

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ÍTALO FELIPE LIRA DE MORAIS**

**CONCEPÇÃO DE SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO PARA PROTÓTIPO DE  
MÁQUINA DE QUEBRAR ENDOCARPO DE BARU**

**GOIÂNIA  
2025**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): **Ítalo Felipe Lira de Moraes**

Título do trabalho: **Concepção de sistema de alimentação para protótipo de máquina de quebrar endocarpo de baru**

### 2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [ ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

#### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

**Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Sigeo Kitatani Junior, Professor do Magistério Superior**, em 10/07/2025, às 13:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Italo Felipe Lira De Moraes, Discente**, em 10/07/2025, às 13:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5496140** e o código CRC **9B6910CA**.

---

Referência: Processo nº 23070.015825/2025-67

SEI nº 5496140

**ÍTALO FELIPE LIRA DE MORAIS**

**CONCEPÇÃO DE SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO PARA PROTÓTIPO DE  
MÁQUINA DE QUEBRAR ENDOCARPO DE BARU**

Projeto final de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior

Co-Orientador M SC. Anderson Gomes Girardi

GOIÂNIA

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Morais, Ítalo Felipe Lira de  
CONCEPÇÃO DE SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO PARA PROTÓTIPO  
DE MÁQUINA DE QUEBRAR ENDOCARPO DE BARU [manuscrito] /  
Ítalo Felipe Lira de Moraes. - 2025.  
LXXXIV, 84 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior; co-orientador  
Anderson Gomes Girardi.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de  
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2025.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui fotografias, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista  
de tabelas.

1. Projeto de Máquinas. 2. Agricultura Familiar. 3. Baru (*Dipteryx  
alata*). 4. Sistema de Alimentação. 5. , Método AHP. I. Júnior, Sigeo  
Kitatani, orient. II. Título.

CDU 621.03



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) dois dia(s) do mês de julho do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Concepção de sistema de alimentação para protótipo de máquina de quebrar endocarpo de baru”, de autoria de Ítalo Felipe Lira de Moraes, do curso de engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG - EMC. Os trabalhos foram instalados pelo(a) prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior - orientador (EMC/UFG) - com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: prof. Dr. Ademyr Gonçalves de Oliveira (EMC/UFG) e prof. Dr. José Wilson Lima Nerys (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,0 (nove pontos), tendo sido o TCC considerado APROVADO.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Sigeo Kitatani Junior, Professor do Magistério Superior**, em 07/07/2025, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Wilson Lima Nerys, Professor do Magistério Superior**, em 07/07/2025, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ademyr Goncalves De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 07/07/2025, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5485751** e o código CRC **017C25E8**.

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o encerramento de uma importante etapa acadêmica, mas também a concretização de um ciclo de muito esforço, aprendizado e superação. Ao longo desta jornada, tive o privilégio de contar com o apoio de diversas pessoas que foram fundamentais para a realização deste projeto.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e saúde concedidas para enfrentar os desafios do percurso universitário. Sem essa base espiritual, muitos momentos teriam sido mais difíceis de superar.

Agradeço, de forma especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior, pela paciência, disponibilidade e orientação precisa durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência e dedicação foram essenciais para que este projeto se concretizasse com qualidade técnica e relevância prática.

Agradeço também, com igual estima, ao meu coorientador, M.Sc. Anderson Gomes Girardi. Suas contribuições técnicas, especialmente durante as fases de experimentação e prototipagem, foram de valor inestimável. Sua visão prática e suas sugestões assertivas ajudaram a transformar conceitos teóricos em resultados concretos, enriquecendo significativamente a qualidade deste trabalho.

Estendo minha gratidão aos demais professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, que, ao longo da graduação, contribuíram significativamente com seus ensinamentos, conselhos e incentivo à pesquisa e ao pensamento crítico.

Aos amigos que fiz durante esse período de faculdade, meu sincero agradecimento pela amizade, companheirismo e apoio ao longo da jornada acadêmica. Em especial, agradeço aos mais antigos — Alexandre Dias, Manoel Oscar, Heverton Lucas, Klayver Pricinote e Luca Prado — por estarem presentes nos momentos importantes, pelas conversas, trocas de experiências e pelo incentivo constante, que tornaram essa caminhada mais leve, enriquecedora e inesquecível.

À minha família, deixo meu agradecimento mais profundo. A minha irmã Natanne Lira de Moraes, pelo amor, incentivo incondicional e pelos valores que

sempre de forma muito sábia buscou trazer. A minha mãe Maria Lira Alves que fez de tudo para proporcionar todas oportunidades a mim oferecidas como realidade.

Por fim, agradeço profundamente à minha companheira de todas as horas, Bruna de Lima Pedroso, que esteve ao meu lado desde o começo da faculdade, quando nos conhecemos. Desde então, passamos por muitos momentos, desafios e conquistas, e em todos eles pude contar com seu apoio, paciência e incentivo. Sua presença constante foi fundamental para que eu chegasse até aqui, e ter você ao meu lado tornou essa conquista não apenas possível, mas também mais significativa e especial.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

## **RESUMO**

O foco deste trabalho é corroborar com o desenvolvimento de uma máquina para quebrar o endocarpo do fruto baru (*Dipteryx alata*). A quebra deste fruto para obtenção da sua castanha limita e dificulta a exploração comercial do fruto, que, por sua vez, desincentiva o estudo das suas potencialidades - tanto no ramo alimentício, quanto em outras áreas como em medicamentos cujos princípios têm origem natural. A mecanização do baru, um fruto de alto valor para a agricultura familiar do Cerrado, enfrenta como principal obstáculo a concepção de um sistema de alimentação eficiente, devido à alta variabilidade morfológica e ao nível de força necessário para romper o seu endocarpo. Este trabalho teve como objetivo desenvolver a concepção de um sistema de alimentação para um protótipo de máquina de quebrar baru, utilizando uma abordagem de projeto sistemática e iterativa. A metodologia foi estruturada em dois ciclos de desenvolvimento. O primeiro ciclo investigou experimentalmente um sistema de alimentação em lote por gravidade, concluindo que esta abordagem é inviável devido ao severo fenômeno de encavalamento (arching), que causa o bloqueio recorrente do fluxo. Com base nesse aprendizado, um segundo ciclo foi iniciado, focando na geração de conceitos para alimentação contínua. Por meio da aplicação do método de decisão multicritério AHP (Analytic Hierarchy Process), que priorizou critérios como Custo de Fabricação, Robustez e Facilidade de Manutenção, a concepção da Esteira Transportadora com Taliscas foi selecionada como a mais promissora. A principal contribuição deste estudo reside na geração de conhecimento empírico sobre o comportamento de fluxo do baru e na aplicação de uma metodologia de engenharia estruturada para propor uma solução técnica viável e justificada, alinhada às necessidades do pequeno produtor.

**Palavras-chave:** Projeto de Máquinas, Agricultura Familiar, Baru (*Dipteryx alata*), Sistema de Alimentação, Método AHP.

## **ABSTRACT**

The focus of this work is to contribute to the development of a machine for breaking the endocarp of the baru fruit (*Dipteryx alata*). The process of breaking this fruit to obtain its kernel limits and hinders its commercial exploitation, which in turn discourages the study of its potential — both in the food industry and in other areas such as medicine, where active ingredients of natural origin are used. The mechanization of baru, a fruit of high value for family farming in the Cerrado, faces as its main obstacle the design of an efficient feeding system, due to the high morphological variability and the level of force required to break its endocarp. This work aimed to develop the conception of a feeding system for a prototype of a baru cracking machine, using a systematic and iterative design approach. The methodology was structured into two development cycles. The first cycle experimentally investigated a gravity batch feeding system, concluding that this approach is unfeasible due to the severe arching phenomenon, which causes recurring flow blockages. Based on this learning, a second cycle was initiated, focusing on the generation of concepts for continuous feeding. Through the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) multicriteria decision-making method, which prioritized criteria such as Manufacturing Cost, Robustness, and Ease of Maintenance, the Belt Conveyor with Lugs design was selected as the most promising. The main contribution of this study lies in the generation of empirical knowledge about the flow behavior of baru and the application of a structured engineering methodology to propose a technically viable and justified solution aligned with the needs of small producers.

**Keywords:** Machine Design, Family Farming, Baru (*Dipteryx alata*), Feeding System, AHP Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Atividades de engenharia e conhecimentos.....	20
Figura 2 - Fluxograma das principais fases do processo de projeto.....	21
Figura 3 - Efeitos das diferentes fases do ciclo de vida sobre o custo do produto.....	22
Figura 4 - Influências sobre o custo do produto.....	23
Figura 5 – Vista da calha de testes utilizada nos experimentos de escoamento.....	36
Figura 6 – Amostras representativas dos quatro tipos de baru (B1 a B4).....	37
Figura 7 – Protótipo do dosador de engrenagem desenvolvido para o segundo experimento..	37
Figura 8 - Gráfico de Pareto dos Comportamentos Observados.....	41
Figura 9 - Heatmap de Frequência Absoluta dos Resultados por Configuração.....	42
Figura 10 – Condição inicial do ensaio de alimentação em lote, com a calha carregada com frutos de baru.....	45
Figura 11 – Evidência do fenômeno de encavalamento (arching). A imagem (a) mostra uma vista superior do bloqueio, enquanto a (b) detalha o intertravamento mecânico dos frutos que impede o fluxo gravitacional.....	46
Figura 12 – Detalhe do dosador de engrenagem obstruindo a saída e agravando o travamento do fluxo.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala Fundamental de Comparações do AHP.....	25
Tabela 2 - Resumo dos Resultados do Teste Qui-quadrado.....	42
Tabela 3 - Matriz de Comparação Paritária para os Critérios de Avaliação.....	48
Tabela 4 - Vetor de Prioridades (Pesos) dos Critérios.....	49
Tabela 5 - Ranking Final das Alternativas Conceituais.....	50

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 Contextualização do tema.....	11
1.2 Objetivo do estudo.....	13
1.3 Relevância da pesquisa.....	15
1.4 Estrutura do trabalho.....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1 Metodologias de projeto.....	18
2.1.1 A Abordagem Sistemática de Back (1983).....	18
2.1.2 A Visão Integrada e a Engenharia Simultânea (Back et al., 2008).....	21
2.2 Método de decisão multicritério – AHP (Analytic Hierarchy Process).....	23
2.2.1 Princípios Fundamentais do Método AHP.....	23
2.2.2 A Escala Fundamental de Saaty.....	24
2.2.3 Verificação da Consistência.....	26
2.2.4 Justificativa da Escolha do AHP para o Projeto.....	26
2.3 Identificação das propriedades físico-mecânicas do Baru.....	27
2.3.1 Caracterização Estrutural do Fruto.....	27
2.3.2 Implicações Práticas das Propriedades do Fruto.....	27
2.4 Tecnologias de quebra e alimentação existentes.....	29
2.4.1 Análise de Tecnologias em Outras Culturas.....	30
2.4.2 Implicações e a Lacuna Tecnológica para o Baru.....	30
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
3.1 Estrutura metodológica iterativa.....	32
3.2 Ciclo 1: investigação do sistema de alimentação por gravidade.....	33
3.2.1 Concepção e Hipótese Inicial.....	34
3.2.2 Projeto dos Experimentos.....	34
3.2.3 Análise e Conclusão do Ciclo 1.....	37
3.3 Ciclo 2: concepção e seleção do sistema de alimentação contínua.....	37
3.3.1 Geração de Alternativas Conceituais.....	37
3.3.2 Método de Seleção (AHP).....	38
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>39</b>
4.1 Resultados do ciclo 1 - testes com alimentação por gravidade.....	39
4.1.1 Análise do Comportamento de Frutos em Calha.....	39
4.1.2 Avaliação do Sistema de Alimentação em Lote e do Dosador de Engrenagem.....	42
4.2 Resultados do ciclo 2 - seleção da concepção de alimentação contínua.....	46
4.2.1 Ponderação dos Critérios de Projeto via AHP.....	46
4.2.2 Avaliação e Seleção Final das Alternativas.....	49
4.2.3 Contextualização e Limitações da Seleção.....	50
<b>5 DISCUSSÕES.....</b>	<b>52</b>
5.1 Implicações do Ciclo Experimental 1: Limitações do Fluxo por Gravidade em Alimentação por Lote.....	52
5.2 Validação da concepção selecionada no ciclo 2.....	53
5.3 Diálogo com a literatura e originalidade do projeto.....	54
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>

6.1 Síntese dos resultados e objetivos alcançados.....	57
6.2 Contribuições e limitações do trabalho.....	57
6.3 Trabalhos futuros.....	58
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>59</b>
<b>8 APÊNDICES.....</b>	<b>63</b>
APÊNDICE A – PROJETO TÉCNICO DA CALHA DE TESTES.....	63
APÊNDICE B – PROJETO TÉCNICO DO DOSADOR DE ENGRENAGEM.....	64
APÊNDICE C – SCRIPT PYTHON PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS.....	65
APÊNDICE D – DADOS COMPILADOS DOS ENSAIOS DE ESCOAMENTO EM CALHA.....	76
APÊNDICE E – DIAGRAMA DE DECISÃO.....	82
APÊNDICE F – TABELAS DE DECISÃO.....	83

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do tema

A Engenharia Mecânica, da perspectiva de campo de estudo, tem por característica se destacar por uma ampla aplicabilidade em diversos setores da economia. Em um cenário marcado por constantes avanços tecnológicos, essa área da engenharia acompanha e contribui de forma ativa e significativa para a evolução dos processos industriais, produtivos e sociais. Sua atuação abrange desde a concepção e desenvolvimento de novos materiais até a execução de projetos complexos, englobando também as áreas térmica e de sistemas mecânicos. Essa versatilidade torna a Engenharia Mecânica essencial para o progresso técnico científico e para a inovação em diferentes contextos produtivos na concepção, projeto, produção e manutenção dos mais diversos produtos (BORGES; MELO; CARVALHO, 2021).

Nesse cenário, destaca-se um eixo de trabalho de grande relevância no contexto brasileiro: a contribuição da engenharia mecânica para o desenvolvimento de soluções tecnológicas voltadas à agricultura familiar. Como área do conhecimento aplicada, a engenharia mecânica possui o potencial de criar e adaptar equipamentos que otimizem o trabalho no campo, promovendo maior eficiência, segurança e sustentabilidade nos processos produtivos. Tal atuação é especialmente significativa diante da importância da agricultura familiar, que se revela fundamental para a promoção da segurança alimentar, geração de emprego e renda, mitigação da pobreza, conservação da biodiversidade e preservação das tradições culturais. Assim, a agricultura familiar deve ser compreendida não apenas como uma atividade econômica, mas como uma forma de vida, estreitamente vinculada aos valores sociais, ambientais e culturais das comunidades que dela dependem (SILVA; LIMA; IWATA, 2021). 12

Diante desse panorama, esse trabalho tem se propõe a contribuir com o desenvolvimento de uma máquina para quebra do endocarpo do fruto do Baru (*Dipteryx alata*), fruto oriundo de uma árvore frondosa de ocorrência no cerrado brasileiro, exemplo representativo da riqueza do cerrado brasileiro e do potencial produtivo da agricultura familiar. O fruto possui alto valor nutricional e potencial de mercado, sendo uma importante fonte de renda para pequenos produtores da região

(VIEIRA; CAMILO; CONRADIN, 2016). Está presente em pequenos mercados e é explorado por iniciativas isoladas em empresas de alimentação com viés de afirmação da cultura das regiões do cerrado.

Apesar do crescente interesse comercial, o modelo predominante de exploração, baseado no extrativismo, ainda impõe grandes limitações ao seu beneficiamento. O processo artesanal de extração da amêndoa, que envolve a quebra do endocarpo extremamente rígido com ferramentas rudimentares e imprecisas é caracterizado pela baixa produtividade e perdas significativas do produto por danos à amêndoa. Além disso, o processo feito com sistemas mecânicos improvisados incorre em trabalho com problemas de ergonomia e segurança do trabalho, representando alto risco à saúde dos trabalhadores. Também limita o seu beneficiamento, o que desincentiva a sua exploração comercial, conforme depoimento de comerciantes que vivem da sua exploração. A transição deste processo manual para um sistema mecanizado, contudo, revela desafios de engenharia que vão além da simples aplicação de força para a quebra do endocarpo.

Conforme verificado empiricamente na fase exploratória deste trabalho, o fruto possui alta variabilidade dimensional e morfológica; exige alto esforço necessário para a quebra do endocarpo; a sua polpa é composta de uma massa de alta viscosidade, que dificulta a fixação do fruto. Juntas, essas características criam um cenário com variadas demandas técnicas, o que torna inviável a aplicação de soluções simplistas, sem análises rigorosas do problema. A necessidade de posicionamento para posterior emprego de esforço direcional, de forma adequada, para obter uma quebra eficiente, exige o projeto de um sistema de alimentação que controle o fluxo de frutos, com orientação controlada, o que pode resultar em mecanismos complexos. Todavia, o nível de complexidade do sistema mecânico deverá ser dosado, uma vez que poderá aumentar o custo de fabricação do equipamento quando industrializado, podendo torná-lo inviável comercialmente para ser adquirido pela comunidade da agricultura familiar.

Nesse contexto, a engenharia mecânica surge como agente transformador. A aplicação de princípios de projeto sistemático, combinados com o conhecimento técnico sobre materiais e sistemas mecânicos, possibilita o desenvolvimento de

equipamentos mais eficientes, seguros e adaptados à realidade produtiva das comunidades extrativistas, contribuindo diretamente para o aumento da produtividade, a padronização da produção e a agregação de valor ao fruto. Ao alinhar conhecimento técnico à realidade social e econômica do campo, a engenharia fortalece o desenvolvimento rural sustentável e promove a valorização de frutos nativos como o Baru, respeitando os princípios da preservação ambiental e da justiça social.

## **1.2 Objetivo do estudo**

Diante da crescente valorização do fruto do Baru (*Dipteryx alata*) e dos desafios enfrentados em sua cadeia produtiva, especialmente na etapa de beneficiamento do endocarpo, torna-se evidente a necessidade de soluções tecnológicas que atendam à realidade de pequenos produtores e comunidades extrativistas do Cerrado. A dificuldade na quebra do endocarpo, devido à sua estrutura extremamente rígida, somada à ausência de sistemas mecanizados adequados para alimentação e posicionamento do fruto em equipamentos de quebra, limita a eficiência e a escalabilidade do processo.

Neste cenário, a Engenharia Mecânica desponta como área estratégica no desenvolvimento de dispositivos e sistemas adaptados, capazes de otimizar etapas produtivas, reduzir o esforço físico e melhorar a segurança e o rendimento operacional. A concepção de um sistema de alimentação eficiente, preciso e funcional representa um passo fundamental para viabilizar o uso de máquinas destinadas à quebra do endocarpo do Baru, promovendo a agregação de valor ao produto e incentivando práticas sustentáveis de manejo e beneficiamento.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver a concepção de um sistema de alimentação para um protótipo de máquina de quebrar endocarpo de Baru, atendendo aos requisitos de simplicidade construtiva, baixo custo, ergonomia e compatibilidade com o contexto da agricultura familiar.

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, que consiste na concepção de um sistema de alimentação voltado para um protótipo de máquina destinada à quebra do endocarpo do fruto do Baru, são definidos objetivos específicos baseados nos princípios metodológicos propostos por Back (1983) para o desenvolvimento

sistemático de produtos industriais. Essa abordagem visa garantir a clareza do problema, a racionalidade nas decisões de projeto e a adequação técnica e funcional da solução desenvolvida.

O primeiro objetivo específico é a investigação das propriedades físicas e geométricas do fruto do Baru, etapa fundamental para a compreensão das exigências que o sistema de alimentação deverá atender. Essa análise corresponde à fase de planejamento do projeto, na qual se identificam as características críticas do produto que influenciam diretamente o desempenho do sistema.

Em seguida, busca-se levantar e analisar soluções existentes em equipamentos utilizados em cadeias produtivas semelhantes, com o propósito de obter referências técnicas e funcionais que subsidiem a fase de especificação de requisitos. Esse levantamento contribui para a formulação de critérios objetivos que orientam o desenvolvimento da solução, considerando fatores como produtividade, simplicidade construtiva e segurança operacional.

Posteriormente, aplica-se a fase de geração de alternativas, conforme sugerido por Back (1983), por meio da elaboração de diferentes concepções para o sistema de alimentação. Nessa etapa, são exploradas possibilidades técnicas variadas, buscando responder adequadamente ao problema de projeto identificado.

A seguir, realiza-se a avaliação e seleção das alternativas geradas, considerando a viabilidade técnica, os recursos disponíveis e a adequação ao contexto da agricultura familiar. Essa análise permite refinar e consolidar a proposta mais promissora, respeitando os princípios de funcionalidade, eficiência e adaptabilidade.

Por fim, o trabalho tem como objetivo principal fornecer informações úteis para definição das demandas técnicas para o sistema de alimentação da máquina de quebrar baru. Para isso, ensaios serão feitos e, por fim, serão feitas sugestões de mecanismos, bem como ensaios preliminares pra finalmente se ter o desenvolvimento 15 detalhado do sistema de alimentação que possibilite a posterior construção do protótipo da máquina para beneficiamento do Baru. Essa proposta segue o entendimento de que o projeto de produto não se limita à criação de soluções técnicas em laboratório, mas envolve também o compromisso com sua

aplicação social e econômica, especialmente em contextos produtivos sensíveis como o da agricultura familiar (BACK, 1983).

### **1.3 Relevância da pesquisa**

A pesquisa proposta apresenta significativa relevância ao aliar o desenvolvimento tecnológico à valorização de cadeias produtivas tradicionais do Cerrado brasileiro, especialmente no que se refere ao beneficiamento do fruto do Baru (*Dipteryx alata*). A escolha do Baru como objeto de estudo não se dá apenas por seu valor nutricional e potencial mercadológico, mas também por sua representatividade cultural e socioeconômica para comunidades extrativistas e agricultores familiares da região. Nesse contexto, o fortalecimento da cadeia produtiva do Baru contribui diretamente para a geração de renda, a conservação da biodiversidade local e a promoção da segurança alimentar, elementos centrais no desenvolvimento rural sustentável.

No entanto, a etapa de processamento do fruto, particularmente a quebra do endocarpo para extração da amêndoa, ainda é realizada de forma rudimentar e pouco eficiente, o que limita a escalabilidade da produção e impõe sérias restrições ao aproveitamento econômico do produto. É justamente diante dessa lacuna que a pesquisa se destaca, ao propor a concepção de um sistema de alimentação para um protótipo de máquina de quebrar o endocarpo, visando atender às necessidades técnicas e operacionais da agricultura familiar.

A relevância do trabalho também se expressa na aplicação prática dos fundamentos da engenharia mecânica, enquanto área do conhecimento com ampla capacidade de inovação e solução de problemas reais. A adoção da metodologia de projeto sistemático, conforme delineada por Nelson Back (1983), assegura uma abordagem estruturada, racional e fundamentada no desenvolvimento de produtos industriais, promovendo a geração de soluções viáveis, seguras e contextualizadas à realidade produtiva estudada.

Além disso, ao priorizar a adaptabilidade do equipamento e o baixo custo de implementação, a pesquisa se alinha com os princípios de democratização do acesso à tecnologia e com a valorização do conhecimento técnico-científico aplicado às necessidades sociais. Dessa forma, o projeto contribui não apenas para o avanço

da engenharia aplicada ao meio rural, mas também para a construção de uma base sólida que possa servir de referência para futuras iniciativas voltadas ao beneficiamento de frutos nativos do Cerrado, promovendo inovação com impacto social e ambiental positivos.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Com o objetivo de apresentar de forma clara e lógica o desenvolvimento deste projeto, o presente trabalho foi organizado em seis capítulos, cuja estrutura é descrita a seguir.

O Capítulo 1 introduz a pesquisa, contextualizando o problema do beneficiamento do Baru no âmbito da agricultura familiar, estabelecendo a relevância da concepção de um sistema de alimentação mecanizado e definindo os objetivos geral e específicos que norteiam o estudo.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que serve de alicerce para as decisões técnicas e metodológicas. Nesta seção, são revisadas as metodologias de projeto sistemático e integrado de produtos, o método de decisão multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*), as propriedades físico-mecânicas do fruto do Baru e as tecnologias de alimentação e quebra já existentes para produtos análogos.

O Capítulo 3 detalha a metodologia de projeto iterativa adotada, que foi estruturada em dois ciclos de desenvolvimento. O primeiro ciclo aborda a investigação de um sistema de alimentação por gravidade, enquanto o segundo ciclo foca na concepção e seleção de um sistema de alimentação contínua, utilizando os aprendizados da fase anterior.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e análise dos resultados. Nele, são expostos os dados empíricos obtidos nos testes experimentais dos dois ciclos metodológicos, bem como os resultados da aplicação do método AHP para a seleção da concepção final do sistema de alimentação.

O Capítulo 5 realiza a discussão aprofundada dos resultados, interpretando os achados experimentais à luz da fundamentação teórica, validando as escolhas de projeto e destacando as implicações técnicas para a concepção do protótipo.

Finalmente, o Capítulo 6 consolida as conclusões do trabalho, sintetizando os principais resultados, apontando as contribuições da pesquisa para a área, reconhecendo suas limitações e sugerindo direções para trabalhos futuros, como o detalhamento construtivo e a validação do protótipo em campo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

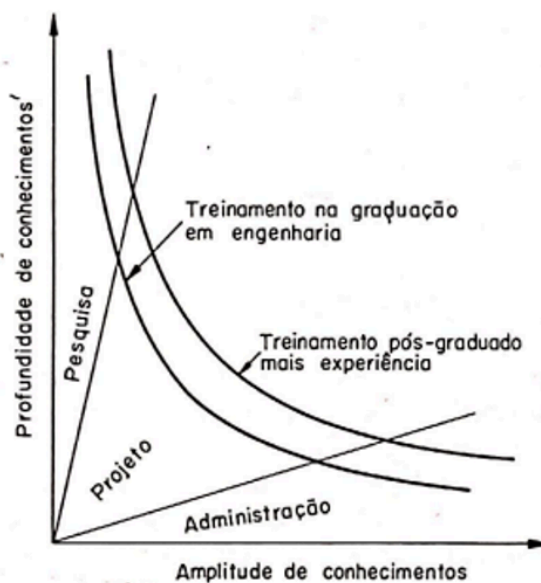
### **2.1 Metodologias de projeto**

A concepção de um sistema de alimentação para um protótipo de máquina de quebrar endocarpo de Baru, cerne deste trabalho, exige uma abordagem que transcenda a simples aplicação de conhecimentos técnicos isolados. Para guiar as fases de desenvolvimento e assegurar a qualidade e a racionalidade das decisões, o presente estudo fundamenta-se em abordagens metodológicas robustas e consagradas no campo da Engenharia de Projeto de Produtos Industriais, adotando como base uma sinergia entre a metodologia sistemática clássica e a filosofia moderna do desenvolvimento integrado de produtos.

#### **2.1.1 A Abordagem Sistemática de Back (1983)**

A obra "Metodologia de Projeto de Produtos Industriais" de Nelson Back (1983) constitui um referencial para a profissionalização da atividade de projeto no Brasil. Ela propõe a superação de abordagens baseadas puramente na intuição, introduzindo um processo sistemático e estruturado, fundamental para transformar necessidades complexas em soluções de engenharia tecnicamente viáveis.

Dentro do espectro da engenharia, a atividade de projeto demanda um perfil de conhecimento singularmente balanceado. Back (1983) ilustra essa relação em um gráfico que posiciona as diferentes atividades da engenharia segundo a profundidade e a amplitude dos saberes exigidos.

**Figura 1** - Atividades de engenharia e conhecimentos

Fonte: Back, 1983

Conforme a Figura 1, a Pesquisa caracteriza-se por uma grande profundidade de conhecimento em uma área restrita (baixa amplitude), enquanto a Administração demanda uma vasta amplitude de saberes com menor aprofundamento específico. A atividade de Projeto situa-se estrategicamente em uma posição intermediária, requerendo do engenheiro não apenas o domínio técnico aprofundado de sua especialidade, mas também uma compreensão ampla de disciplinas correlatas, como processos de fabricação, ciência dos materiais, análise de custos e fatores humanos. Essa intersecção é o campo fértil para a inovação e a resolução de problemas práticos.

Para organizar essa atividade complexa, a metodologia de Back (1983) estrutura o processo de projeto em fases sequenciais e lógicas, que guiam o projetista desde a formulação do problema até a especificação final da solução.

**Figura 2** - Fluxograma das principais fases do processo de projeto



Fonte: Adaptado de Back, 1983

As fases macro do processo, representadas no fluxograma, são:

1. **Estudo da Viabilidade:** Etapa primordial que investiga a pertinência do projeto. Nela, valida-se a necessidade de mercado e analisam-se as viabilidades física, econômica e financeira da potencial solução.
2. **Projeto Preliminar:** Fase focada na criatividade e na análise conceitual. São geradas múltiplas alternativas de solução, que são então avaliadas para selecionar a concepção mais promissora com base em análises de desempenho, sensibilidade e compatibilidade.
3. **Projeto Detalhado:** Momento de refinamento técnico da solução escolhida. Aqui são definidas todas as especificações de engenharia para a construção do produto, incluindo dimensões, materiais, tolerâncias, acabamentos e processos de montagem.
4. **Revisão e Testes:** Atividade iterativa que permeia todo o desenvolvimento. Consiste na verificação e validação contínuas para garantir a qualidade, o desempenho e a segurança da solução, culminando nos testes do protótipo e nos ajustes necessários para a produção.

A adoção desta abordagem sistemática no presente neste documento fornece o esqueleto lógico para a organização da pesquisa. As etapas de desenvolvimento do sistema de alimentação, desde o levantamento de requisitos até a seleção final

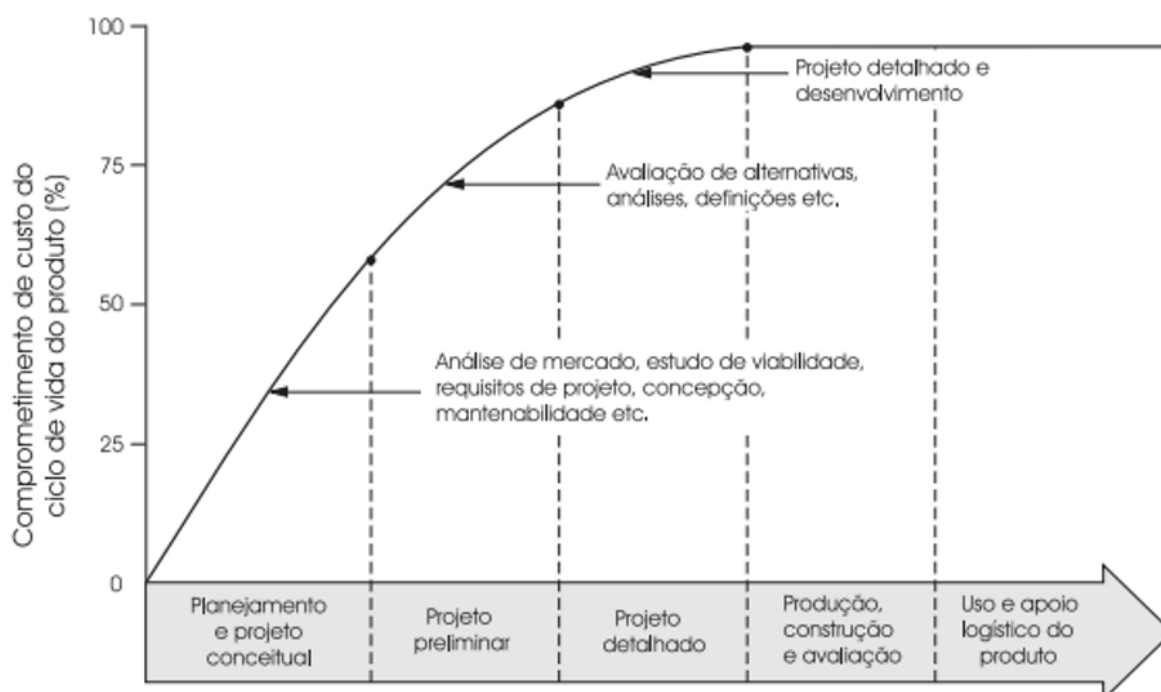
do conceito, foram estruturadas segundo essa progressão racional, garantindo clareza, rastreabilidade e uma sólida fundamentação para cada decisão de projeto.

### 2.1.2 A Visão Integrada e a Engenharia Simultânea (Back et al., 2008)

Enquanto a abordagem sistemática fornece a estrutura, a filosofia do Desenvolvimento Integrado de Produto, aprofundada por Back et al. (2008), enriquece o processo ao incorporar uma visão holística e estratégica. Impulsionada pela necessidade de maior competitividade, essa filosofia não substitui o método sistemático, mas o complementa, enfatizando a colaboração multidisciplinar e a consideração simultânea de todos os aspectos do ciclo de vida do produto desde suas fases mais incipientes.

Um dos pilares desta visão é a compreensão do impacto financeiro das decisões de projeto. Os gráficos a seguir, adaptados de Back et al. (2008), são ferramentas visuais poderosas que ilustram a importância estratégica das fases iniciais.

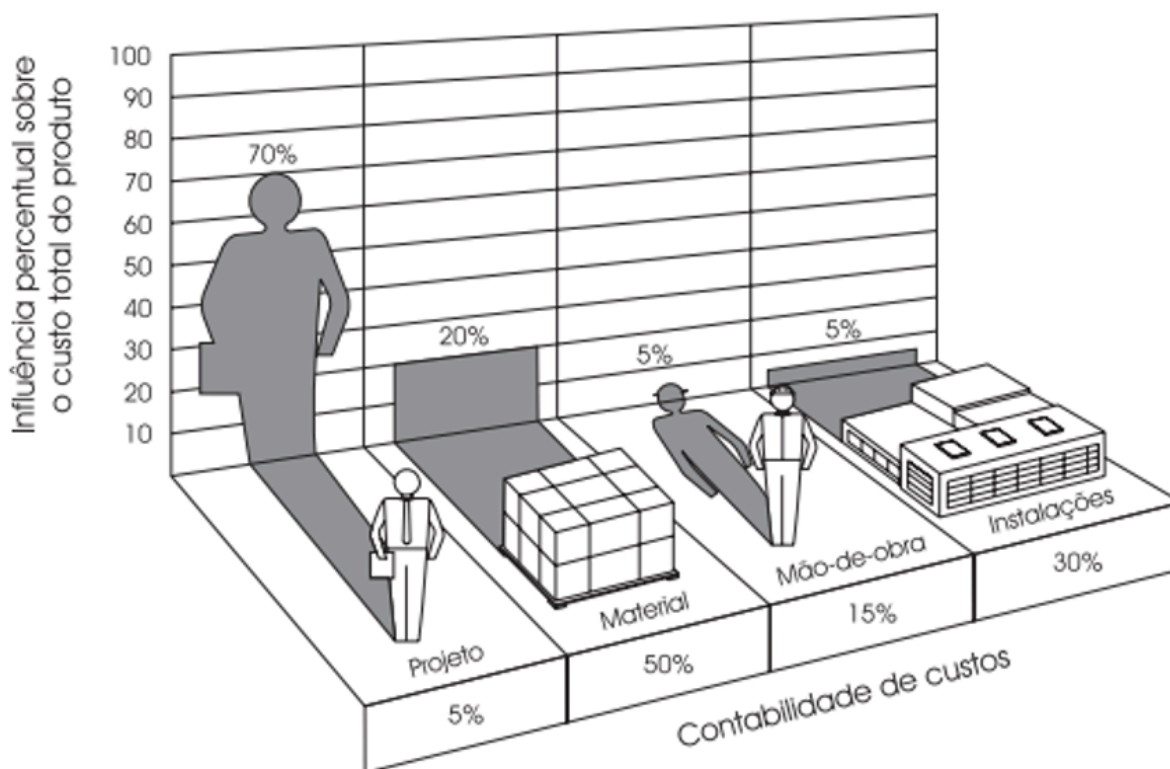
**Figura 3** - Efeitos das diferentes fases do ciclo de vida sobre o custo do produto



Fonte: Back et al., 2008, adaptado de Downey, 1969

A Figura 3 demonstra que o comprometimento do custo do ciclo de vida de um produto ocorre majoritariamente nas fases de planejamento e projeto. Cerca de 70% a 80% do custo total já está "travado" ou definido ao final da fase de projeto detalhado. Embora o maior desembolso financeiro ocorra nas fases de produção e operação, a liberdade para alterar o projeto e efetivamente reduzir custos é drasticamente limitada após as etapas conceituais.

**Figura 4** - Influências sobre o custo do produto



Fonte: Back et al., 2008, adaptado de Smith e Reinertsen, 1991

De forma complementar, a Figura 4 evidencia a notável desproporção entre o custo de uma fase e sua influência. A atividade de Projeto, que consome uma parcela relativamente pequena do orçamento total (cerca de 5%), é responsável por influenciar aproximadamente 70% do custo final do produto. Isso ocorre porque as escolhas de conceito, materiais, geometria e processos de fabricação, todas definidas pelo projetista, determinam os custos que serão incorridos em manufatura, montagem, logística e manutenção.

Esses conceitos reforçam a importância de uma metodologia robusta. Investir

tempo e recursos na fase de projeto para explorar alternativas, realizar análises e tomar decisões bem fundamentadas não é um custo, mas um investimento estratégico para garantir a competitividade e a viabilidade econômica do produto. Os princípios do desenvolvimento integrado adotados neste trabalho são:

- Visão de Ciclo de Vida Completo: Cada decisão de projeto foi avaliada não apenas por seu desempenho funcional imediato, mas também por suas implicações em custo, manutenção e descarte.
- Mentalidade Multidisciplinar: Embora conduzido individualmente, o projeto simulou uma abordagem de equipe, onde o projetista atuou com diferentes "chapéus": o de engenheiro de manufatura, o de analista de custos, o de técnico de manutenção e, principalmente, o de usuário final.
- Foco na Competitividade: A compreensão de que a qualidade e a competitividade são definidas nas fases iniciais (BACK et al., 2008) guiou a busca por uma solução que representasse o melhor equilíbrio entre custo, eficiência e robustez.

Portanto, a abordagem metodológica deste trabalho combina a estrutura sistemática de Back (1983) com a filosofia integrada de Back et al. (2008). A primeira organiza o "o quê" e o "quando" fazer, enquanto a segunda define o "como" e o "porquê" pensar em cada etapa, garantindo que a concepção final do sistema de alimentação seja não apenas tecnicamente funcional, mas também prática, econômica e alinhada às necessidades reais do seu contexto de aplicação.

## **2.2 Método de decisão multicritério – AHP (*Analytic Hierarchy Process*)**

A tarefa de selecionar a melhor concepção para o sistema de alimentação do protótipo de máquina de quebrar Baru, conforme delineado na metodologia deste trabalho, envolve a avaliação de múltiplas alternativas sob diversos critérios que, frequentemente, possuem naturezas distintas e podem ser conflitantes. Para abordar essa complexidade e garantir a racionalidade na tomada de decisão, este estudo emprega o Método AHP (*Analytic Hierarchy Process* – Processo Analítico Hierárquico).

### **2.2.1 Princípios Fundamentais do Método AHP**

O AHP, desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, é uma

poderosa ferramenta para tomada de decisão multicritério. Sua ideia central reside na decomposição de um problema complexo em uma estrutura hierárquica, seguida pela síntese das relações entre os critérios e alternativas por meio de comparações aos pares (SAATY; VARGAS, 2012). O método mimetiza o processo natural do pensamento humano, que tende a agrupar e comparar elementos em diferentes níveis de abstração para chegar a uma decisão.

Os princípios que fundamentam o AHP são:

- **Decomposição Hierárquica:** O problema de decisão é estruturado em uma hierarquia de níveis, indo do objetivo geral (no topo) para os critérios, subcritérios e, finalmente, as alternativas (na base). Essa decomposição facilita a compreensão e o gerenciamento da complexidade.
- **Comparações Paritárias:** A essência do AHP está na comparação de dois elementos de cada vez, em um mesmo nível hierárquico e em relação a um critério do nível superior. Essas comparações são expressas numericamente, refletindo o julgamento (subjetivo e/ou objetivo) da importância relativa ou da dominância de um elemento sobre o outro.
- **Síntese de Prioridades:** Através de um processo matemático (cálculo de autovetor), o AHP sintetiza os julgamentos das comparações paritárias em um conjunto de prioridades (pesos relativos) para cada elemento em cada nível da hierarquia.
- **Análise de Consistência:** O método incorpora uma medida para verificar a coerência dos julgamentos realizados, permitindo identificar e, se necessário, corrigir inconsistências para validar a qualidade da decisão.

### 2.2.2 A Escala Fundamental de Saaty

Para realizar as comparações paritárias, Saaty (1991) propôs uma escala de intensidade de importância que varia de 1 a 9, conforme apresentado na Tabela 1. Esta escala permite que julgamentos subjetivos, baseados em experiência e conhecimento técnico, sejam convertidos em valores numéricos que podem ser processados matematicamente.

**Tabela 1** - Escala Fundamental de Comparações do AHP

<b>Intensidade de Importância</b>	<b>Definição</b>	<b>Explicação</b>
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Utilizados para expressar intensidades intermediárias entre os valores adjacentes.

Recíprocos	(Ex: 1/3, 1/5, etc.)	Se a atividade A é comparada com a atividade B e recebe uma designação (ex: 5), a comparação recíproca (B com A) recebe o valor inverso (1/5).
------------	----------------------	--

*Fonte: Adaptado de Saaty (1991).*

### 2.2.3 Verificação da Consistência

A coerência dos julgamentos é verificada através do Índice de Consistência (IC). O cálculo do IC envolve a construção de uma matriz de comparação paritária e o cálculo de seu autovalor máximo ( $\lambda_{max}$ ). Para uma matriz perfeitamente consistente,  $\lambda_{max}$  é igual à sua dimensão ( $n$ ). O IC é então calculado pela equação:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} (1)$$

Onde  $n$  é o número de elementos comparados. Uma regra geral estabelece que, para que a matriz de julgamentos seja considerada consistente, o valor do IC deve ser, preferencialmente, menor ou igual a 0,10 (10%). Caso contrário, os julgamentos devem ser revistos até que uma consistência aceitável seja alcançada (SAATY, 1991).

### 2.2.4 Justificativa da Escolha do AHP para o Projeto

Para a seleção da concepção final do sistema de alimentação, que envolve critérios conflitantes (como Custo vs. Robustez), o método AHP foi escolhido por sua capacidade de estruturar o problema, incorporar julgamentos técnicos e fornecer uma base matemática robusta para a decisão. A justificativa para seu emprego neste trabalho reside em três fatores principais:

1. Natureza Multicritério do Projeto: O desenvolvimento do sistema envolve a ponderação de critérios variados, como Robustez, Custo de Fabricação, Facilidade de Manutenção e Eficiência na Dosagem. O AHP permite

hierarquizar e ponderar esses critérios de forma sistemática.

2. Integração de Dados Qualitativos e Quantitativos: A avaliação das alternativas envolve tanto dados numéricos (ex: estimativa de custo) quanto aspectos qualitativos (ex: complexidade de limpeza da polpa aderente). O AHP é ideal para integrar essas diferentes naturezas de avaliação em um modelo unificado.
3. Rastreabilidade e Defesa da Decisão: O método fornece um registro claro e matemático de todo o processo de decisão, desde a ponderação dos critérios até a avaliação das alternativas. Isso confere transparência e robustez à justificativa da escolha final, tornando-a facilmente auditável e defensável perante uma banca avaliadora.

### **2.3 Identificação das propriedades físico-mecânicas do Baru**

A concepção eficiente de um sistema de alimentação e quebra para o endocarpo do Baru depende fundamentalmente da compreensão detalhada de suas propriedades físico-mecânicas. As características do fruto não apenas definem os requisitos do sistema, mas também impõem os principais desafios de engenharia a serem superados.

#### **2.3.1 Caracterização Estrutural do Fruto**

A espécie *Dipteryx alata*, popularmente conhecida como Baru, é uma árvore nativa do Cerrado brasileiro, cujo fruto é classificado como uma drupa de formato ovoide e levemente achatado. A literatura aponta uma variação dimensional significativa, com comprimento entre 3 e 6 cm e largura de 1,5 a 4,5 cm, e massa oscilando entre 14 e 43 g (ALMEIDA et al., 1998). Essa alta variabilidade dimensional, um fator crítico para qualquer sistema de automação, foi confirmada durante os levantamentos exploratórios deste trabalho.

Estruturalmente, o fruto é composto por um epicarpo (casca fina), um mesocarpo (polpa fibrosa) e um endocarpo extremamente lenhoso e resistente, que protege a amêndoa e representa a principal barreira ao seu beneficiamento (ALMEIDA et al., 1998; CARRAZA; ÁVILA, 2010).

#### **2.3.2 Implicações Práticas das Propriedades do Fruto**

A análise da literatura, aliada aos resultados dos experimentos conduzidos neste estudo, permitiu identificar um conjunto de desafios práticos que se tornaram

determinantes para o projeto:

- Variabilidade e o Fenômeno de Encavalamento: A heterogeneidade de tamanho e formato dos frutos, prevista na literatura, manifestou-se na prática como a principal causa de falhas em sistemas de alimentação por gravidade. Os testes em calhas (detalhados no Capítulo 4) demonstraram que essa variação leva à formação de arcos estruturais estáveis, um fenômeno conhecido como encavalamento (*arching* ou *bridging* em inglês), que bloqueia completamente o fluxo e inviabiliza a alimentação em lote.
- Aderência da Polpa: A polpa do Baru, rica em açúcares e fibras (VALLILO et al., 1990), apresentou, nos testes, uma característica de alta aderência e pegajosidade. Essa propriedade é um desafio de engenharia significativo, pois superfícies de contato e mecanismos de transporte podem acumular resíduos, comprometendo o fluxo, aumentando o atrito e exigindo rotinas de limpeza frequentes e complexas.
- Resistência Anisotrópica do Endocarpo: Os ensaios preliminares de quebra por esmagamento revelaram que a resistência do endocarpo não é uniforme (isotrópica). O fruto tende a girar quando comprimido em direções aleatórias, mas fratura de forma mais eficiente e com menor dano à amêndoa quando a força é aplicada ao longo de seu eixo transversal (T). Isso indica a necessidade de um sistema que não apenas alimente, mas também oriente e trave o fruto em uma posição otimizada durante a quebra.
- Complexidade Morfológica: A observação da estrutura interna do endocarpo após a quebra revelou uma morfologia complexa, com a presença de fibras e formações pontiagudas, que contribuem para o travamento mútuo entre os frutos e dificultam a separação da amêndoa.

A combinação dessas propriedades — variabilidade dimensional, aderência da polpa e resistência anisotrópica — define os requisitos fundamentais para o projeto do sistema de alimentação. Tendo identificado a estas características, e tendo como objetivo produzir um protótipo que resulta em um equipamento industrializado menos complexo e de menor custo, é proposto a criação de mecanismo de alimentação que utilize a gravidade.

Um sistema de alimentação bem-sucedido deve ser capaz de dosar o fluxo

para evitar o encavalamento, utilizar superfícies de baixo atrito para minimizar a aderência, e garantir a orientação precisa e que evite o fenômeno de encavalamento — formação de arcos auto-portantes que bloqueiam o fluxo — em sistemas de alimentação por gravidade. Esses desafios, validados empiricamente, formam a base para a geração e seleção das alternativas conceituais apresentadas nos capítulos seguintes. Sendo assim, testes empíricos foram programados e apresentados nos capítulos de metodologia e subsequentes.

## **2.4 Tecnologias de quebra e alimentação existentes**

O desenvolvimento de um sistema mecanizado para o beneficiamento do Baru deve partir da análise das tecnologias já aplicadas tanto ao próprio fruto quanto a outras culturas com desafios de processamento análogos. A compreensão do estado da arte permite identificar princípios de funcionamento consolidados e, principalmente, as lacunas tecnológicas que justificam o desenvolvimento de novas soluções.

O beneficiamento do Baru (*Dipteryx alata* Vog.) é historicamente marcado por um entrave central: o seu endocarpo extremamente lenhoso e duro (FRANZ; SANO, 2015). O método tradicional e predominante é manual, utilizando ferramentas rudimentares como martelos e pedras. Este processo, apesar da simplicidade, acarreta em severas limitações: baixo rendimento de amêndoas inteiras (inferior a 50%), elevada incidência de perdas, baixa capacidade operacional (cerca de 5 kg/hora) e alto risco de acidentes e contaminação (FRANZ; SANO, 2015).

Buscando mitigar essas limitações, Franz e Sano (2015) desenvolveram um equipamento mecânico manual para a quebra do Baru, baseado no princípio da guilhotina com acionamento por pedal. Este projeto representa um avanço significativo, alcançando um rendimento médio de 71,9% de amêndoas inteiras e triplicando a capacidade operacional para 15 kg/hora. Contudo, seu sistema de alimentação permanece manual e individualizado, dependendo do operador para posicionar cada fruto corretamente.

Para vislumbrar uma automação mais avançada, é instrutivo analisar as soluções adotadas para outras culturas com cascas rígidas ou que exigem processamento em massa.

#### 2.4.1 Análise de Tecnologias em Outras Culturas

O beneficiamento de frutos como coco, nozes, açaí e café, embora com finalidades distintas, revela princípios de engenharia consolidados para quebra e alimentação:

- **Mecanismos de Quebra e Processamento:** As soluções tecnológicas variam conforme o objetivo. Para frutos de casca dura como nozes e amêndoas, são comuns mecanismos de compressão (rolos que fissuram a casca) ou impacto (martelos que quebram por energia cinética) (TPMACH, [s.d.]; MADE-IN-CHINA, [s.d.]). Para a extração de polpa, como no açaí, utilizam-se maceradores com batedores que separam a polpa do caroço por fricção (BERTOLLO, 2022).
- **Sistemas de Alimentação:** Em processos de larga escala, a alimentação é tipicamente automatizada e contínua para garantir a eficiência. Tecnologias como funis vibratórios, esteiras transportadoras e transportadores de rosca são amplamente empregadas para regular o fluxo de material para as etapas de processamento (SILVA et al., 2024; TROPICAL FOOD MACHINERY, [s.d.]).
- **Sistemas de Separação e Classificação:** Após a quebra ou despulpamento, a separação dos componentes de interesse (amêndoa, polpa, grão) é realizada por meio de peneiras vibratórias (separação por tamanho), sistemas de ventilação (separação por densidade) e, em estágios mais avançados, seleção eletrônica por imagem para classificação de qualidade (JORNAL DA USP, 2017; SILVA et al., 2024).

#### 2.4.2 Implicações e a Lacuna Tecnológica para o Baru

A análise das tecnologias existentes revela uma clara tendência à automação para garantir eficiência, padronização e segurança. Os sistemas de alimentação contínua são um pilar para a viabilidade de processos em maior escala. No entanto, a aplicação direta dessas tecnologias ao Baru é inviabilizada pelas características singulares do fruto.

A presente análise de mercado e de patentes evidencia uma lacuna tecnológica crucial: a ausência de um sistema de alimentação comercial que seja otimizado para a geometria irregular e a forte tendência ao travamento (encavalamento) do Baru. As soluções existentes são, em geral, projetadas para produtos com morfologia mais regular. A variabilidade dimensional e a forma

achatada do Baru exigem uma solução customizada que não apenas transporte, mas que principalmente dose, oriente e posicione o fruto de forma confiável para a quebra, evitando os bloqueios de fluxo que foram empiricamente observados nos testes preliminares deste trabalho.

É precisamente nesta lacuna que o presente projeto se insere, buscando conceber um sistema de alimentação original, desenvolvido especificamente para superar os desafios únicos impostos pelo Baru, visando viabilizar sua mecanização em um nível de automação superior ao existente e adaptado à realidade da agricultura familiar.

### **3 METODOLOGIA**

A concepção de um sistema de alimentação para um protótipo de máquina de quebrar endocarpo de baru no escopo do presente trabalho exigiu a estudo de conceitos e metodologias em diferentes áreas do conhecimento envolvendo engenharia no contexto de projeto de máquinas e equipamentos.

Do ponto de vista de projeto de máquinas, uma vez que se pretende fomentar o desenvolvimento de mecanismos que se tornarão não apenas protótipos, mas que serão desenvolvidos - em termos de maturidade tecnologia - a fim de se tornarem equipamentos industrializados, foi feita uma revisão bibliográfica e serão utilizados no contexto deste trabalho, metodologias para desenvolvimento de projetos de produtos industriais. Por este motivo, não será a proposta que vai além do dimensionamento de partes mecânicas, adotando uma abordagem de projeto que transcenda a mera aplicação de conhecimentos técnicos isolados.

A partir dos conceitos apresentados por Back (1983), este trabalho será desenvolvido com foco nas primeiras etapas previstas para o desenvolvimento do projeto da máquina de quebrar baru, tendo prioridade a definição abrangente e precisa dos requisitos de projeto da máquina de quebrar baru, restrito ao sistema de alimentação, a fim de que se possa posicioná-lo com precisão para posterior fase de quebra.

Diante da natureza singular do problema essencial para gerenciar as incertezas e garantir a racionalidade das decisões de projeto, as metodologias estudadas têm finalidade de estabelecer critérios adequados para:

1. Contextualizar o desenvolvimento da máquina de quebrar baru com finalidade de projetos de produtos industriais, de forma que se escolha e se dimensione os elementos de máquinas a fim de se gerar um protótipo funcional que possibilite o seu aprimoramento em termos de maturidade tecnológica e viabilize a sua industrialização. Além de industrialização, visando atender demanda específica da agricultura familiar, serão priorizadas características como: baixa necessidade de intervenção para manutenção e baixo custo de fabricação.
2. Identificar, de forma abrangente e segura, os requisitos técnicos para o projeto do sistema de alimentação.
3. Criar metodologia para classificação e seleção de diferentes propostas de projeto dentro do contexto de projeto de equipamentos industrializados – em que são feitos os desenvolvimentos de mais de um protótipo, para posterior avaliação do mais adequado para se desenvolver o projeto detalhado do modelo definido como o mais adequado.

A seguir serão apresentadas as metodologias correlacionadas para o desenvolvimento do projeto do sistema de alimentação de baru, no contexto de projeto de equipamentos industriais, bem como é apresentada a metodologia experimental utilizada para os ensaios preliminares do comportamento do baru para alimentação do equipamento por sistema de calha fixa.

### **3.1 Estrutura metodológica iterativa**

Embora as metodologias clássicas, como a proposta por Back (1983),

ofereçam uma estrutura sequencial robusta (planejamento, projeto preliminar, projeto detalhado), a realidade do desenvolvimento de produtos inovadores raramente segue um caminho puramente linear. O aprendizado gerado durante as fases de teste e prototipagem frequentemente revela novas informações que exigem a revisão de decisões anteriores. Por essa razão, o presente trabalho adotou uma estrutura metodológica iterativa, fundamentada no ciclo de concepção, prototipagem, teste e aprendizado. Esta abordagem, alinhada aos princípios do Desenvolvimento Integrado de Produtos (BACK et al., 2008), permite que o projeto evolua de forma adaptativa, respondendo aos desafios empíricos descobertos ao longo do caminho.

O desenvolvimento foi organizado em dois ciclos principais, cada um com objetivos claros e resultados que informaram diretamente a etapa seguinte:

1. Ciclo 1: Investigação do Sistema de Alimentação por Gravidade. O primeiro ciclo partiu da hipótese mais simples e de menor custo: a utilização de uma calha inclinada para alimentação em lote. O objetivo era validar experimentalmente se a força da gravidade seria suficiente para garantir um fluxo contínuo e ordenado. Os testes práticos, no entanto, invalidaram essa concepção inicial, revelando problemas críticos de encavalamento e obstrução. A conclusão deste ciclo não representou um fracasso, mas sim um avanço fundamental, gerando conhecimento empírico decisivo e levando a um pivô estratégico na abordagem do projeto.
2. Ciclo 2: Concepção do Sistema de Alimentação Contínua. Com base no aprendizado do ciclo anterior, o problema do projeto foi reformulado: o foco deslocou-se da dosagem na saída de uma pilha para a garantia de uma alimentação gradual e controlada desde o reservatório. Este segundo ciclo concentrou-se na geração de novos conceitos e na aplicação de uma ferramenta de decisão multicritério (AHP) para selecionar a alternativa mais promissora de forma estruturada e justificável.

Essa estrutura metodológica em ciclos, conforme detalhado nas seções seguintes, permitiu que o projeto fosse ao mesmo tempo sistemático, ao seguir etapas lógicas dentro de cada ciclo, e flexível, ao adaptar sua direção com base em evidências concretas.

### **3.2 Ciclo 1: investigação do sistema de alimentação por gravidade**

O primeiro ciclo metodológico do projeto concentrou-se em investigar a viabilidade da concepção mais simples e de menor custo para o sistema de alimentação: um mecanismo baseado puramente na força da gravidade para o transporte dos frutos.

### 3.2.1 Concepção e Hipótese Inicial

A concepção inicial partiu do desenvolvimento de uma calha inclinada, projetada para receber um lote de frutos de Baru e direcioná-los para o mecanismo de quebra. A hipótese central desta fase era que, ao se utilizar uma inclinação adequada (estabelecida em  $30^\circ$  como um valor promissor), a força gravitacional seria suficiente para promover um fluxo contínuo e ordenado dos frutos, superando as forças de atrito e garantindo a alimentação da máquina. O objetivo era validar se esta solução minimalista, de baixo custo e sem partes móveis, poderia atender aos requisitos funcionais do sistema.

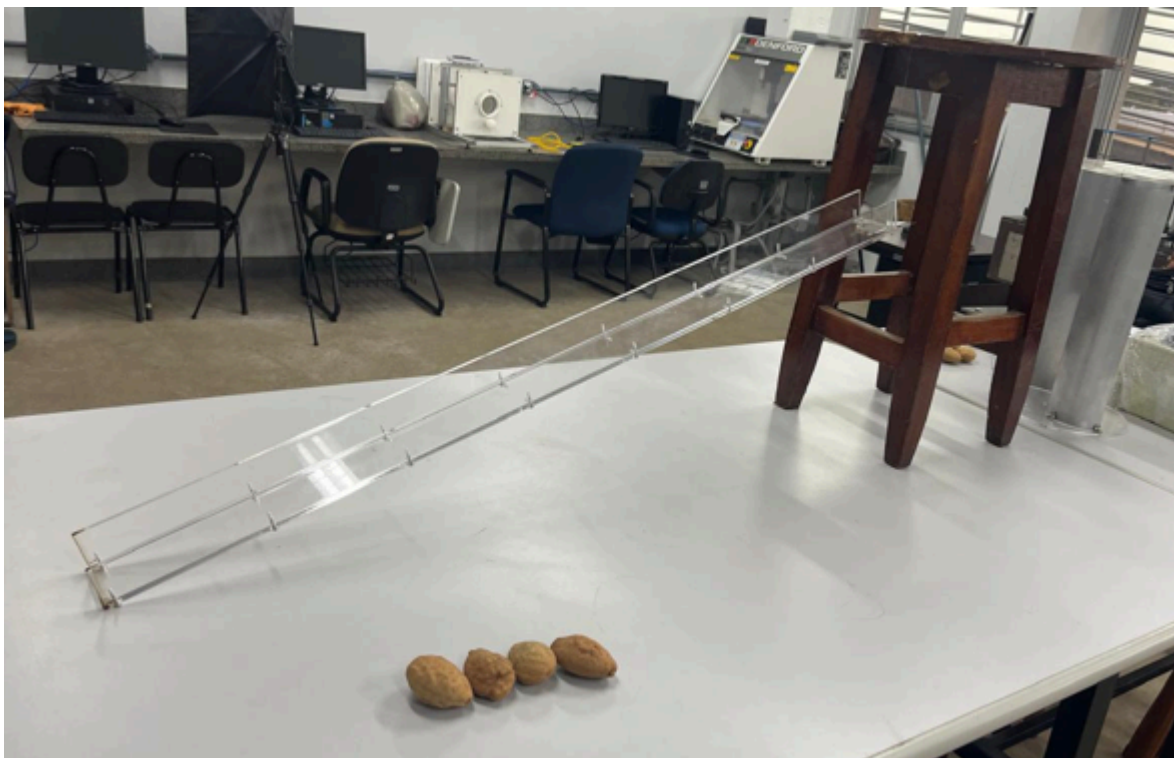
### 3.2.2 Projeto dos Experimentos

Para testar a hipótese inicial de forma sistemática, foram conduzidos dois experimentos principais. O primeiro visava entender o comportamento fundamental dos frutos na calha, enquanto o segundo avaliava o desempenho do sistema sob carga e com uma tentativa de controle de vazão.

- Experimento 1: Análise de Comportamento em Calha Aberta

O primeiro ensaio foi desenhado para analisar o comportamento individualizado dos frutos em uma calha protótipo (Figura 3), cujo projeto técnico detalhado se encontra no Apêndice A. A metodologia consistiu em registrar a resposta de diferentes tipos de baru (Figura 4) sob condições controladas.

**Figura 5** – Vista da calha de testes utilizada nos experimentos de escoamento.



Fonte: O autor (2025).

- Materiais: Foram utilizados frutos de baru classificados em quatro categorias de tamanho (B1, B2, B3 e B4), conforme ilustrado na Figura 6, e a referida calha protótipo, Figura 5.
- Variáveis Controladas:
  - Inclinação da Calha: Testada em 18° e 30°.
  - Ponto de Soltura: Quatro posições distintas (PI, PII, PIV) ao longo da calha.
  - Orientação do Fruto (Lado): Quatro orientações iniciais para simular a aleatoriedade da entrada.
- Comportamentos Observados: Para cada lançamento, o resultado foi classificado como: D (Deslizou completamente), N (Não completou a queda/travou), R (Rolou) e NÃO CABE.

**Figura 6** – Amostras representativas dos quatro tipos de baru (B1 a B4)

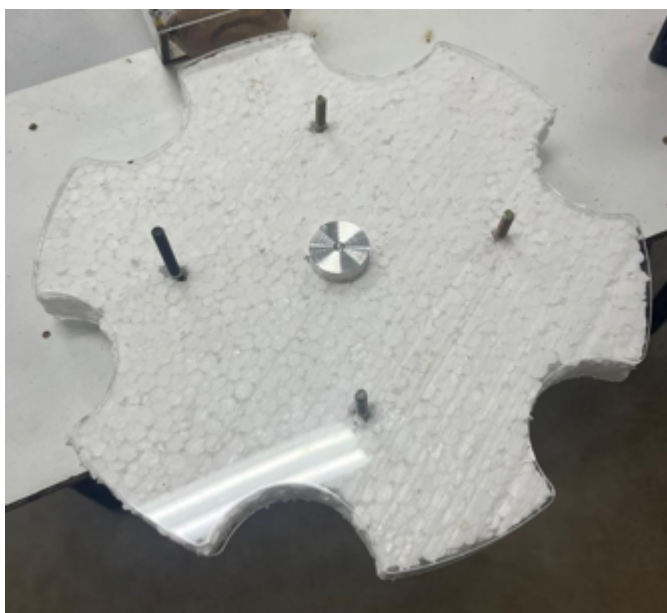


Fonte: O autor (2025).

- Experimento 2: Avaliação de Alimentação em Lote com Dosador

O segundo ensaio investigou o comportamento do sistema sob condições mais próximas da operação real. Para este teste, foi desenvolvido e acoplado à saída da calha um dosador mecânico (Figura 7), cujo desenho conceitual está disponível no Apêndice B. O objetivo era testar se a engrenagem poderia controlar a vazão de uma calha previamente carregada com um lote de aproximadamente 25 frutos.

**Figura 7** – Protótipo do dosador de engrenagem desenvolvido para o segundo experimento.



Fonte: O autor (2025).

### 3.2.3 Análise e Conclusão do Ciclo 1

Os dados do Experimento 1 foram submetidos a uma análise estatística. Para tal, foi implementado um script em linguagem Python, utilizando bibliotecas consagradas como Pandas para manipulação de dados e SciPy para a execução do teste Qui-quadrado. O código-fonte completo e comentado, que detalha todo o processo de tratamento e análise, encontra-se no Apêndice C. Os resultados qualitativos do Experimento 2 foram documentados por meio da observação direta.

A conclusão deste ciclo, detalhada no Capítulo 4, deste primeiro ciclo metodológico foi inequívoca: os resultados, que serão aprofundados adiante, indicaram que a abordagem de alimentação por lote em uma calha simples não se mostrou promissora sob as condições testadas, devido ao severo fenômeno de encavalamento (formação de arcos) dos frutos. A tentativa de controlar a vazão com um dosador na saída mostrou-se contraproducente, agravando os travamentos.

Essa constatação empírica, que refutou a hipótese inicial de um fluxo simples e contínuo, representou um aprendizado crucial e levou a um pivô estratégico no projeto, direcionando a pesquisa para a busca por sistemas de alimentação ativa no ciclo de desenvolvimento seguinte.

## 3.3 Ciclo 2: concepção e seleção do sistema de alimentação contínua

O conhecimento empírico gerado ao final do Ciclo 1 foi determinante para a evolução do projeto. Com o problema redefinido para garantir uma alimentação dosada e contínua desde o reservatório, este segundo ciclo focou-se na geração e seleção de novos conceitos que abordassem diretamente este novo paradigma.

### 3.3.1 Geração de Alternativas Conceituais

Utilizando técnicas de ideação como o *brainstorming*, conforme preconiza Back (1983), foram explorados diferentes princípios mecânicos capazes de transportar os frutos de forma individualizada ou em pequenos grupos, minimizando o acúmulo e o risco de travamento. As principais alternativas conceituais geradas foram:

1. Esteira Transportadora com Taliscas: Consiste em uma correia com aletas transversais que coletam um número limitado de frutos em um reservatório e os

transportam de forma contínua.

2. Tambor Rotativo Alveolado: Utiliza um cilindro com cavidades que capturam os frutos individualmente na base de um reservatório e os liberam por gravidade em uma calha de saída.
3. Alimentador Vibratório Linear: Baseia-se em uma bandeja que, por meio de micro vibrações, induz o movimento controlado dos frutos ao longo de uma calha.

### 3.3.2 Método de Seleção (AHP)

Para selecionar a alternativa conceitual mais adequada de forma estruturada e defensável, foi definido o uso do método AHP. O problema foi decomposto em uma hierarquia de três níveis:

- Nível 1 (Objetivo): Selecionar o melhor conceito de sistema para alimentação contínua do Baru.
- Nível 2 (Critérios de Avaliação): Foram definidos cinco critérios essenciais: Custo de Fabricação, Eficiência na Dosagem, Facilidade de Manutenção, Robustez e Confiabilidade, e Facilidade de Limpeza.
- Nível 3 (Alternativas): As três concepções geradas: Esteira com Taliscas, Tambor Alveolado e Alimentador Vibratório.

O processo de seleção seguiu duas etapas de julgamento: primeiro, foram realizadas comparações paritárias entre os critérios para definir seus pesos; em seguida, as três alternativas foram comparadas em relação a cada critério. A consistência dos julgamentos foi verificada através do Índice de Consistência (IC). Os resultados detalhados desta análise, incluindo as matrizes de comparação e o ranking final, são apresentados no Capítulo 4.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo dedica-se à apresentação dos dados e resultados empíricos obtidos ao longo dos ciclos de desenvolvimento do projeto, conforme a metodologia descrita no Capítulo 3. Os resultados aqui expostos servem como a base quantitativa e qualitativa para as análises, discussões e decisões de projeto que serão aprofundadas nos capítulos subsequentes.

### 4.1 Resultados do ciclo 1 - testes com alimentação por gravidade

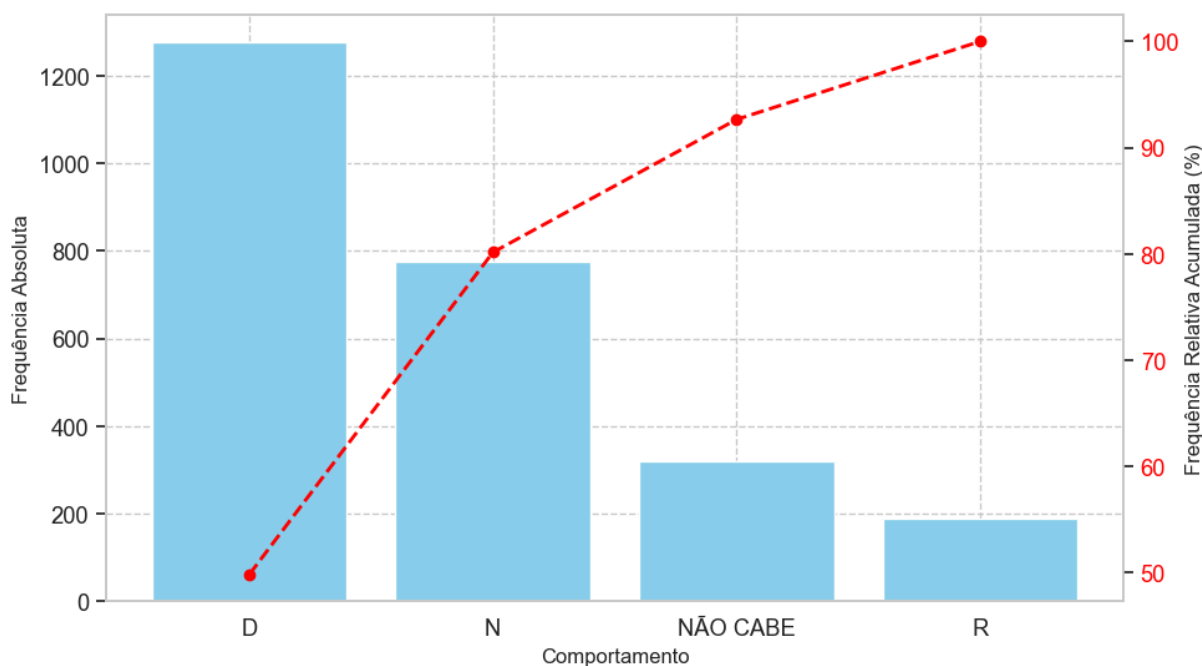
O primeiro ciclo de investigação teve como objetivo validar a viabilidade de um sistema de alimentação baseado em gravidade, a concepção mais simples e de menor custo. Os resultados obtidos, tanto em testes controlados com frutos individuais quanto em ensaios com alimentação em lote, foram cruciais para a compreensão aprofundada do problema e para a evolução da concepção do projeto.

#### 4.1.1 Análise do Comportamento de Frutos em Calha

O primeiro experimento investigou a influência de variáveis controladas (inclinação da calha, ponto de soltura e orientação do fruto) sobre o comportamento de escoamento. Para cada lançamento, o resultado foi categorizado como Deslizou (D), Não completou a queda (N), Rolou (R) ou NÃO CABE.

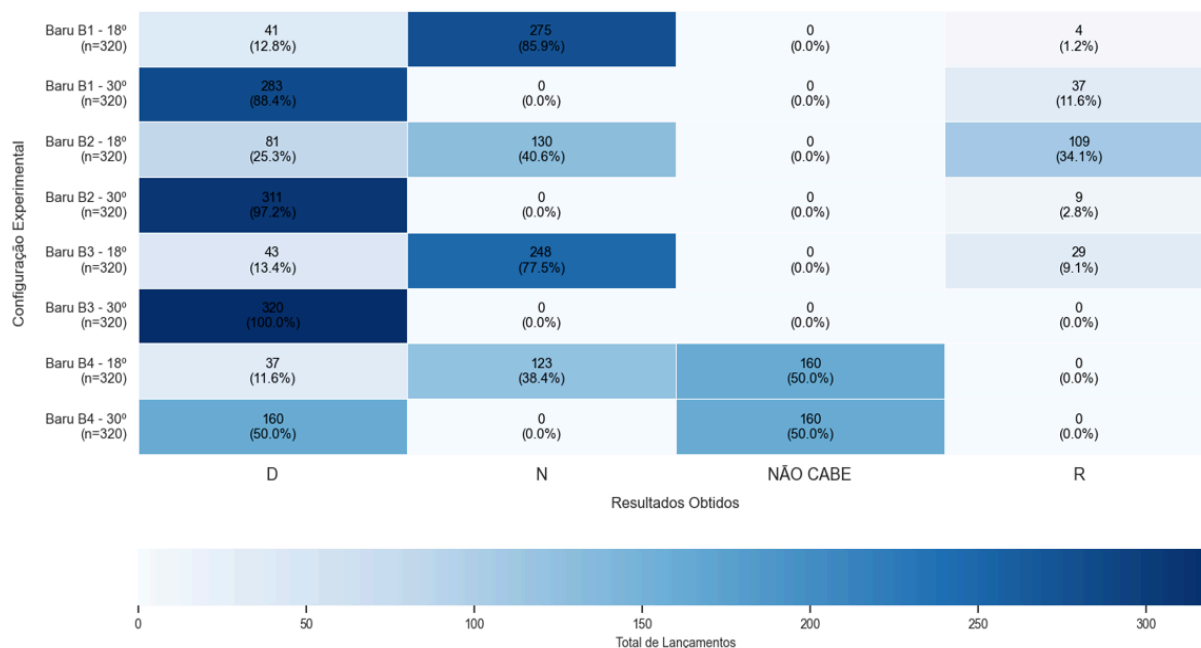
Os resultados apresentados nesta seção são uma síntese e análise dos dados coletados nos ensaios de escoamento em calha. O conjunto de dados brutos, contendo o registro de cada um dos lançamentos realizados, encontra-se disponível para consulta no Apêndice D.

A análise de frequência dos comportamentos, ilustrada pelo Gráfico de Pareto (Figura 8), revela que "Deslizar" e "Não completar a queda" foram os eventos mais recorrentes, somando mais de 80% das observações. Este resultado inicial já indicava que o principal desafio de engenharia do sistema residia em maximizar a condição de fluxo desejada (deslizamento) e, crucialmente, eliminar a principal causa de falha (o travamento).

**Figura 8** - Gráfico de Pareto dos Comportamentos Observados

Fonte: O autor (2025).

A análise consolidada dos resultados, apresentada no heatmap da Figura 9, permite uma visualização clara da influência da inclinação. Observa-se que na inclinação de 18°, a ocorrência de "Não completou a queda" (N) é predominante para a maioria dos tipos de Baru, indicando travamento severo. Em contrapartida, na inclinação de 30°, o comportamento de "Deslizou" (D) torna-se o mais frequente, validando-a como superior para promover o fluxo. Contudo, a persistência do resultado "NÃO CABE" para os frutos maiores (Baru B4), mesmo a 30°, aponta para uma limitação dimensional crítica da calha de teste.

**Figura 9** - Heatmap de Frequência Absoluta dos Resultados por Configuração

Fonte: O autor (2025).

Para validar estatisticamente essas observações, foram realizados testes Qui-quadrado de independência. Esta ferramenta estatística avalia se existe uma associação significativa entre duas variáveis categóricas. Os resultados, apresentados na Tabela 2, confirmaram que todas as variáveis controladas possuem uma influência estatisticamente significativa sobre o comportamento dos frutos, pois em todos os casos o p-valor obtido foi inferior ao nível de significância de 0,05. Isso significa que a associação observada entre as variáveis (ex: inclinação e comportamento de fluxo) é extremamente improvável de ter ocorrido por mero acaso. A inclinação da calha, em particular, demonstrou ser o fator mais determinante para o sucesso do escoamento, reforçando que um ângulo maior é essencial para superar as forças de atrito e promover o movimento.

**Tabela 2** - Resumo dos Resultados do Teste Qui-quadrado

<b>Variável Analisada</b>	<b>Valor de Chi<sup>2</sup> (Estatística do Teste)</b>	<b>p-valor</b>	<b>Conclusão Estatística (<math>\alpha = 0,05</math>)</b>
<b>Inclinação da Calha</b>	1420,93	< 0,001	Altamente Significativo
<b>Ponto de Soltura</b>	113,59	< 0,001	Altamente Significativo
<b>Lado (Orientação)</b>	497,73	< 0,001	Altamente Significativo

Fonte: O autor (2025).

#### 4.1.2 Avaliação do Sistema de Alimentação em Lote e do Dosador de Engrenagem

O segundo experimento avaliou o sistema em condições de alimentação em lote, com a calha carregada e fechada. Os resultados desta análise, de natureza qualitativa, foram conclusivos: a concepção de alimentação em lote é funcionalmente inviável para o Baru.

Durante os testes, foi possível observar que o carregamento da calha com múltiplos frutos resultou na formação imediata e repetida de arcos estruturais autoportantes. Esses arcos acabavam bloqueando totalmente o escoamento do material, comprometendo o fluxo contínuo esperado.. Este fenômeno é conhecido na mecânica dos sólidos granulados como encavalamento (ou *arching*), e ocorre quando as partículas, devido ao atrito entre si e com as paredes do contentor, transmitem as forças de forma a criar uma "ponte" ou "arco" estável que suporta o peso do material acima, impedindo a descarga. A teoria de fluxo de sólidos, consolidada por Jenike (1964), estabelece que a formação de arcos estáveis é altamente dependente da geometria do escoamento, das propriedades de atrito das partículas e da razão entre o diâmetro da saída e o tamanho característico da partícula. No caso do Baru, sua forma irregular e alta variabilidade dimensional exacerbaram drasticamente a tendência à formação desses arcos.

A presença de uma chapa superior, que restringia o espaço livre, agravou o problema ao aumentar as tensões internas na massa de frutos, intensificando as forças de atrito e facilitando ainda mais a formação dos arcos de bloqueio.

Adicionalmente, a introdução de um dosador mecânico (engrenagem) na saída da calha mostrou-se contraproducente. Em vez de ordenar o fluxo, o mecanismo atuou como um ponto de obstrução adicional, aumentando a frequência e a severidade dos bloqueios. Isso ocorre porque, em um sistema de fluxo em massa (*mass flow*), a pressão sobre a saída é crítica; um obstáculo mecânico pode alterar a distribuição de tensões e induzir o encavalamento precisamente onde o fluxo deveria ser liberado. O sistema falhou em operar de forma previsível devido à grande variabilidade no tamanho e na disposição dos frutos, que impediam o encaixe adequado na engrenagem.

Dessa forma, os resultados deste ciclo demonstraram que a falha do sistema, na configuração avaliada, não reside na ausência de um dosador, mas na própria premissa da alimentação por lote em uma calha de geometria simples. Esta constatação empírica, alinhada com a teoria clássica de fluxo de sólidos, serviu como o principal direcionador para o pivô estratégico adotado no Ciclo 2, focado em sistemas de alimentação contínua.

O segundo experimento avaliou o sistema em condições de alimentação em lote (Figura 10). Os resultados desta análise, de natureza qualitativa, foram conclusivos: a concepção de alimentação em lote é funcionalmente inviável para o baru.

**Figura 10** – Condição inicial do ensaio de alimentação em lote, com a calha carregada com frutos de baru.



Fonte: O autor (2025).

Observou-se a formação imediata e recorrente de arcos estruturais que bloqueavam o fluxo, fenômeno conhecido como encavalamento (Figura 11).

**Figura 11** – Evidência do fenômeno de encavalamento (arching). A imagem (a) mostra uma vista superior do bloqueio, enquanto a (b) detalha o intertravamento mecânico dos frutos que impede o fluxo gravitacional.



Fonte: O autor (2025).

A introdução do dosador mecânico (Figura 12) na saída da calha mostrou-se contraproducente, atuando como um ponto de obstrução adicional e aumentando a severidade dos bloqueios.

**Figura 12** – Detalhe do dosador de engrenagem obstruindo a saída e agravando o travamento do fluxo.



Fonte: O autor (2025).

Houve momentos pontuais, com baixa carga de frutos, em que o dosador liberou um fruto de forma isolada, conforme idealizado em seu conceito. Contudo, esses eventos foram exceções e não representam o desempenho do sistema sob condições operacionais reais. A análise detalhada desta observação será aprofundada no Capítulo 5 (Discussões).

## **4.2 Resultados do ciclo 2 - seleção da concepção de alimentação contínua**

Após a invalidação do conceito de alimentação por lote, o segundo ciclo de desenvolvimento focou-se em selecionar a melhor alternativa para um sistema de alimentação contínua. Utilizando o método AHP, foi possível ponderar os critérios de projeto e avaliar as alternativas conceituais de forma estruturada e racional.

### **4.2.1 Ponderação dos Critérios de Projeto via AHP**

O primeiro passo consistiu em definir a importância relativa entre os cinco critérios de avaliação estabelecidos na metodologia. A atribuição de pesos foi orientada pela realidade da agricultura familiar, para a qual o protótipo se destina, buscando alinhar o projeto às condições socioeconômicas e operacionais do público-alvo.

No contexto do pequeno produtor, o Custo de Fabricação foi definido como o

critério de maior peso. A literatura sobre mecanização agrícola no Brasil aponta consistentemente que "o alto custo para aquisição de máquinas e implementos" é uma das principais barreiras para a adoção de novas tecnologias por agricultores familiares, limitando o acesso à modernização e à competitividade (OLIVEIRA; SOUZA, 2016). Dessa forma, para que uma inovação seja viável e passível de ser adotada, seu custo de aquisição deve ser o principal fator a ser otimizado, justificando sua prioridade sobre os demais critérios.

Os critérios de robustez e facilidade de manutenção são frequentemente apontados como prioridades equivalentes ao desenvolver tecnologias sociais para a agricultura familiar. É fundamental que essas tecnologias — muitas vezes implementadas em regiões com assistência técnica escassa — sejam simples, duráveis e reparáveis pelo próprio produtor. Equipamentos concebidos com materiais robustos que resistam às condições de campo, e projetados para permitir a manutenção básica realizada pelo usuário final, são determinantes para a sustentabilidade da tecnologia e sua efetiva apropriação pelos agricultores. (adaptado de Silva et al., 2024<sup>1</sup>; Revista Espaços, 2015)

Por fim, a Eficiência na Dosagem e a Facilidade de Limpeza, embora funcionalmente importantes, foram consideradas secundárias. A eficiência, associada a um aumento significativo de custo ou complexidade mecânica, perde atratividade no contexto analisado. A limpeza, apesar de ser um requisito relevante devido à polpa aderente do Baru, é uma tarefa operacional que pode ser contornada com procedimentos e um bom projeto de superfícies, sendo menos crítica que a viabilidade econômica e a confiabilidade do equipamento.

Esses julgamentos técnicos, que priorizam a viabilidade econômica e a autonomia do produtor, foram traduzidos para a matriz de comparação paritária apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3** - Matriz de Comparação Paritária para os Critérios de Avaliação

<b>Critério</b>	<b>Custo Fab.</b>	<b>Eficiência Dos.</b>	<b>Facil. Manut.</b>	<b>Robustez</b>	<b>Facil. Limpeza</b>
<b>Custo Fab.</b>	1	3	2	2	4
<b>Eficiência Dos.</b>	1/3	1	1/2	1/2	2
<b>Facil. Manut.</b>	1/2	2	1	1	3
<b>Robustez</b>	1/2	2	1	1	3
<b>Facil. Limpeza</b>	1/4	1/2	1/3	1/3	1

Fonte: O autor (2025).

A partir desta matriz, foi calculado o vetor de prioridades (pesos) para cada critério, conforme apresentado na Tabela 3. O cálculo resultou em um Índice de Consistência (IC) de 0,02 e uma Razão de Consistência (RC) de 1,8%. Como o valor da RC é muito inferior ao limite de 10%, os julgamentos são considerados consistentes e confiáveis.

**Tabela 4** - Vetor de Prioridades (Pesos) dos Critérios

<b>Critério de Avaliação</b>	<b>Peso Resultante</b>
Custo de Fabricação	37,1%
Robustez e Confiabilidade	22,7%
Facilidade de Manutenção	22,7%
Eficiência na Dosagem	11,5%
Facilidade de Limpeza	6,0%
Total	100%

Fonte: O autor (2025).

A análise quantitativa confirma que o Custo de Fabricação é o fator mais importante, com 37,1% de prioridade, seguido por Robustez e Facilidade de Manutenção.

#### 4.2.2 Avaliação e Seleção Final das Alternativas

Com os pesos dos critérios definidos, o passo seguinte foi avaliar as três alternativas conceituais (Esteira com Taliscas, Tambor Alveolado e Alimentador Vibratório) em relação a cada um dos critérios. Após a realização das comparações paritárias para cada critério, os resultados foram sintetizados e ponderados, gerando um ranking de prioridade global.

A Tabela 4 consolida o resultado final da análise AHP, apresentando a pontuação de cada alternativa e sua classificação.

**Tabela 5** - Ranking Final das Alternativas Conceituais

<b>Alternativa</b>	<b>Pontuação Global</b>	<b>Classificação</b>
1. Esteira Transportadora com Taliscas	45,5%	1º Lugar
2. Tambor Rotativo Alveolado	31,3%	2º Lugar
3. Alimentador Vibratório Linear	23,2%	3º Lugar

Fonte: O autor (2025).

O resultado da análise AHP aponta a Esteira Transportadora com Taliscas como a concepção mais promissora. O conceito demonstrou o melhor equilíbrio entre os critérios ponderados, destacando-se por seu baixo custo de fabricação e alta robustez, que são os critérios de maior peso. Embora o Alimentador Vibratório apresentasse, teoricamente, maior eficiência na dosagem, seu custo elevado e maior complexidade de manutenção o tornaram menos adequado para o projeto. O Tambor Alveolado, por sua vez, apresentou uma boa performance, mas foi superado pela Esteira em critérios importantes como Custo e Facilidade de Manutenção.

#### 4.2.3 Contextualização e Limitações da Seleção

É fundamental contextualizar o resultado obtido. A análise AHP indica que a "Esteira Transportadora com Taliscas" é a concepção superior dentro do conjunto de três alternativas avaliadas. A qualidade de qualquer processo de decisão multicritério é intrinsecamente dependente da qualidade e da abrangência das alternativas geradas na fase de concepção que o precede (ULLMAN, 2010). Em outras palavras, um método de seleção não pode escolher uma solução que não foi previamente concebida.

O método AHP, especificamente, tem como objetivo principal prover uma estrutura lógica para classificar um conjunto finito e pré-definido de alternativas, e

não garantir que a solução "globalmente ótima" esteja entre elas (TRIANAPHYLLOU; MANN, 1995). O resultado, portanto, não representa uma verdade absoluta, mas sim a decisão mais racional e justificada com base no conhecimento e nas opções disponíveis nesta etapa do projeto.

Dessa forma, a seleção da Esteira Transportadora com Taliscas deve ser entendida como a definição do caminho mais promissor para o detalhamento técnico e a prototipagem, reconhecendo-se que futuras iterações ou uma exploração mais ampla do espaço de soluções poderiam, hipoteticamente, identificar outros conceitos viáveis.

## **5 DISCUSSÕES**

A apresentação dos resultados no capítulo anterior fornece a base empírica sobre a qual o projeto foi desenvolvido. No entanto, é na discussão aprofundada desses resultados que o conhecimento é gerado, conectando os dados observados com a fundamentação teórica e extraíndo os aprendizados que guiaram a evolução da concepção. Este capítulo dedica-se a essa análise interpretativa.

### **5.1 Implicações do Ciclo Experimental 1: Limitações do Fluxo por Gravidade em Alimentação por Lote**

Os resultados do primeiro ciclo de testes foram fundamentais para o sucesso do projeto, pois permitiram a transição de uma concepção baseada em suposições para uma abordagem informada por evidências. A dificuldade de escoamento observada no sistema de alimentação em lote não invalida o princípio da gravidade como um todo, mas revela as limitações críticas de uma abordagem específica quando aplicada a um material de alta complexidade como o Baru.

O principal fenômeno observado foi o encavalamento (arching), e a análise dos resultados, à luz da teoria de fluxo de sólidos (JENIKE, 1964), permite concluir que sua ocorrência é exacerbada pela combinação de fatores intrínsecos ao Baru: a morfologia irregular, a alta variabilidade dimensional e o elevado coeficiente de atrito. Esses fatores, em conjunto, promovem um intertravamento mecânico que cria pontes estáveis, capazes de resistir ao fluxo gravitacional na geometria de calha testada.

Neste contexto, a falha do dosador de engrenagem foi particularmente instrutiva. A tentativa de controlar a vazão na saída de uma calha já propensa ao encavalamento demonstrou que a simples adição de um componente de controle não resolve o problema fundamental. Pelo contrário, a obstrução na saída intensificou as tensões na massa de frutos, agravando os bloqueios.

Portanto, a grande lição do Ciclo 1 não é que a gravidade é ineficaz, mas sim que a abordagem de alimentação em lote em calha simples é inadequada para o Baru. Os resultados sugerem fortemente que, para que um sistema gravitacional seja viável, ele provavelmente necessitaria de geometrias mais complexas (como

ângulos de funil otimizados e saídas maiores) ou de sistemas assistidos (como vibração ou agitação mecânica) para quebrar os arcos de bloqueio. Diante da necessidade de uma solução mais robusta e previsível, optou-se por explorar, no Ciclo 2, sistemas de alimentação ativa que eliminam a causa-raiz do problema ao não permitirem a formação de uma coluna de material acumulado.

## 5.2 Validação da concepção selecionada no ciclo 2

A seleção da Esteira Transportadora com Taliscas como o conceito mais promissor, conforme o resultado da análise AHP (Tabela 4), não é um resultado arbitrário, mas uma consequência direta da ponderação dos critérios de projeto e, principalmente, uma resposta aos desafios empíricos revelados no Ciclo 1. A superioridade desta alternativa reside em seu equilíbrio entre os requisitos e sua capacidade de mitigar os problemas fundamentais do manuseio do Baru.

A análise da concepção em relação aos critérios de maior peso justifica sua escolha:

- **Custo de Fabricação (Peso: 37,1%):** A esteira transportadora se destaca como a solução de menor custo potencial. Sua construção baseia-se em componentes de mercado amplamente disponíveis (correia, roletes, motorreductor) e em uma estrutura de montagem simples, que não exige usinagem de alta precisão. Em contraste, o Tambor Alveolado demandaria a fabricação de um componente customizado e preciso, enquanto o Alimentador Vibratório requer um acionamento eletromagnético especializado, ambos de custo significativamente mais elevado, o que os torna menos alinhados com a realidade da agricultura familiar (OLIVEIRA; SOUZA, 2016).
- **Robustez e Confiabilidade (Peso: 22,7%):** A esteira é um sistema mecanicamente simples e robusto. O uso de taliscas (aletas) garante um transporte positivo, ou seja, o movimento do fruto não depende de fatores variáveis como atrito ou vibração, mas sim do deslocamento físico da aleta. Isso torna o sistema inerentemente mais confiável e menos suscetível a falhas causadas pela variabilidade de massa e formato do Baru. O Tambor Alveolado, por sua vez, correria o risco de travamento caso os frutos não se encaixassem perfeitamente nos alvéolos, e o Alimentador Vibratório poderia ter seu desempenho afetado por variações de carga.

- Facilidade de Manutenção (Peso: 22,7%): A simplicidade mecânica da esteira se traduz em facilidade de manutenção. Componentes de desgaste, como a própria correia e os rolamentos, são padronizados e de fácil substituição, permitindo que o próprio operador realize reparos básicos. Esta característica é um fator crítico para a autonomia do produtor e a sustentabilidade da tecnologia em campo (SILVA; SOUZA; MOURA, 2017).

Mais importante do que a pontuação nos critérios é a capacidade da Esteira Transportadora de resolver os problemas específicos identificados nos testes:

1. Solução para o encavalamento: Ao transportar os frutos de forma individualizada ou em pequenos grupos desde o fundo de um reservatório, a esteira elimina a formação de uma coluna de frutos acumulados. Sem essa massa coesa, as condições necessárias para a formação de arcos de bloqueio (encavalamento) não existem. A concepção ataca a causa-raiz do problema, em vez de tentar remediar seus sintomas.
2. Mitigação da aderência da polpa: O design aberto de uma esteira facilita a limpeza. Além disso, o material da correia pode ser selecionado especificamente por suas propriedades antiaderentes (como o poliuretano de grau alimentício), minimizando o acúmulo de resíduos da polpa pegajosa.
3. Resposta à Variabilidade Dimensional ("NÃO CABE"): O sistema de esteira com taliscas é inerentemente mais tolerante à variação de tamanho do que o Tambor Alveolado, cujos alvéolos possuem geometria fixa. As taliscas simplesmente empurram os frutos, independentemente de suas dimensões exatas, garantindo que mesmo os frutos maiores sejam transportados, resolvendo o problema de "NÃO CABE" observado na calha de teste.

Dessa forma, a validação da Esteira Transportadora com Taliscas não se baseia apenas em sua pontuação superior no método AHP, mas em sua comprovada adequação para superar os desafios práticos e únicos impostos pelo beneficiamento do Baru, tornando-a a escolha mais racional e robusta para a próxima fase de detalhamento do projeto.

### **5.3 Diálogo com a literatura e originalidade do projeto**

Ao comparar os achados deste trabalho com as tecnologias existentes revisadas no Capítulo 2, torna-se evidente a contribuição e a originalidade da

solução proposta. A literatura mostra que, para outras culturas como café, açaí e diversas nozes, o uso de sistemas de alimentação contínua (esteiras, roscas, vibradores) é um princípio de engenharia consolidado para garantir a eficiência em processos de beneficiamento em larga escala (SILVA et al., 2024; BERTOLLO, 2022). No entanto, a aplicação direta dessas tecnologias ao Baru se mostra inadequada devido às especificidades do fruto, que foram o foco da investigação experimental deste projeto.

A principal lacuna que este trabalho aborda não reside na ausência de transportadores contínuos no mercado, mas sim na ausência de uma solução que resolva o problema fundamental do fluxo do Baru: o encavalamento. As tecnologias existentes são, em sua maioria, projetadas para materiais com maior grau de uniformidade e fluidez. Os experimentos do Ciclo 1 demonstraram de forma conclusiva que a morfologia irregular, a alta variabilidade dimensional e o atrito superficial do Baru o tornam um material extremamente propenso ao travamento, um desafio que sistemas genéricos não são projetados para superar.

A originalidade deste trabalho, portanto, não está na invenção da esteira transportadora, mas em dois aspectos fundamentais:

1. Diagnóstico Preciso do Problema Central: A contribuição inicial e mais significativa foi a validação empírica de que a alimentação em lote por gravidade é inviável. Ao identificar e nomear o fenômeno de encavalamento como a causa-raiz da falha, o projeto deixou de ser uma simples busca por um mecanismo de transporte para se tornar a busca por uma solução de engenharia para um problema específico e complexo de mecânica de sólidos granulados.
2. Concepção de uma Solução Específica e Justificada: A solução selecionada, a "Esteira Transportadora com Taliscas", é uma resposta direta e customizada aos problemas diagnosticados. As taliscas (aletas) não apenas transportam, mas garantem um transporte positivo e forçado, quebrando ativamente qualquer tendência de formação de arcos de bloqueio. O sistema foi concebido para ser inerentemente tolerante à variabilidade dimensional do fruto, um problema que, como visto nos testes, afeta severamente outros tipos de mecanismos. A aplicação rigorosa do método AHP para justificar essa escolha, ponderando

critérios como custo e robustez, alinha a solução técnica às necessidades socioeconômicas da agricultura familiar, distanciando-a de soluções genéricas e de alto custo.

Enquanto o trabalho de Franz e Sano (2015) representou um avanço ao mecanizar a quebra manual, ele ainda dependia de uma alimentação individualizada. O presente projeto avança ao propor uma concepção para a *automação da alimentação*, superando o principal obstáculo físico que impedia essa automação. Dessa forma, este TCC contribui com conhecimento original ao diagnosticar o problema de fluxo do Baru e ao propor uma solução de engenharia específica, justificada e alinhada ao seu contexto de aplicação.

## **6 CONCLUSÃO**

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver a concepção de um sistema de alimentação para um protótipo de máquina de quebrar endocarpo de Baru, com foco nos requisitos de simplicidade construtiva, baixo custo e adequação ao contexto da agricultura familiar. A seguir, são apresentadas as conclusões obtidas, as contribuições do estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

### **6.1 Síntese dos resultados e objetivos alcançados**

Os objetivos específicos delineados no início da pesquisa foram alcançados por meio de uma metodologia de projeto iterativa, estruturada em dois ciclos de concepção e teste. A investigação inicial, focada em um sistema de alimentação por gravidade, demonstrou empiricamente que esta abordagem é inviável. A alta variabilidade morfológica do Baru e seu coeficiente de atrito levaram à ocorrência severa do fenômeno de encavalamento, bloqueando o fluxo de forma recorrente e invalidando o conceito de alimentação em lote. Este achado, embora negativo em relação à hipótese inicial, representou um avanço crucial no entendimento do problema.

Com base nesse aprendizado, um segundo ciclo de desenvolvimento foi iniciado, redefinindo o problema para a busca de um sistema de alimentação contínua. Foram geradas novas alternativas conceituais e, por meio da aplicação do método de decisão multicritério AHP, a concepção da Esteira Transportadora com Taliscas foi selecionada como a mais promissora. A análise AHP, que priorizou critérios como Custo de Fabricação, Robustez e Facilidade de Manutenção, garantiu que a solução técnica escolhida estivesse alinhada com as restrições socioeconômicas do público-alvo. Dessa forma, o objetivo geral de conceber um sistema viável e justificado foi plenamente atingido.

### **6.2 Contribuições e limitações do trabalho**

A principal contribuição deste estudo reside na geração de conhecimento empírico original sobre o comportamento de fluxo do fruto do Baru. A identificação e documentação do encavalamento como o principal obstáculo para a mecanização da alimentação preenche uma lacuna na literatura técnica e fornece uma base sólida para futuros projetos na área.

Metodologicamente, o trabalho se destaca pela aplicação de um processo de projeto iterativo, que demonstra como a prototipagem e os testes, mesmo em fases preliminares, são essenciais para refinar a compreensão do problema e guiar o desenvolvimento para soluções mais robustas e eficazes.

Reconhece-se, contudo, as limitações deste estudo. O escopo do trabalho está restrito à fase de concepção e seleção conceitual. A concepção selecionada foi validada por meio de uma análise teórica e de decisão (AHP), mas ainda não foi submetida à construção de um protótipo físico ou a testes de desempenho em campo. Os dados experimentais, embora rigorosamente coletados, foram obtidos em ambiente de laboratório e com um número limitado de amostras.

### **6.3 Trabalhos futuros**

As conclusões e limitações deste trabalho abrem caminho para diversas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento futuro. As recomendações para a continuidade do projeto são:

1. **Detalhamento Técnico do Projeto:** A próxima etapa natural é o desenvolvimento do projeto detalhado do sistema de "Esteira Transportadora com Taliscas" utilizando software de modelagem CAD. Esta fase deverá incluir o dimensionamento preciso de todos os componentes, a seleção de materiais e a especificação de elementos de máquina padronizados.
2. **Construção e Validação do Protótipo:** Com base no projeto detalhado, a construção de um protótipo funcional é essencial. Este protótipo deverá ser submetido a um novo ciclo de testes para validar seu desempenho em critérios como vazão de alimentação, confiabilidade, consumo de energia e eficiência na dosagem.
3. **Análise Econômica Aprofundada:** Realizar um estudo de viabilidade econômica detalhado, incluindo o custo de fabricação do protótipo, o preço estimado de venda e a análise do retorno sobre o investimento para o agricultor familiar.
4. **Integração com o Sistema de Quebra:** Desenvolver e integrar o sistema de alimentação concebido a um mecanismo de quebra, visando à criação de uma unidade de beneficiamento completa, desde a alimentação até a separação da amêndoa.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BACK, Nelson. Metodologia de projeto de produtos industriais. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
- [2] BACK, Nelson; MORGAN, Nelson; KOBLITZ, André. Desenvolvimento integrado de produtos: planejamento, projeto e desenvolvimento de produtos industriais. Barueri: Manole, 2008.
- [3] SAATY, Thomas L.; VARGAS, Luis G. \*Models, methods, concepts & applications of the Analytic Hierarchy Process\*. 2. ed. New York: Springer, 2012.
- [4] Saaty, T. L. (1991), “Método de Análise Hierárquica”, Tradução de Wainer da Silveira e Silva, McGraw-Hill, Makron, São Paulo, SP.
- [5] ALMEIDA, S. P. et al. Cerrado: espécies vegetais úteis. Planaltina, DF: EMBRAPA-CPAC, 1998.
- [6] MELHEM, T. S. Embriologia de Leguminosas do Brasil: Sub-família Papilionoideae. Boletim de Botânica, USP, n. 2, p. 73–157, 1974.
- [7] VALLILO, M. I. et al. Composição química do mesocarpo do Baru (*Dipteryx alata* Vog.). Ciência e Tecnologia de Alimentos, 1990.
- [8] ALVES, A. M. et al. Alterações físico-químicas da polpa de Baru durante o armazenamento. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, 2010.
- [9] ROCHA, R. L.; SANTIAGO, M. C. P. A. Utilização de polpa de Baru em pães integrais. Revista de Nutrição, 2009.
- [10] LIMA, A. J. B. et al. Aplicação de resíduos agroindustriais na formulação de barra de cereais. Alimentos e Nutrição, 2010.

[11] CARRAZA, L. G.; ÁVILA, M. R. Caracterização de frutos de Baru e rendimento da amêndoa. Revista Cerrado, 2010.

[12] RIBEIRO, N. R. et al. Fermentação de polpa de Baru para produção de bebidas alcoólicas. Ciência Rural, 2011

[13] BERTOLLO. Produção de açaí: conheça como funciona seu processo industrial. Bertollo Máquinas, 23 fev. 2022. Disponível em: <https://www.bertollo.com.br/blog/producao-de-acai-conheca-o-processo-industrial/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

[14] FRANZ, C. A. B.; SANO, S. M. Equipamento mecânico manual para quebra do Baru e extração de amêndoas. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2015. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 323).

[15] JORNAL DA USP. Máquina faz separação automática das partes do coco babaçu. Jornal da USP, 18 out. 2017. Disponível em: <https://jornal.usp.br/tecnologia/maquina-faz-separacao-automatica-das-partes-do-coco-babacu/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

[16] MADE-IN-CHINA. Almond cracking cracker shelling separating walnut peeling seed separator machine. [s.d.]a. Disponível em: [https://pt.made-in-china.com/co\\_cissyou/product\\_Almond-Cracking-Cracker-Shelling-Separating-Walnut-Peeling-Seed-Separator-Machine\\_esiguehuu.html](https://pt.made-in-china.com/co_cissyou/product_Almond-Cracking-Cracker-Shelling-Separating-Walnut-Peeling-Seed-Separator-Machine_esiguehuu.html). Acesso em: 20 jun. 2025.

[17] MADE-IN-CHINA. Fábrica de fornecedores de máquinas de quebrar amêndoas da China. [s.d.]b. Disponível em: <https://pt.lfbriquettemachine.com/nuts-processing-machine/sheller-machine/almond-cracking-machine.html>. Acesso em: 20 jun. 2025.

[18] METAL SCHILIN. Máquina descascadora de nozes. [s.d.]. Disponível em: <http://www.schilin.com.br/agricola/maquina-descascadora-de-nozes>. Acesso em: 20 jun. 2025.

[19] SILVA, L. D. et al. Beneficiamento e industrialização, 13 mar. 2024. Disponível em: [http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes\\_tecnicas/Cafe\\_na\\_AmazoniaLUISSILVA\\_2.pdf](http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/Cafe_na_AmazoniaLUISSILVA_2.pdf). Acesso em: 20 jun. 2025.

[20] TPMACH. The mechanics of almond shell breaking machine. [s.d.]. Disponível em: <https://pt.tpmach.com/info/the-mechanics-of-almond-shell-breaking-machine-93413683.html>. Acesso em: 20 jun. 2025.

[21] TROPICAL FOOD MACHINERY. Linha de extração de polpa de açaí. [s.d.]. Disponível em: [https://www.tropicalfood.com.br/produto.php?lingua=pt&id\\_produto=227](https://www.tropicalfood.com.br/produto.php?lingua=pt&id_produto=227). Acesso em: 20 jun. 2025.

[22] JENIKE, A. W. Storage and flow of solids. Bulletin 123 of the Utah Engineering Experiment Station, Salt Lake City, v. 53, n. 26, 1964.

[23] OLIVEIRA, R. de; SOUZA, R. de C. de. Dificuldades de mecanização agrícola na agricultura familiar brasileira. Revista Univap, v. 22, n. 40, p. 556-563, dez. 2016. Disponível em: <https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/1727>. Acesso em: 27 jun. 2025.

[24] SILVA, Raíana C. S. (2024). Tecnologias sociais para agricultura familiar: uma revisão sistemática da literatura. IFMG – Trabalho de Conclusão de Curso.

[25] TRIANTAPHYLLOU, E.; MANN, S. H. Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges. *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, v. 2, n. 1, p. 35–44, 1995.

Disponível em:

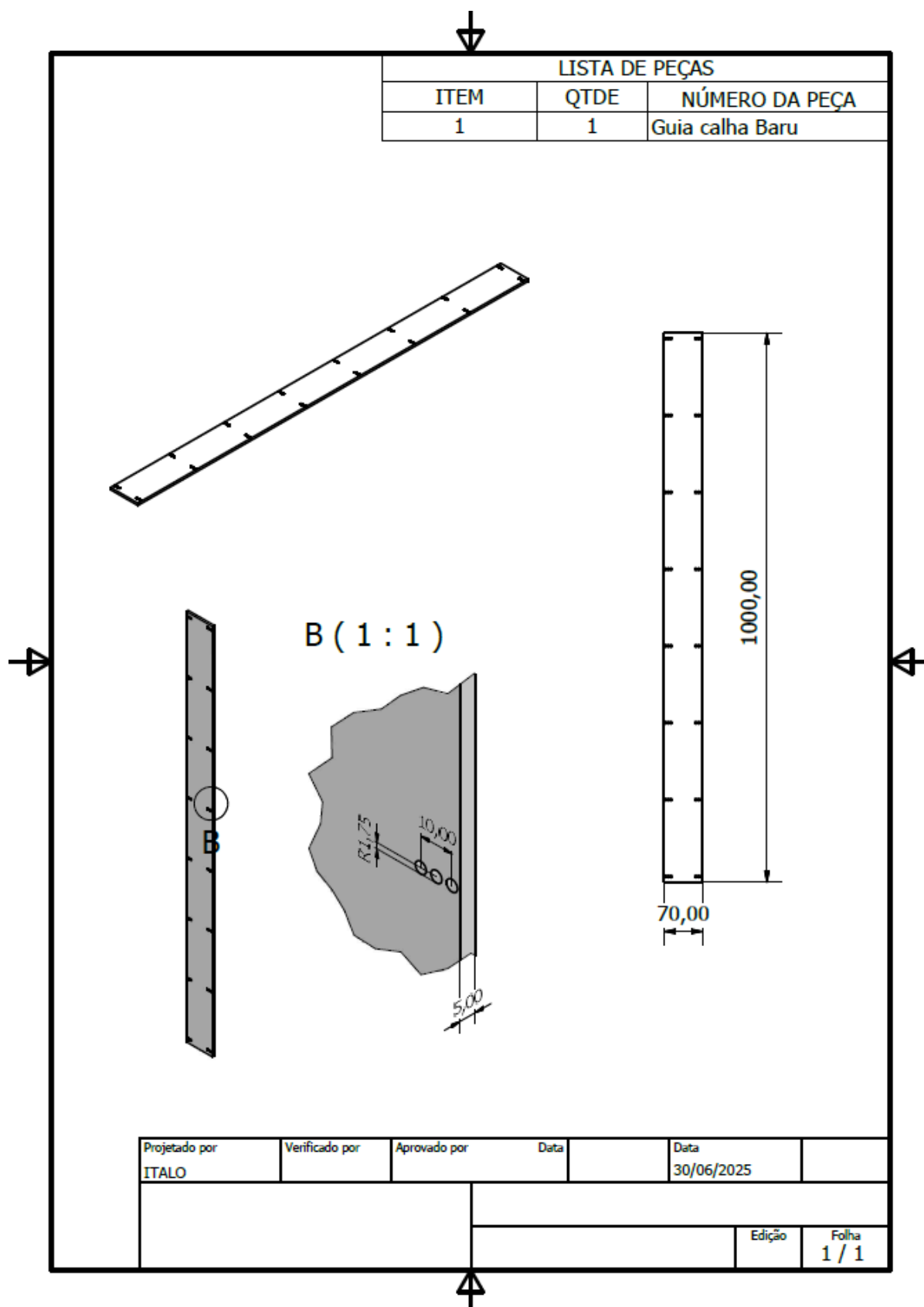
[https://www.researchgate.net/publication/241416054\\_Using\\_the\\_analytic\\_hierarchy\\_process\\_for\\_decision\\_making\\_in\\_engineering\\_applications\\_Some\\_challenges](https://www.researchgate.net/publication/241416054_Using_the_analytic_hierarchy_process_for_decision_making_in_engineering_applications_Some_challenges).

Acesso em: 18 jun. 2025.

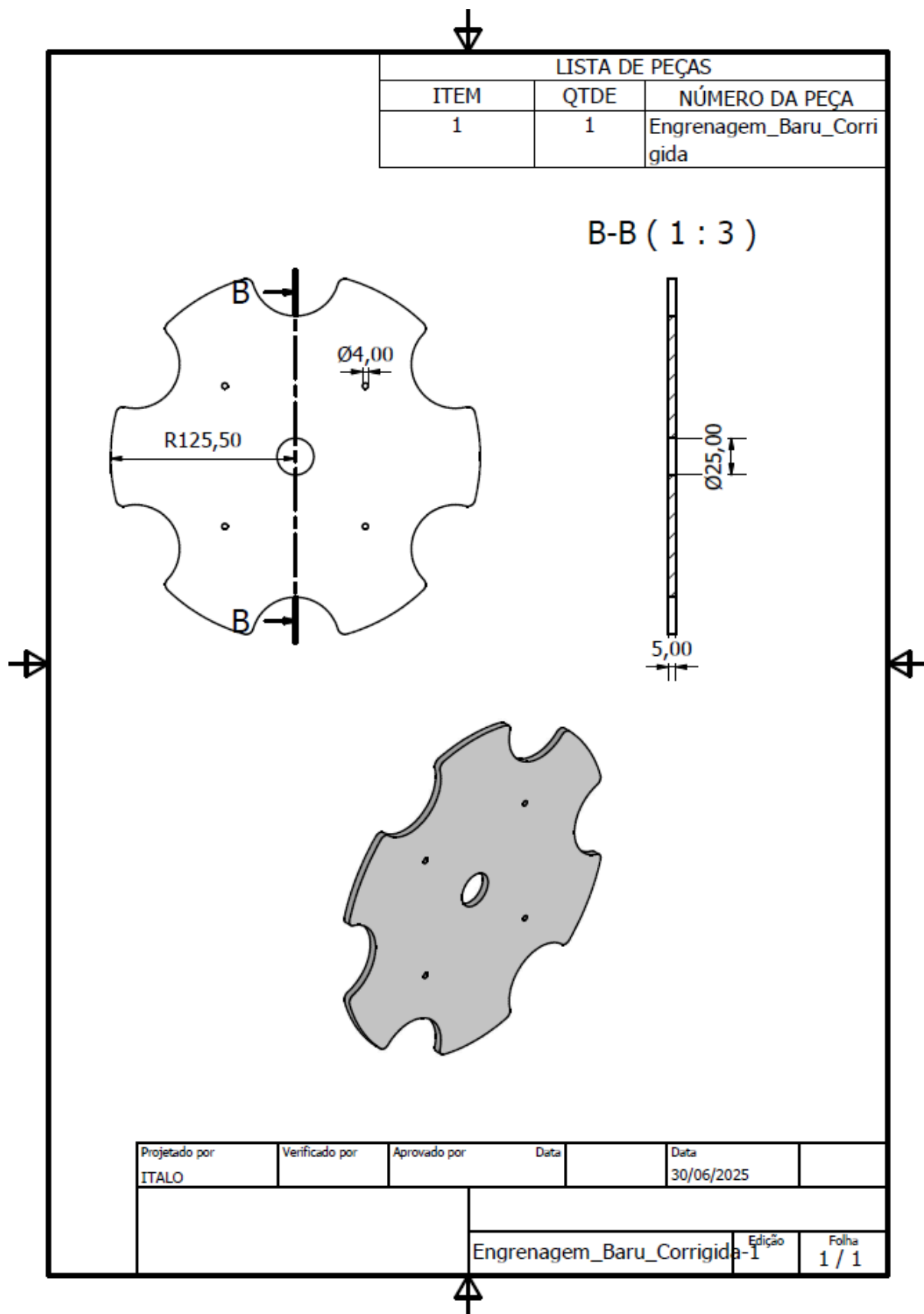
[26] ULLMAN, D. G. *The mechanical design process*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

## 8 APÊNDICES

## APÊNDICE A – PROJETO TÉCNICO DA CALHA DE TESTES



## APÊNDICE B – PROJETO TÉCNICO DO DOSADOR DE ENGRENAGEM



## APÊNDICE C – SCRIPT PYTHON PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ENSAIOS

```
# Bibliotecas de análise e visualização

import pandas as pd

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

import seaborn as sns

from matplotlib.colors import LinearSegmentedColormap,
Normalize

from matplotlib.cm import ScalarMappable

# Estatística e modelagem

from scipy.stats import chi2_contingency

from sklearn.model_selection import train_test_split

from sklearn.linear_model import LogisticRegression

from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier

from sklearn.metrics import classification_report

# =====

# 1. CARREGAMENTO E LIMPEZA DOS DADOS

# =====

print("\n" + "="*50)

print("1. CARREGAMENTO E LIMPEZA DOS DADOS")

print("="*50 + "\n")

# Carrega o arquivo CSV usando ponto e vírgula como
delimitador

# O caminho do arquivo deve ser verificado conforme o ambiente
de execução
```

```

df = pd.read_csv("DADOSCOMPILADOS.csv", delimiter=";")

# Converte a coluna 'Altura (H) mm' para numérico,
# substituindo vírgula por ponto

# Isso é necessário pois números com vírgula como decimal são
# comuns em alguns formatos

df["Altura (H) mm"] = df["Altura (H) mm"].str.replace(",",
".").astype(float)

# Transforma o dataframe de formato wide para long

# Cada linha representa uma observação individual em vez de
# contagens agregadas

df_melted = df.melt(
    id_vars=["Inclinação", "Posição (X) mm", "Altura (H) mm",
"Ponto (P)", "Baru", "Lado"],
    var_name="Resultado",
    value_name="Contagem"
)

# Expande as contagens em linhas individuais

# Por exemplo, se uma linha tem Contagem=5 para "Rolou", cria
# 5 linhas com "Rolou"

df_expanded = df_melted.loc[df_melted.index.repeat(df_melted["Contagem"])]
df_expanded.reset_index(drop=True)

df_expanded.drop(columns=["Contagem"], inplace=True)

# Exibe informações sobre os dados limpos

print("\n--- Cabeçalho dos Dados Limpos ---")

print(df_expanded.head().to_markdown(index=False))

print("\n--- Informações dos Dados Limpos ---")

```

```

print(df_expanded.info())

# =====

# 2. ANÁLISE ESTATÍSTICA (TESTES QUI-QUADRADO)

# =====

print("\n" + "="*50)

print("2. ANÁLISE ESTATÍSTICA (TESTES QUI-QUADRADO)")

print("="*50 + "\n")

# Teste qui-quadrado para verificar associação entre
# Inclinação e Resultado

print("\n--- Teste Qui-Quadrado para Inclinação ---")

contingency_table_inclination =
pd.crosstab(df_expanded["Inclinação"],
df_expanded["Resultado"])

chi2, p_value, _ =
chi2_contingency(contingency_table_inclination)

print("Tabela de Contingência:\n",
contingency_table_inclination.to_markdown())

print(f"Estatística Qui-Quadrado: {chi2:.2f}")

print(f"P-valor: {p_value:.3f}")

# Teste qui-quadrado para verificar associação entre Ponto de
# Soltura e Resultado

print("\n--- Teste Qui-Quadrado para Ponto de Soltura ---")

contingency_table_ponto = pd.crosstab(df_expanded["Ponto
(P)"], df_expanded["Resultado"])

chi2, p_value, _ =
chi2_contingency(contingency_table_ponto)

print("Tabela de Contingência:\n",
contingency_table_ponto.to_markdown())

```

```

print(f"Estatística Qui-Quadrado: {chi2:.2f}")
print(f"P-valor: {p_value:.3f}")

# Teste qui-quadrado para verificar associação entre Lado
(Orientação) e Resultado

print("\n--- Teste Qui-Quadrado para Lado (Orientação) ---")

contingency_table_lado = pd.crosstab(df_expanded["Lado"],
df_expanded["Resultado"])

chi2, p_value, _, _ = chi2_contingency(contingency_table_lado)

print("Tabela de Contingência:\n",
contingency_table_lado.to_markdown())

print(f"Estatística Qui-Quadrado: {chi2:.2f}")
print(f"P-valor: {p_value:.3f}")

# =====

# 3. MODELAGEM EXPLORATÓRIA (REGRESSÃO LOGÍSTICA E ÁRVORE DE
DECISÃO)

# =====

print("\n" + "="*50)

print("3. MODELAGEM EXPLORATÓRIA")

print("="*50 + "\n")

# Prepara os dados para modelagem

df_model = df_expanded.copy()

# Cria variável binária onde 1 = "Rolou" (R) e 0 = outros
resultados

df_model["Rolou"] = (df_model["Resultado"] == "R").astype(int)

# Seleciona features e aplica one-hot encoding para variáveis
categóricas

```

```
X = df_model[["Inclinação", "Ponto (P)", "Lado", "Altura (H)
mm"]]

X = pd.get_dummies(X, drop_first=True)

y = df_model["Rolou"]

# Divide os dados em conjuntos de treino e teste (70% treino,
30% teste)

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y,
test_size=0.3, random_state=42)

# Modelo de Regressão Logística com balanceamento de classes

print("\n--- Relatório do Modelo de Regressão Logística
(class_weight balanceado) ---")

model_lr = LogisticRegression(max_iter=1000,
class_weight="balanced")

model_lr.fit(X_train, y_train)

y_pred_lr = model_lr.predict(X_test)

report_lr = classification_report(y_test, y_pred_lr)

print(report_lr)

# Modelo de Árvore de Decisão com balanceamento de classes

print("\n--- Relatório do Modelo de Árvore de Decisão
(class_weight balanceado) ---")

model_dt = DecisionTreeClassifier(class_weight="balanced",
random_state=42)

model_dt.fit(X_train, y_train)

y_pred_dt = model_dt.predict(X_test)

report_dt = classification_report(y_test, y_pred_dt)

print(report_dt)

# =====
```

```

# 4. VISUALIZAÇÃO DE DADOS (HEATMAP E PARETO)
# =====

print("\n" + "="*50)
print("4. VISUALIZAÇÃO DE DADOS")
print("="*50 + "\n")

# =====
# =====
# HEATMAP CONSOLIDADO POR BARU E INCLINAÇÃO (VERSÃO MELHORADA)
# =====

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from matplotlib.colors import LinearSegmentedColormap

# 1. CARREGAMENTO E PREPARAÇÃO DOS DADOS
print("1. Carregando e preparando os dados...")

df = pd.read_csv("DADOSCOMPILADOS.csv", delimiter=";",
encoding='utf-8-sig') # encoding para tratar BOM

df["Altura (H) mm"] = df["Altura (H) mm"].str.replace(",",",",
".").astype(float)

# 2. TRANSFORMAÇÃO PARA FORMATO LONG (UM LANÇAMENTO POR LINHA)
print("2. Transformando para formato longo...")

df_melted = df.melt(
    id_vars=["Inclinação", "Posição (X) mm", "Altura (H) mm",
"Ponto (P)", "Baru", "Lado"],

```

```

    var_name="Resultado",
    value_name="Contagem"
)

df_expanded =
df_melted.loc[df_melted.index.repeat(df_melted["Contagem"])].r
eset_index(drop=True)

```

### # 3. AGREGAÇÃO POR BARU E INCLINAÇÃO

```

print("3. Agregando dados por Baru e Inclinação...")

df_aggregated = (
    df_expanded
    .groupby(['Baru', 'Inclinação', 'Resultado'])
    .size()
    .unstack(fill_value=0)
    .reindex(
        pd.MultiIndex.from_product([
            sorted(df_expanded['Baru'].unique()),
            sorted(df_expanded['Inclinação'].unique()),
            sorted(df_expanded['Resultado'].unique()),
            key=lambda x: int(x[:-1])
        ], names=['Baru', 'Inclinação', 'Resultado'])
    )
)

```

### # 4. CÁLCULO DE PERCENTUAIS E ESTATÍSTICAS ADICIONAIS

```

print("4. Calculando estatísticas adicionais...")

total_por_grupo = df_aggregated.sum(axis=1)
df_percent = df_aggregated.div(total_por_grupo, axis=0) * 100

```

### # 5. CONFIGURAÇÃO AVANÇADA DO HEATMAP

```
print("5. Preparando visualização...")

# Paleta de cores personalizada

colors = ["#f7fbff", "#c6dbef", "#6baed6", "#2171b5",
"#08306b"]

cmap = LinearSegmentedColormap.from_list("custom_blue",
colors)

# Texto de anotação (valor absoluto + percentual)

annot = df_aggregated.astype(str) + "\n(" +
df_percent.round(1).astype(str) + "%)"

# 6. VISUALIZAÇÃO FINAL

plt.figure(figsize=(14, 8))

sns.set_style("whitegrid", {'grid.linestyle': '--',
'grid.alpha': 0.3})

sns.set_context("notebook", font_scale=1.2)

ax = sns.heatmap(
    df_aggregated,
    annot=annot,
    fmt="",
    cmap=cmap,
    linewidths=0.5,
    linecolor="white",
    cbar_kws={
        'label': 'Número de Lançamentos',
        'orientation': 'horizontal',
        'pad': 0.15
```

```

    },
    annot_kws={
        "size": 11,
        "color": "black",
        "ha": "center",
        "va": "center"
    },
    square=False
)

# Ajustes estéticos finais
ax.set_title(
    'COMPORTAMENTO DOS BARUS POR ÂNGULO DE
    INCLINAÇÃO\n(Consolidação de Todos os Pontos de Soltura e
    Lados)',
    pad=20,
    fontsize=14,
    fontweight='bold'
)

ax.set_xlabel("Resultados Obtidos", fontsize=12, labelpad=10)
ax.set_ylabel("Configuração Experimental", fontsize=12,
labelpad=15)
ax.set_yticklabels(
    [f"Baru {idx[0]} -
    {idx[1]}\n(n={total_por_grupo.loc[idx]})" for idx in
    df_aggregated.index],
    rotation=0,
    fontsize=11
)

```

```
ax.figure.subplots_adjust(left=0.2, bottom=0.15)
cbar = ax.collections[0].colorbar
cbar.ax.tick_params(labelsize=10)
cbar.ax.set_xlabel('Total de Lançamentos', fontsize=10)

plt.tight_layout()
print("\nVisualização pronta! Exibindo o heatmap...")
plt.show()

# -----
# GRÁFICO DE PARETO
# -----

print("\n--- Gerando Gráfico de Pareto ---")

# Calcula contagens e percentuais
behavior_counts = df_expanded["Resultado"].value_counts()
behavior_percent = behavior_counts / behavior_counts.sum() *
100

# Configura o gráfico
fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(10, 6))

ax1.bar(behavior_counts.index, behavior_counts.values,
color="skyblue")

ax1.set_xlabel("Comportamento", fontsize=12)
ax1.set_ylabel("Frequência Absoluta", fontsize=12)

# Configura o eixo secundário para a linha acumulada
```

```
ax2 = ax1.twinx()
ax2.plot(
    behavior_counts.index,
    behavior_percent.cumsum(),
    color="red",
    marker="o",
    linestyle="--",
    linewidth=2
)
ax2.set_ylabel("Frequência Relativa Acumulada (%)",
              fontsize=12)
ax2.tick_params(axis="y", labelcolor="red")
ax2.grid(False) # Remove grid do eixo secundário

# Adiciona título e ajusta layout
plt.title("Gráfico de Pareto dos Comportamentos Observados",
         pad=15, fontsize=14)
plt.tight_layout()

# Exibe o gráfico
plt.show()
```

APÊNDICE D – DADOS COMPILADOS DOS ENSAIOS DE ESCOAMENTO EM CALHA

Inclinação	Posição (X) mm	Altura (H) mm	Ponto (P)	Baru	Lado	D	N	R	NÃO CABE
18°	155	47,9	PI	B1	L1	10	10	0	0
18°	155	47,9	PI	B1	L2	20	0	0	0
18°	155	47,9	PI	B1	L1T	2	18	0	0
18°	155	47,9	PI	B1	L2T	5	15	0	0
18°	155	47,9	PI	B2	L1	13	5	2	0
18°	155	47,9	PI	B2	L2	11	1	8	0
18°	155	47,9	PI	B2	L1T	12	8	0	0
18°	155	47,9	PI	B2	L2T	17	2	1	0
18°	155	47,9	PI	B3	L1	4	16	0	0
18°	155	47,9	PI	B3	L2	5	14	1	0
18°	155	47,9	PI	B3	L1T	8	12	0	0
18°	155	47,9	PI	B3	L2T	15	4	1	0
18°	155	47,9	PI	B4	L1	0	0	0	20
18°	155	47,9	PI	B4	L2	0	0	0	20
18°	155	47,9	PI	B4	L1T	6	14	0	0
18°	155	47,9	PI	B4	L2T	0	20	0	0
18°	435	134,42	PII	B1	L1	0	20	0	0
18°	435	134,42	PII	B1	L2	1	18	1	0
18°	435	134,42	PII	B1	L1T	0	20	0	0
18°	435	134,42	PII	B1	L2T	0	20	0	0
18°	435	134,42	PII	B2	L1	2	13	5	0

18°	435	134,42	PII	B2	L2	2	11	7	0
18°	435	134,42	PII	B2	L1T	0	16	4	0
18°	435	134,42	PII	B2	L2T	0	17	3	0
18°	435	134,42	PII	B3	L1	0	20	0	0
18°	435	134,42	PII	B3	L2	0	18	2	0
18°	435	134,42	PII	B3	L1T	0	20	0	0
18°	435	134,42	PII	B3	L2T	0	20	0	0
18°	435	134,42	PII	B4	L1	0	0	0	20
18°	435	134,42	PII	B4	L2	0	0	0	20
18°	435	134,42	PII	B4	L1T	0	20	0	0
18°	435	134,42	PII	B4	L2T	0	20	0	0
18°	715	220,95	PIII	B1	L1	0	20	0	0
18°	715	220,95	PIII	B1	L2	1	17	2	0
18°	715	220,95	PIII	B1	L1T	0	20	0	0
18°	715	220,95	PIII	B1	L2T	0	20	0	0
18°	715	220,95	PIII	B2	L1	0	8	12	0
18°	715	220,95	PIII	B2	L2	0	0	20	0
18°	715	220,95	PIII	B2	L1T	2	13	5	0
18°	715	220,95	PIII	B2	L2T	1	9	10	0
18°	715	220,95	PIII	B3	L1	0	18	2	0
18°	715	220,95	PIII	B3	L2	5	10	5	0
18°	715	220,95	PIII	B3	L1T	0	19	1	0
18°	715	220,95	PIII	B3	L2T	2	14	4	0
18°	715	220,95	PIII	B4	L1	0	0	0	20
18°	715	220,95	PIII	B4	L2	0	0	0	20
18°	715	220,95	PIII	B4	L1T	4	16	0	0

18°	715	220,95	PIII	B4	L2T	1	19	0	0
18°	855	264,21	PIV	B1	L1	0	20	0	0
18°	855	264,21	PIV	B1	L2	2	17	1	0
18°	855	264,21	PIV	B1	L1T	0	20	0	0
18°	855	264,21	PIV	B1	L2T	0	20	0	0
18°	855	264,21	PIV	B2	L1	2	16	2	0
18°	855	264,21	PIV	B2	L2	6	3	11	0
18°	855	264,21	PIV	B2	L1T	6	4	10	0
18°	855	264,21	PIV	B2	L2T	7	4	9	0
18°	855	264,21	PIV	B3	L1	0	20	0	0
18°	855	264,21	PIV	B3	L2	0	17	3	0
18°	855	264,21	PIV	B3	L1T	0	20	0	0
18°	855	264,21	PIV	B3	L2T	4	6	10	0
18°	855	264,21	PIV	B4	L1	0	0	0	20
18°	855	264,21	PIV	B4	L2	0	0	0	20
18°	855	264,21	PIV	B4	L1T	20	0	0	0
18°	855	264,21	PIV	B4	L2T	6	14	0	0
30°	155	77,5	PI	B1	L1	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B1	L2	19	0	1	0
30°	155	77,5	PI	B1	L1T	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B1	L2T	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B2	L1	17	0	3	0
30°	155	77,5	PI	B2	L2	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B2	L1T	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B2	L2T	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B3	L1	20	0	0	0

30°	155	77,5	PI	B3	L2	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B3	L1T	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B3	L2T	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B4	L1	0	0	0	20
30°	155	77,5	PI	B4	L2	0	0	0	20
30°	155	77,5	PI	B4	L1T	20	0	0	0
30°	155	77,5	PI	B4	L2T	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B1	L1	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B1	L2	11	0	9	0
30°	435	217,5	PII	B1	L1T	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B1	L2T	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B2	L1	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B2	L2	18	0	2	0
30°	435	217,5	PII	B2	L1T	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B2	L2T	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B3	L1	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B3	L2	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B3	L1T	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B3	L2T	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B4	L1	0	0	0	20
30°	435	217,5	PII	B4	L2	0	0	0	20
30°	435	217,5	PII	B4	L1T	20	0	0	0
30°	435	217,5	PII	B4	L2T	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B1	L1	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B1	L2	9	0	11	0
30°	715	357,5	PIII	B1	L1T	20	0	0	0

30°	715	357,5	PIII	B1	L2T	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B2	L1	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B2	L2	17	0	3	0
30°	715	357,5	PIII	B2	L1T	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B2	L2T	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B3	L1	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B3	L2	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B3	L1T	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B3	L2T	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B4	L1	0	0	0	20
30°	715	357,5	PIII	B4	L2	0	0	0	20
30°	715	357,5	PIII	B4	L1T	20	0	0	0
30°	715	357,5	PIII	B4	L2T	20	0	0	0
30°	855	427,5	PIV	B1	L1	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B1	L2	4	0	16	0
30°	855	264,21	PIV	B1	L1T	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B1	L2T	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B2	L1	19	0	1	0
30°	855	264,21	PIV	B2	L2	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B2	L1T	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B2	L2T	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B3	L1	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B3	L2	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B3	L1T	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B3	L2T	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B4	L1	0	0	0	20

30°	855	264,21	PIV	B4	L2	0	0	0	20
30°	855	264,21	PIV	B4	L1T	20	0	0	0
30°	855	264,21	PIV	B4	L2T	20	0	0	0

## APÊNDICE E – DIAGRAMA DE DECISÃO

### **1. INÍCIO**

### **2. Definir escopo do sistema de transporte**

### **3. Caracterizar o coco de baru**

- 3.1 Dimensões
- 3.2 Forma
- 3.3 Massa
- 3.4 Resistência
- 3.5 Abrasividade

### **4. Definir capacidade da linha**

- 4.1 kg/h
- 4.2 Número de frutos/h

### **5. Escolher tipo de transporte primário**

- 5.1 Esteira (contínuo, leve e confiável)

### **6. Projetar sistema de transporte**

- 6.1 Tipo de correia (borracha, PVC, etc.)
- 6.2 Motorização e velocidade
- 6.3 Estrutura e suportes
- 6.4 Sistema de controle (simples/manual ou automático)

### **7. Analisar transporte antes da quebra**

- 7.1 Elevação (roletes inclinados, elevadores de caneca?)
- 7.2 Alimentador vibratório

### **8. Analisar transporte após quebra**

- 8.1 Separação de casca e semente
- 8.2 Transporte leve de sementes (rosca sem fim, correia inclinada?)

### **9. Integrar sistema com etapa de quebra futura**

### **10. Validar com protótipo ou simulação**

### **11. FIM**

## APÊNDICE F – TABELAS DE DECISÃO

Critérios	Sigla	Pesos	Esteira	Rosca	Vibratório	Elevador de Canecas	Carrossel	Empuradores Lineares
Robustez	R	5	9	7	6	8	7	8
Custo	C	4	6	8	5	4	5	7
Facilidade de manutenção	FM	4	8	5	7	6	7	6
Eficiência energética	EE	3	7	6	4	5	6	8
Facilidade de limpeza	FL	3	9	4	7	5	8	6
<b>Pontuação Total</b>			<b>7,84 2105 263</b>	<b>6,1578 94737</b>	<b>5,8421 05263</b>	<b>5,7894 73684</b>	<b>6,5789 47368</b>	<b>7,0526 31579</b>

Elemento transportador	Coluna 1
Esteira	7,84
Rosca	6,16
Vibratório	5,84
Elevador de Canecas	5,79
Carrossel	6,58
Empurradores Lineares	7,05

Critério	Peso (w)	Justificativa
Robustez (R)	5	Sistema deve operar sob carga contínua.
Custo (C)	4	Viabilidade econômica é prioritária.
Facilidade de manutenção (FM)	4	Reduz paradas não planejadas.
Eficiência energética (EE)	3	Sustentabilidade e custo operacional.
Facilidade de limpeza (FL)	3	Higiene é crítica para alimentos.

Critério	Peso	Proposta A (Nota)	Proposta B (Nota)	...
Robustez	5	8	5	...
Custo	4	6	9	...
Facilidade de manutenção	4	7	4	...
Eficiência energética	3	5	6	...
Facilidade de limpeza	3	8	3	...
<b>Pontuação Total</b>		<b>6,89</b>	<b>5,47</b>	...