pagamento Profissionais:				720,00
Preço Unitário Pers. Profissional:				360,00

Preço Unitário Partida: 3.999,20

APÊNDICE 4 – Especificações meta

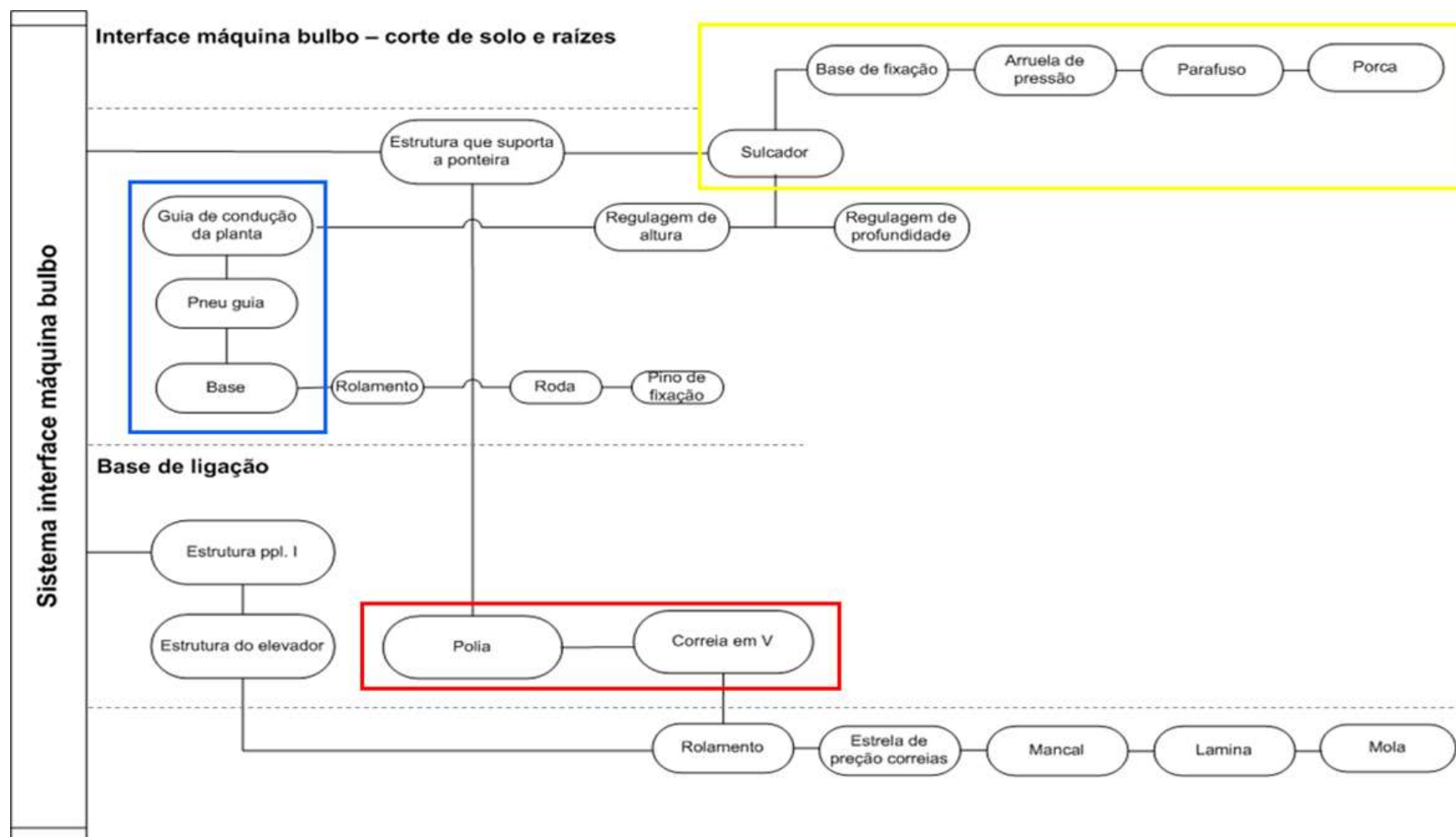
Requisito	Qualidade Assegurada		Nível de Controle		Método de Controle			Ação Corretiva		
	Característica Qualitativa	Valor	Parâmetros	Valor	Responsável	Frequência	Como medir	Registro	Medidas	Responsável
Interface máquina bulbo.	Distância entre máquina e planta.	170 mm.	Ângulo de interface de remoção y transporte.	10 ± 20 mm.	Preparador e Operador de máquina.	Em cada operação	Calibração	Controle de turno.	Ajustar para especificações.	Preparador.
Confiabilidade esperada.	Bulbos. Índice de falha.	95%. 0 falhas em 48h.	Bulbos recolhidos. Incidência de falhas.	95% Cero em 48h.	Projetista, técnico e operador.	Em cada operação	95% de bulbos comerciais. R=MTBF/ (MTBF + MTTR).	24h de colheita. Ordem de trabalho.	Ler manual, verificar ajustes, verificar plano espacial de semeadura. Manutenção e ferramentas. Verificar velocidade máx. e mín. que não comprometam operação da colhedora e segurança do operador	Preparador Técnico e operário.
Velocidade de trabajo.	Mecanismos de acionamento e trator.	≤ 3 Km.h ⁻¹	Velocidade de avance.	1,2 a 0,43 m.s ⁻¹ .	Operador.	A cada ½ hectare.	Medidor de velocidade.	Controle de turno.	Verificar desenho, licitações de materiais, peças e transporte.	Preparador Operador.
Custo de produção.	Comportamento da colheita. Menor número de elementos.	Licitação de provedores Materiais	Quantidade do valor de custo dos materiais, processos e trabalhadores.	≥71.500R\$.	Projetista.	Protótipo.	Custo de materiais e processos. Horas homens.	Controle de pressuposto.	Verificação e ajuste dos pneumáticos	Projetista.
Variação de profundidade.	Sistemas de rodas.	Aprovar o desenho.	Variação de profundidade das rodas	δ: 10°. d: 0,15 m H: 13155 N V: 2407,9 N	Técnico e operador.	Em cada operação.	Bulbos danificados na base.	Ordem de trabalho.	Verificar velocidade máx. e mín. que não comprometam operação da colhedora e segurança do operador.	Técnico e operador.
Número de líneas da colhedora	Sistema de arranque.	≤ 2 líneas.	Plano espacial. Velocidade de trabalho; Estabilidade da máquina.	Unificar a semeadura 1,2 a 0,43 m.s ⁻¹ ; Regularização da área de trabalho.	Agrônomo; Técnico; Operador.	Em cada operação	Bulbos danificados.	Controle de turno.		Preparador Operador.
Altura do centro de gravidade.	Altura da máquina.	1130 mm à 1420 mm.	Cálculo de altura da máquina.	$\gamma = \frac{\beta}{\left[\frac{2 * F}{D} \right]}$	Projetista.	Protótipo.	Dimensão da colhedora	Seguimento do projeto.	Ajuste para especificações.	Projetista.

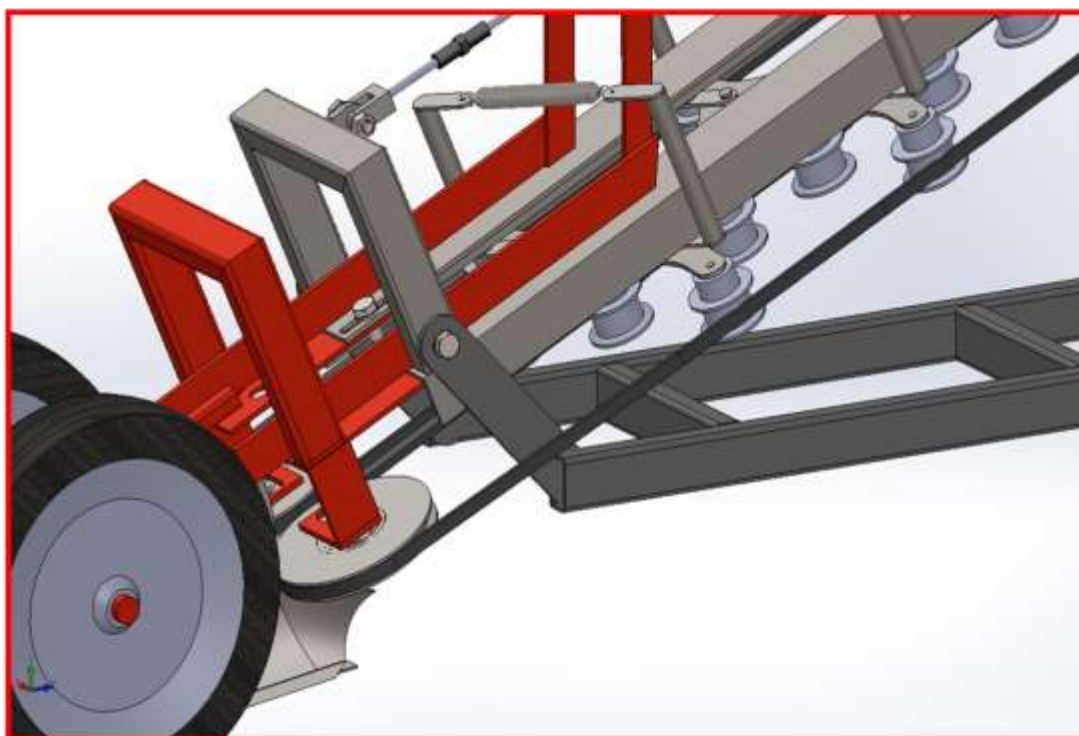
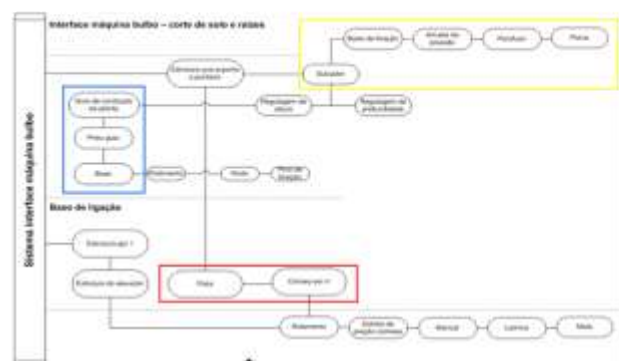
Dimensão da máquina	Largura; Comprimento e Altura.	3500mm; 2600mm e 1200mm.	Largura; Comprimento e Altura.	3500mm; 2600mm e 1200mm.	Projetista.	Em cada operação	$\gamma = \frac{\beta}{\left[\frac{2 * F}{D} \right]}$ Dimensão peso/volume da máquina.	Seguimento ao projeto.	Ajustar para especificações.	Projetista.
Erro máximo de controle.	Controle de nível.	15° a 20°	Ângulo de interface entre máquina e bulbo; Ângulo de corte da ponta; Declividade e irregularidade. Pendente;	10 °; 100 mm; ≤ 25% e ≤ 23%.	Projetista; Agrônomo; Técnico; Operador.	Em cada operação	H0 - Δx=F(δ)	Controle de turno.	Ajustar para especificações.	Técnico e operador.
Local de trabalho da máquina	Linha x entre linha do cultivo homogêneo.	200 mm x 100 mm.	Ângulo de giro do plano espacial de colher	≤ 25%; 90°.	Preparador; Técnico e Operador.	Em cada operação	Dimensionamento do plano espacial do cultivo.	Controle de turno.	Controle do cultivo.	Agrônomo.
Bulbos danificados na colhedora	Bulbos danificados	≤ 5%.	Porcentagem (%) de bulbos danificados.	≤ 5%.	Preparador; Técnico e Operador.	Em cada operação	Verificar Sistema de profundidade da ponta; Verificar Interface máquina -bulbo; Velocidade de trabalho.	Ordem de trabalho.	Ajustar para especificações.	Preparador; Técnico e Operador.
Bulbos retirados do solo	Bulbos comerciais.	≥ 95%.	Porcentagem (%) de bulbos comercial.	≥ 95%.	Preparador; Técnico e Operador.	Em cada operação	Verificar Sistema de profundidade da ponta; Verificar Interface máquina -bulbo; Velocidade de trabalho.	Ordem de trabalho.	Ajustar para especificações.	Preparador; Técnico e Operador.
Acionamento independente das rodas.	Deslizamento das rodas na área de trabalho	Giro de 90° nas rodas	Giro independente das rodas, por controle Ackermann. Sistemas mecânicos; Sistemas de interface máquina-bulbo.	≥ 90°	Projetista.	Protótipo.	Sistema de direção	Seguimento ao projeto.	Ajustar para especificações.	Projetista.
Números de regulagens.	Ajustes simples.	≤ 7.		≤ 7.	Técnico e Operador.	Em cada operação	Porcentagem (%) de bulbos comerciais.	Ordem de trabalho.	Ajustar para especificações.	Técnico e Operador.
Massa do maquinário	Quantidade de matéria.	648kg (máx.)	Sobrecarga do sistema de tração. Massa do elevador. Carga máxima de bulbos ensacados.	25% menor massa total da colhedora. 110kg.	Projetista.	Protótipo.	Dimensão da colhedora	Seguimento ao projeto.	Ajustar para especificações.	Projetista.

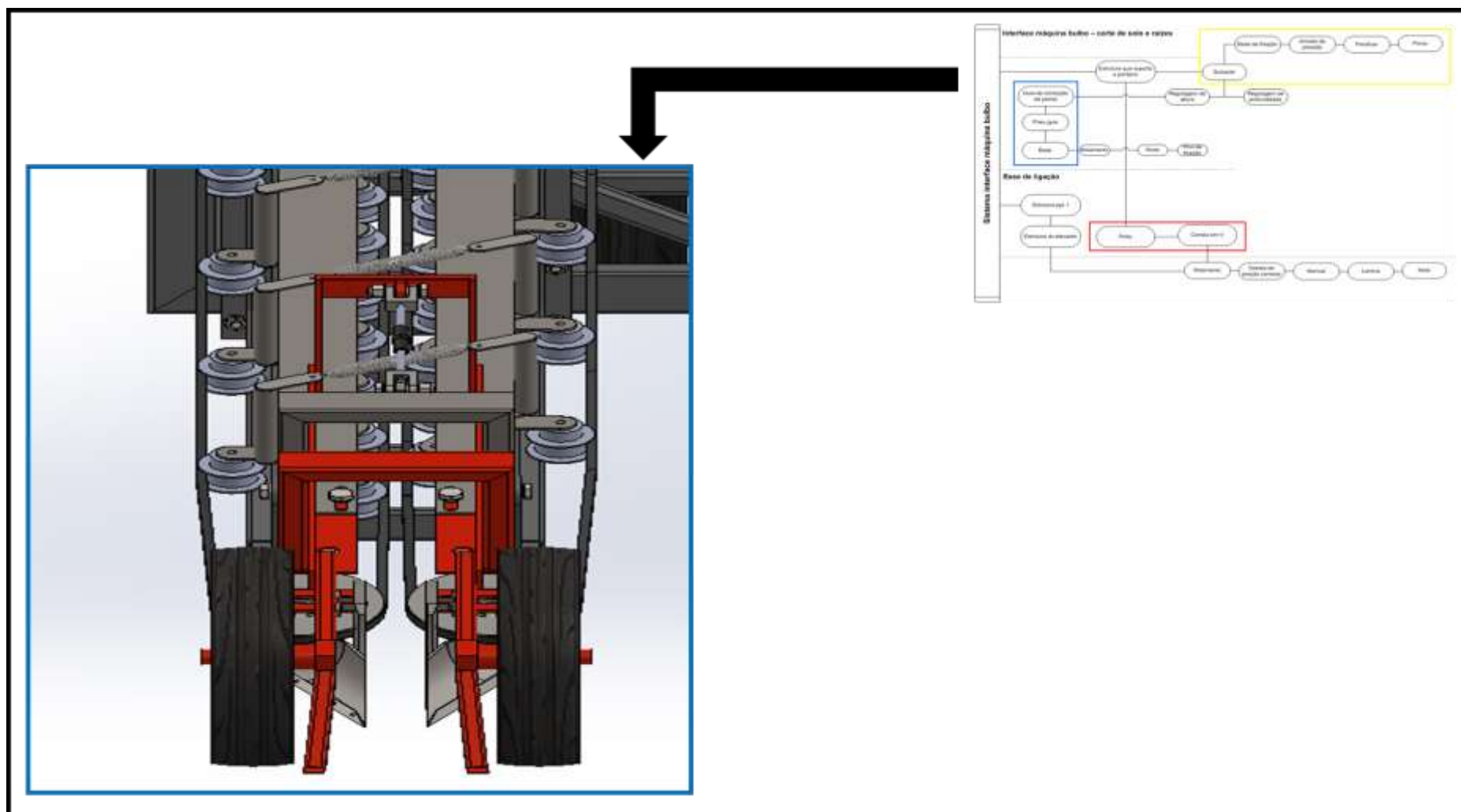
Custo de manutenção.	Pessoal técnico.	49 R\$*h.	Peças de manutenção facilmente removíveis e de fácil obtenção no mercado.	Investigação em fase informacional do projeto.	Projetista.	Protótipo.	Venda e pós-venda de máquinas agrícolas.	Seguimento ao projeto.	Ajustar para especificações.	Projetista.
Vida útil da máquina colhedora.	Sistema de arranque e transporte.	5 anos.	Dimensionamento da colhedora	Ancho, largo, altura y C.G.	Projetista.	Em cada operação.	Verificação do dimensionamento.	Seguimento ao projeto.	Ajustar para especificações.	Projetista.
Materiais normalizados.	ASTM acero 1020.	Resistencia de 35 a 45 kg.mm-2.	Rendimento e funcionamento.	≥80%.	Projetista.	Protótipo.	Matéria prima e processo de produção.	Garantia de compra do material	Manutenção.	Técnico e operador.
Raízes do bulbo cortadas.	Bulbos comerciais.	95% bulbos colhidos.	Ângulo de corte da ponta. Ângulo de interface de remoção e transporte.	≤120mm, 100mm.	Técnico e Operador.	Em cada operação.	Porcentagem (%) de bulbos danificados.	Controle de turno.	Ajustar para especificações.	Técnico e operador.
Tamanho da haste do bulbo.	Quantidade de hastes retiradas.	≥90%.	Plano espacial de semear. Regulagem da máquina. Comprimento da haste.	Normalizada. Especificações. Bulbos comerciais.	Agrônomo. Técnico. Operador.	Em cada operação.	Número de alhos colhidos/Números de alhos danificados.	Controle de turno.	Ângulo de rotação da colhedora no plano espacial del cultivo em 90%.	Agrônomo; Técnico e operador.
Bulbos ensacados.	Bulbos comerciais.	95% bulbos colhidos.	Plano espacial de sementeira Ângulo de remoção e transporte.	≤120mm, 100mm.	Técnico e Operador.	Em cada operação.	Porcentagem (%) de bulbos danificados.	Controle de turno.	Ajustar para especificações.	Técnico e operador.

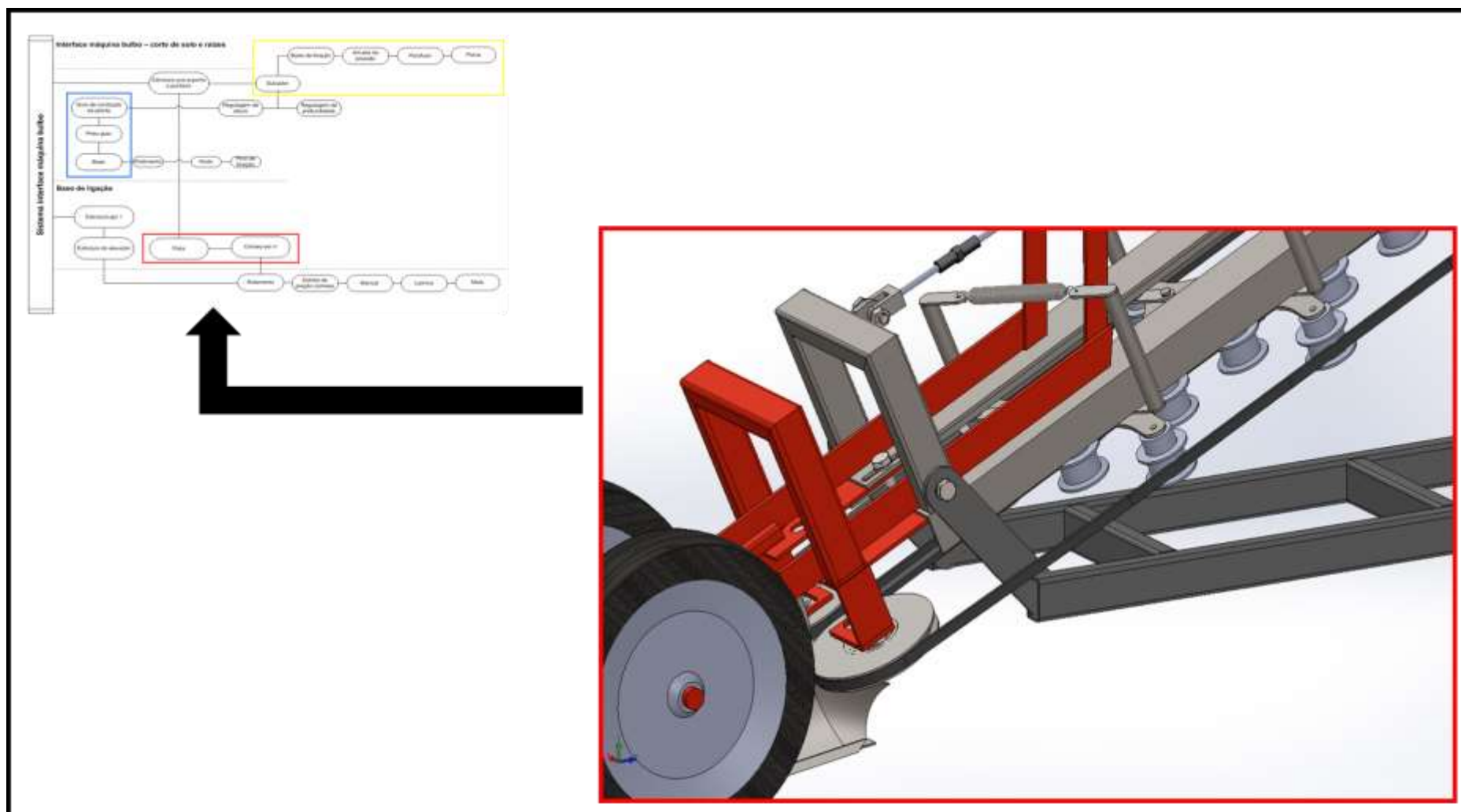
NOTA: R: confiabilidade; MTBF: tempo médio entre falhas; MTTR: tempo médio para reparação; γ: altura; β: distância dos neumáticos ao centro do eixo principal; F: fator de segurança; D: porcentagem de densidade; H0: valor mínimo em relação ao ângulo de corte da ponta; - Δx: distância real entre a ponta e a base do alho; F(δ): movimento do solo por penetração da ponta; δ: ângulo de penetração da ponta; d: nível da ponta com o solo; fh: força horizontal; fv: força vertical.





APÊNDICE 5 – Sistema interface máquina-bulbo e SSc





















Sistema	Subsistema/Função auxiliar	Qualidade	Material/Especificações
1. Interface 		2	Pneu guia 8", com barra e fixação por parafuso, bucha rolamento SKF 6004-2RZ.
		1	Machifit comercial.
		1	Estrutura principal I em aço A36, viga em U.
		1	Base do regulagem de altura, em A36 200mmxR25mm.

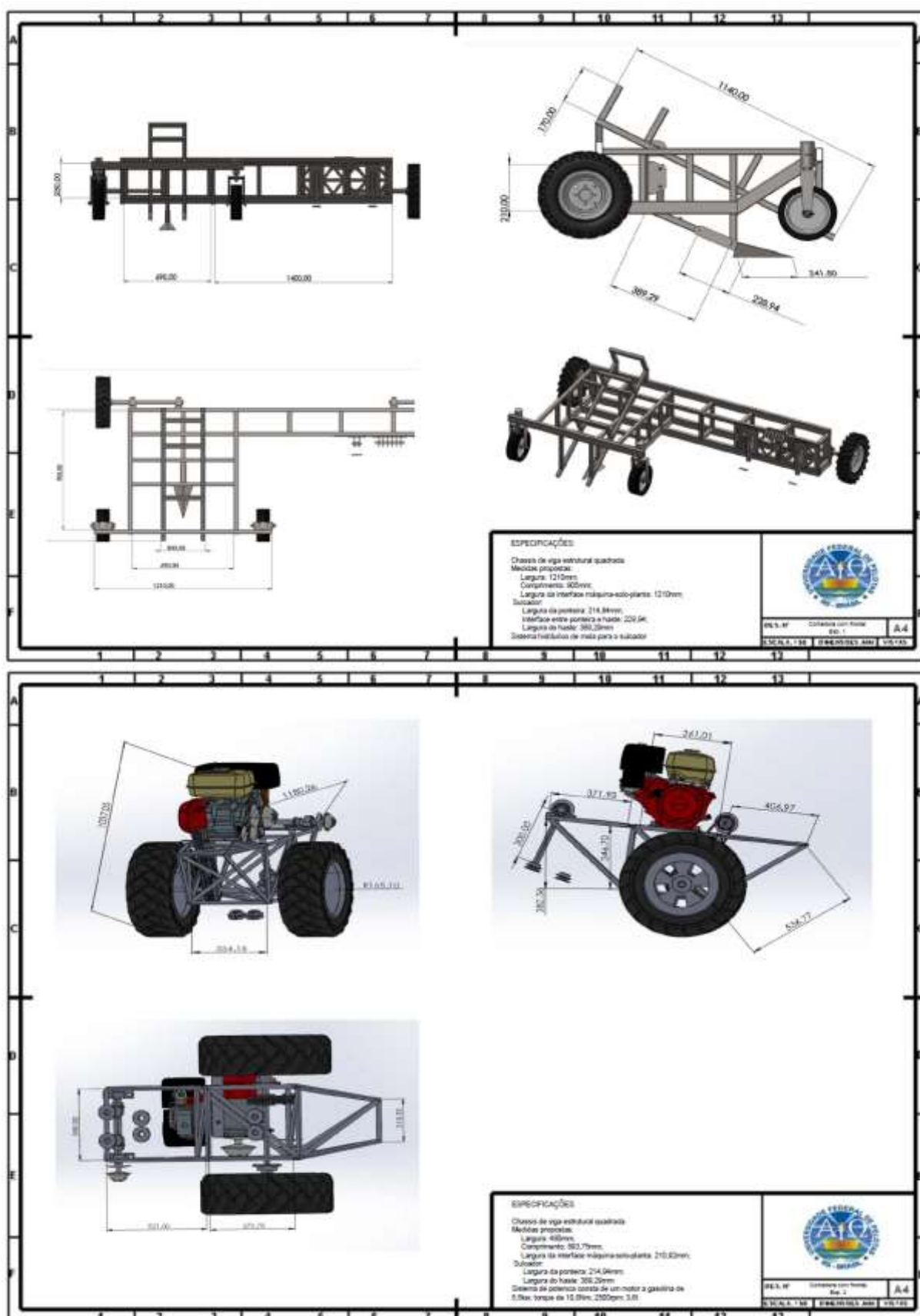
			
		2	Sulcador comercial tipo avisa com haste curvo regulável.
		14	Engate interno da mola, em nylon.
		14	Rolamento vertical e base do esticador e molas, em nylon.
		14	União interna entre mola e barra do esticador., em alumínio.
		7	Esticador em alumínio com barra redonda., parafusos sextavados 12m, arruela lisa 12mm, porcas de pressão 12m, chapa de suporte.
		21	Rodamento 10x56x23, com rolamento interno RZ5MO.

		1	Estrutura do transportador em aço A36, 2300x71,44mm viga em L, dois reforços aço 1045 e um em xxx com geometria de 228,60x210,65mm, orifício de 50mmxR50,36, rolamento vertical de 155mm.
2. Estruturas principais 		1	Viga em U Aço A36, fixada na estrutura II com quatro lâminas em aço 1020 por aperto com parafusos 20mmx120mm, arruela aço baixo carbono de pressão e porca 20mm, o restante da estrutura e com solda doble com eletrodo E7018 Utp 2,50mm e E6013 de 2,5mm.
		1	Viga em U Aço A36, fixada na estrutura II com quatro lâminas em aço 1020 por aperto com parafusos 20mmx120mm, arruela aço baixo carbono de pressão e porca 20mm, o restante da estrutura e com solda doble com eletrodo E7018 Utp 2,50mm e E6013 de 2,5mm. Aço Sae 1020 redondo trefilado 7/8" e aço A36 redondo trefilado de 7/8" 12mm e 25mm. Para o suporte do sistema de válvulas e sistema de suporte de saco de embalagem. Sensor de peso célula de carga 50Kg, para ser adaptada a Arduino Raspberry, pic, módulo conversor Hx711 para sensor de peso de 24 bits

		1	Suporte para ajudante, chapa antiderrapante em alumínio.
		2	Pneus terceiros 900x20 – 14 lonas MB
		2	Peça compacta no mercado: Ponta eixo R2.1/2UN GASPCR-EHD, Plange menor seccionada cubo roda, caixa rodada com parafuso, rolamento 32218, arruela lisa 64x110x9,50mm, porca flangeada R.2.1/2 Um, contrapino 1/4x4 1G13112 AS, junta cortica CR4F CAR, retentor 03110-Bg sabo traseira AR22 1G25356, parafuso SX mas, 8 m10x1,5ZA DI.
		2	Servomotor 12n.m 120Kgf, Easy servodrive ES-D508, 5metros de RZ5MO de força, tubo de resguardá de cabo cableg-bm5mo. Base em aço A36 ES-D%08 com cinco p/b parafuso 12mmx 40mm, arruela baixo carbono e turca 12mmx1,5mmx120mm. Base de aço carbono SAE 1070 p/Servomotor.
		4	Lâminas em A36 80x150mm 1/4" para acople entre estrutura ppal. I e II. Com parafusos de 120mm, porcas e arruelas de pressão.
			Peças para engate de três pontos adaptável a bitola do trator segundo as dimensões conforme

		10	as Normas ABNT NBR ISO 11001-3 e 730 em aço 1020
		1	Válvula redutora de pressão P25 de 2", rosca BSP, ISO228/1.
		2	Motor Parquer 200rpm para transportador direccionador dos bulbos para a embalagem.
		2	Suporte para motor em A36.
		1	Protetor de esteira comercial.
		1	Esteira transportadora com filamentos sintéticos, para a limpeza final dos bulbos retirando as primeiras túnicas, capacidade 40kg, com display LCD 16x2 para o monitoramento do peso.
		7	Rolamento para tensão e circulação da esteira.

APÊNDICE 6 – Planos das duas propostas na reavaliação de Ojeda (2018)



APÊNDICE 7 – Planos da máquina colhedora de alho para relevos variados

