



**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**REESTRUTURAÇÃO DE MÁQUINA  
PELETIZADORA PARA USO  
LABORATORIAL**

Por,

**Arthur Xavier Palhano**

**Brasília, 1 de junho de 2021**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

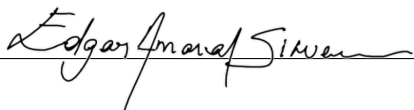
PROJETO DE GRADUAÇÃO

**REESTRUTURAÇÃO DE MÁQUINA  
PELETIZADORA PARA USO  
LABORATORIAL**

Por,  
**Arthur Xavier Palhano**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico

**Banca Examinadora**

Edgar Amaral Silveira (Orientador) 

Bruno S. Chaves \_\_\_\_\_

Déborah de Oliveira \_\_\_\_\_

Fábio C. de Lisboa \_\_\_\_\_

Brasília 1 de junho de 2021

# Resumo

O presente trabalho apresenta o projeto de reestruturação de uma máquina peletizadora para o uso laboratorial, como parte de um projeto maior do Centro de pesquisa e aplicação de bambu e fibras naturais (CPAB) vinculado à Universidade de Brasília. A solução proposta deve ser manufaturável, financeiramente acessível e atender as demandas da equipe de pesquisa do laboratório. Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o processo de peletização, máquinas peletizadoras, transportadores helicoidais e silos de armazenamento. A partir da realização de um teste diagnóstico e das variáveis de contexto apresentadas pela equipe de pesquisa, realizou-se o levantamento das demandas e restrições de projeto, bem como um levantamento das características atuais do equipamento. Foram apresentadas propostas de solução para as demandas determinadas e então o modelo CAD foi desenvolvido, bem como foi feito seu detalhamento, orientado para a fabricação. O produto final atende às demandas da equipe e às especificações de projeto, apresentando soluções de baixo custo e manufaturáveis.

**Palavras-chaves:** Peletização. Máquina peletizadora. Transportador Helicoidal.

# Abstract

The present work develops the project to restructure a pellet press for laboratory use, as part of a larger project of the Research and Application Center for Bamboo and Natural Fibers (CPAB) linked to the University of Brasilia. The solution must be manufacturable, affordable and meet the demands of the laboratory's research team. A review of the current literature about the pelletizing process, pellet machines, screw conveyors and hoppers was made. Based on a diagnostic test and the context requirements presented by the research team, the project restrictions and requisitions were assessed, as well as the current equipment conditions. Solution proposals were presented for the determined demands and then the CAD model was developed, as well as detailed for manufacturing. The final product suits the demands of the team and the project specifications, presenting low-cost and manufacturable solutions.

**Key-words:** Pelletizing. Pellet press. Screw conveyor.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Distribuição estimada do uso de bioenergias no consumo total de energia em 2018. (Adaptado de REN21 (2020).) . . . . .	2
Figura 2 – Exemplo típico de <i>pellets</i> de biomassa. (BIOENERGIA, 2021) . . . . .	3
Figura 3 – Produção mundial de <i>pellets</i> desde 2000 até 2016 (milhões de toneladas). (European Biomass Association (AEBIOM), 2017) . . . . .	4
Figura 4 – Máquina peletizadora BEP-200, atualmente em desuso, presente no LPF	5
Figura 5 – Máquina peletizadora, presente na FAL . . . . .	5
Figura 6 – Fluxograma das etapas de projeto. . . . .	7
Figura 7 – Exemplos de <i>pellets</i> produzidos a partir de diferentes fontes de biomassa. (ABC Machinery, 2020) . . . . .	8
Figura 8 – Fluxograma das etapas de um processo típico de peletização. . . . .	9
Figura 9 – Esquema de peletizadora do tipo unidade pistão-cilindro. (adaptado de Mostafa et al. (2019)) . . . . .	10
Figura 10 – Esquema de peletizadoras de rolos dos tipos matriz plana e anelar. . . . .	10
Figura 11 – Exemplos de peletizadoras de rolos com matriz. . . . .	11
Figura 12 – Ilustração do processo de formação de <i>pellets</i> dentro da câmara de peletização e do esquema de forças sobre o rolo. (adaptado de Stelte et al. (2012)) . . . . .	12
Figura 13 – Esquema das forças e pressões exercidas sobre um elemento de volume de biomassa, durante peletização com matriz plana. (adaptado de Pradhan, Mahajani e Arora (2018)) . . . . .	13
Figura 14 – Exemplos de peletizadora de matriz plana comercializadas . . . . .	19
Figura 15 – Vista explodida de um exemplo típico dos componentes mecânicos de uma peletizadora de matriz plana do tipo matriz girante. (GEMCO, 2020) . . . . .	20
Figura 16 – Exemplos de peletizadora de matriz plana comercializadas. . . . .	20
Figura 17 – Modelos de rolos para peletizadoras de matriz plana. . . . .	22
Figura 18 – Diferentes configurações geométricas de ranhuras na superfície de rolos. (TURNER, 2014) . . . . .	22
Figura 19 – Transportador helicoidal horizontal típico. (KWS, 2016) . . . . .	23

Figura 20 – Esquema dos componentes de um transportador helicoidal. Adaptado de Conveyor (2016) . . . . .	24
Figura 21 – Exemplos de soluções de condicionamento térmico em transportadores helicoidais. (KWS, 2016) . . . . .	25
Figura 22 – Esquema de um alimentador helicoidal com silo de armazenamento. (Adaptado de Yu (1997)) . . . . .	26
Figura 23 – Principais constituintes de um silo e pressões atuantes. (VIEIRA, 2009)	31
Figura 24 – Tipos básicos de fluxo de material em silos. (ARAÚJO, 1997) . . . . .	31
Figura 25 – Tipos básicos de fluxo de material em silos. (adaptado de Eurocode (2006)) . . . . .	32
Figura 26 – Características dimensionais de um silo. (adaptado de Eurocode (2006))	34
Figura 27 – Renderização 3D da Peletizadora BEP-200 (LIPPEL, 2016) . . . . .	35
Figura 28 – Módulo de alimentação da Peletizadora BEP-200, posicionado sobre o módulo de peletização. . . . .	37
Figura 29 – Eixo helicoidal interno ao silo de alimentação. . . . .	38
Figura 30 – Detalhes do bocal de saída da calha do sistema de alimentação. . . . .	39
Figura 31 – Módulo do sistema de peletização, posicionado abaixo do transportador helicoidal. . . . .	41
Figura 32 – Detalhes da carcaça montada e da matriz do sistema de peletização. . . . .	42
Figura 33 – Detalhes da fixação da matriz sobre o eixo principal. . . . .	42
Figura 34 – Detalhes da parte inferior da carcaça de peletização. . . . .	43
Figura 35 – Detalhe das partes central e superior da carcaça do sistema de peletização.	43
Figura 36 – Componentes do eixo dos rolos do sistema de peletização. (LIPPEL, 2016) . . . . .	44
Figura 37 – Painel de controle do equipamento, acoplado ao módulo de peletização.	44
Figura 38 – Registros da visita à peletizadora da fabricante ENG-MAQ presente na FAL. . . . .	46
Figura 39 – Blend de biomassa utilizado no teste diagnóstico de peletização. . . . .	46
Figura 40 – Amostra de biomassa depositada no silo de alimentação. . . . .	47
Figura 41 – Biomassa transbordando câmara de peletização após realização do teste diagnóstico. . . . .	48
Figura 42 – Registro da deposição indevida de matéria-prima entre o rolo e a parede da carcaça. . . . .	49
Figura 43 – Demonstração das guias verticais utilizadas para posicionamento das placas de contenção. . . . .	54
Figura 44 – Demonstração da placa de contenção. . . . .	54
Figura 45 – Vistas de corte com a placa posicionada no conjunto de guias que gera menor volume. . . . .	55
Figura 46 – Indicação das posições possíveis para a placa de contenção, configurações 1 e 2. . . . .	56

Figura 47 – Vistas em corte dos acrílicos posicionados na primeira câmara de armazenamento. . . . .	57
Figura 48 – Esquema representativo de escalas gravadas na placa de acrílico. . . . .	57
Figura 49 – Estrutura do silo de alimentação com a tampa da calha removida. . . . .	58
Figura 50 – Vistas do mecanismo de abertura da calha. . . . .	58
Figura 51 – Fecho de engate rápido com encaixe para cadeado, modelo FB3/E2. (FERRAMENTAS, 2021) . . . . .	59
Figura 52 – Grampo de pressão para fixação da carcaça presente em peletizadora da ENG-MAQ. . . . .	59
Figura 53 – Modelos de grampo tensor da fabricante KIFIX. . . . .	60
Figura 54 – Parafuso M12, classe de resistência 8.8, utilizado para fixação da carcaça. . . . .	61
Figura 55 – Esquema indicativo da proposta de posicionamento dos grampos de fixação. . . . .	62
Figura 56 – Grampos KF-153DTR posicionados nas laterais da carcaça. . . . .	62
Figura 57 – Grampos KF-153DTR da fabricante KIFIX. . . . .	63
Figura 58 – Representação do Termopar e módulo de leitura para o arduino (Tipo K e modelo Max6675, respectivamente). . . . .	64
Figura 59 – Indicação de posicionamento dos termopares. . . . .	65
Figura 60 – Montagem do sistema de alimentação com modificações do projeto de reestruturação. . . . .	67
Figura 61 – Montagem da carcaça de peletização com as modificações do sistema de fixação. . . . .	67

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de peletizadoras de matriz plana e anelar (Garcia-Maraver, 2015) . . . . .	11
Tabela 2 – Dados técnicos da Peletizadora BEP-200 (LIPPEL, 2016) . . . . .	36
Tabela 3 – Dimensões aproximadas do módulo de alimentação (LIPPEL, 2016) . .	37
Tabela 4 – Dimensões características do silo e da calha. (LIPPEL, 2016) . . . . .	38
Tabela 5 – Dimensões do eixo helicoidal. . . . .	39
Tabela 6 – Características do transportador helicoidal da peletizadora BEP-200. .	40
Tabela 7 – Dimensões aproximadas do módulo de peletização (LIPPEL, 2016) . .	41
Tabela 8 – Volumes determinados para as diferentes configurações do sistema de alimentação. . . . .	56
Tabela 9 – Dados para determinação da carga de prova máxima dos parafusos da carcaça. . . . .	61
Tabela 10 – Torques dos parafusos da peletizadora BEP-200. . . . .	73



# Lista de abreviaturas e siglas

ONU	Organização das Nações Unidas
UnB	Universidade de Brasília
LPF	Laboratório de Produtos Florestais
CPAB	Centro de pesquisa e aplicação de bambu e fibras naturais
EUBCE	European Biomass Conference & Exhibition
FAL	Fazenda Água Limpa
ANSI	American National Standards Institute
CEMA	Conveyor Equipment Manufacturers Association

# Lista de símbolos

$P_R$	Pressão exercida pelos rolos da peletizadora
$P_Y$	Pressão de peletização
$c$	Razão de compressão
$P_{N0}$	pressão de pré-tensão
$\nu_{LR}$	Coefficiente de Poisson
$\mu$	Coefficiente de atrito
$L$	Comprimento do canal da matriz, Comprimento do eixo helicoidal
$D$	Diâmetro do canal da matriz, Diâmetro externo da hélice
$r$	Raio do canal da matriz, Raio do eixo helicoidal
$F$	Força de atrito
$F_0$	Força de atrito inicial
$\lambda$	Fator de correção do volume ocupado
$t$	Passo do helicóide
$n$	Rotação do eixo, Potência relacionada a pressão na tremonha
$v$	Velocidade de deslocamento do material
$Q$	Vazão mássica
$\gamma$	Densidade do material
$K$	Fator de correção do ângulo de inclinação
$N$	Potência requerida pelo transportador helicoidal
$H$	Altura de elevação do material
$C_0$	Coefficiente de resistência

$\tau$	Momento torsor
$T$	Torque
$T_{max}$	Torque máximo
$J$	Momento polar de área do eixo
$d_e$	Diâmetro externo do eixo
$d_i$	Diâmetro interno do eixo
$\sigma'$	Tensão equivalente de von Mises
$\sigma_x$	Tensão axial no eixo
$\sigma_y$	Tensão flexora no eixo
$\sigma_m$	Tensão média
$\sigma_a$	Tensão alternada
$S_y$	Limite de resistência ao escoamento
$n_d$	Fator de segurança do projeto
$n_f$	Fator de segurança para fadiga
$S_e$	Limite de resistência à fadiga
$S'_e$	Limite de resistência à fadiga modificado pelos fatores de Marin
$S_{ut}$	Limite de resistência última à tração
$k_a$	Fator de Marin de superfície
$k_b$	Fator de Marin de tamanho
$k_c$	Fator de Marin de carregamento
$k_d$	Fator de Marin de temperatura
$k_e$	Fator de Marin de confiabilidade
$k_f$	Fator de Marin de efeitos diversos
$p_{nf}$	Pressão normal à parede da tremonha
$F_f$	Razão de pressão da tremonha
$p_v$	Pressão vertical
$\beta$	Inclinação da parede da tremonha

$b$	Coefficiente empírico
$\mu_h$	Coefficiente de atrito inferior
$\gamma_h$	Peso específico superior
$h_h$	Altura vertical da tremonha
$S$	Coefficiente ligado ao formato da tremonha
$p_{vft}$	Pressão vertical no material armazenado na seção de transição após o enchimento
$C_b$	Fator de carga
$p_{vf}$	Pressão vertical no material armazenado após o enchimento
$z_v$	Medida de profundidade usada para avaliação de tensão em silos
$h_0$	Profundidade abaixo da superfície equivalente
$z_0$	Altura equivalente da superfície na massa de produto
$d_c$	Dimensão característica do interior da seção transversal do silo
$\phi_r$	Ângulo de repouso de uma partícula de material
$k$	Taxa de pressão lateral
$A$	Área da seção transversal do silo
$U$	Perímetro interno da seção transversal do silo

# Sumário

	<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>6</b>
1.3.1	Objetivos específicos	6
<b>1.4</b>	<b>Metodologia e estrutura da dissertação</b>	<b>6</b>
	<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Peletização</b>	<b>8</b>
2.1.1	Processo de peletização	9
2.1.2	Tecnologias de peletização	10
2.1.3	Aspectos teóricos	12
2.1.4	Parâmetros que influenciam a qualidade da peletização	14
2.1.4.1	Pressão	14
2.1.4.2	Temperatura	15
2.1.4.3	Geometria da matriz	16
2.1.4.4	Parâmetros da matéria-prima	16
<b>2.2</b>	<b>Máquinas peletizadoras de matriz plana</b>	<b>18</b>
2.2.1	Matriz	20
2.2.2	Rolos	21
2.2.3	Alimentador helicoidal	23
2.2.3.1	Dimensionamento do transportador helicoidal	25
2.2.3.2	Dimensionamento do eixo do helicóide	28
2.2.4	Silo de alimentação	30
	<b>3 ESTUDO DE CASO</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Apresentação do equipamento</b>	<b>35</b>
3.1.1	Sistema de alimentação	36
3.1.2	Sistema de peletização	41
<b>3.2</b>	<b>Teste diagnóstico</b>	<b>45</b>

<b>3.3</b>	<b>Levantamento de demandas e restrições</b>	<b>49</b>
3.3.1	Sistema de alimentação	49
3.3.2	Sistema de peletização	50
<b>3.4</b>	<b>Proposta de reestruturação</b>	<b>51</b>
	<b>4 RESULTADOS</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Sistema de Alimentação</b>	<b>53</b>
4.1.1	Ajuste de volume do silo	53
4.1.2	Visor volumétrico do silo	56
4.1.3	Mecanismo de abertura da calha	58
<b>4.2</b>	<b>Sistema de Peletização</b>	<b>59</b>
4.2.1	Mecanismo de fixação da carcaça	59
4.2.1.1	Determinação dos esforços	60
4.2.1.2	Seleção e posicionamento do grampo tensor	62
4.2.2	Controle de sintomas de travamento dos rolos	63
4.2.3	Monitoramento térmico	64
	<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>66</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos futuros</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>69</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>72</b>
	<b>ANEXO A – MANUTENÇÃO</b>	<b>73</b>
<b>A.1</b>	<b>Recomendações de manutenção da máquina:</b>	<b>73</b>
<b>A.2</b>	<b>Lubrificação e engraxe:</b>	<b>74</b>
<b>A.3</b>	<b>Regulagem da matriz</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO B – DESENHOS TÉCNICOS</b>	<b>76</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O consumo mundial total de energia vem aumentando gradualmente nas últimas décadas, durante o período de 2013-2018 teve-se uma taxa média de crescimento do consumo de aproximadamente 1,4% ao ano (REN21, 2020). Em paralelo à crescente demanda de energia, iniciou-se um compromisso global pelo combate às mudanças climáticas e diminuição das emissões de  $CO_2$  pela queima dos combustíveis fósseis. Um dos eventos que uniu as grandes nações neste segmento foi o Acordo de Paris de 2015, sendo este o primeiro tratado mundial com os objetivos de controlar o aumento da temperatura global e de fortalecer a capacidade dos países em lidarem com os impactos das mudanças climáticas (UNFCCC, 2015).

A Organização das Nações Unidas (ONU), em sua lista de objetivos para agir em direção ao desenvolvimento sustentável (ONU, 2015), reforça essa preocupação mundial com as ameaças das mudanças climáticas e apresenta a importância do desenvolvimento de energias limpas e sustentáveis, destacando esses pontos nos objetivos 7 e 13 da lista, que propõem garantir energia sustentável, moderna e acessível e tomar medidas para combater as mudanças climáticas e seus impactos, respectivamente.

Este movimento global apontando para necessidade de desenvolvimento das energias renováveis já está apresentando resultados, no mesmo período de 2013-2018 a demanda mundial por energia renovável teve uma taxa média de crescimento de 4% ao ano, quase o triplo da taxa de consumo total (REN21, 2020). Em 2018, as fontes de energia renovável como solar, eólica, hidroelétrica, geotérmica, biocombustíveis e até o uso tradicional de biomassa representaram uma estimativa de 17,9% do consumo total de energia no mundo (Fig. 1).

A bioenergia, proveniente de biomassa, é a fonte de energia renovável com maior contribuição no consumo total de energia no mundo, onde em 2018 representou uma parcela de 12% (Fig. 1). Através de processos como gaseificação, pirólise ou fermentação, a biomassa pode ser convertida em biocombustíveis líquidos e gasosos, sendo usada como fonte de energia elétrica, térmica ou para meios de transporte. Também pode ser utilizada em sua forma sólida, onde sua queima direta pode ser convertida em fonte de calor

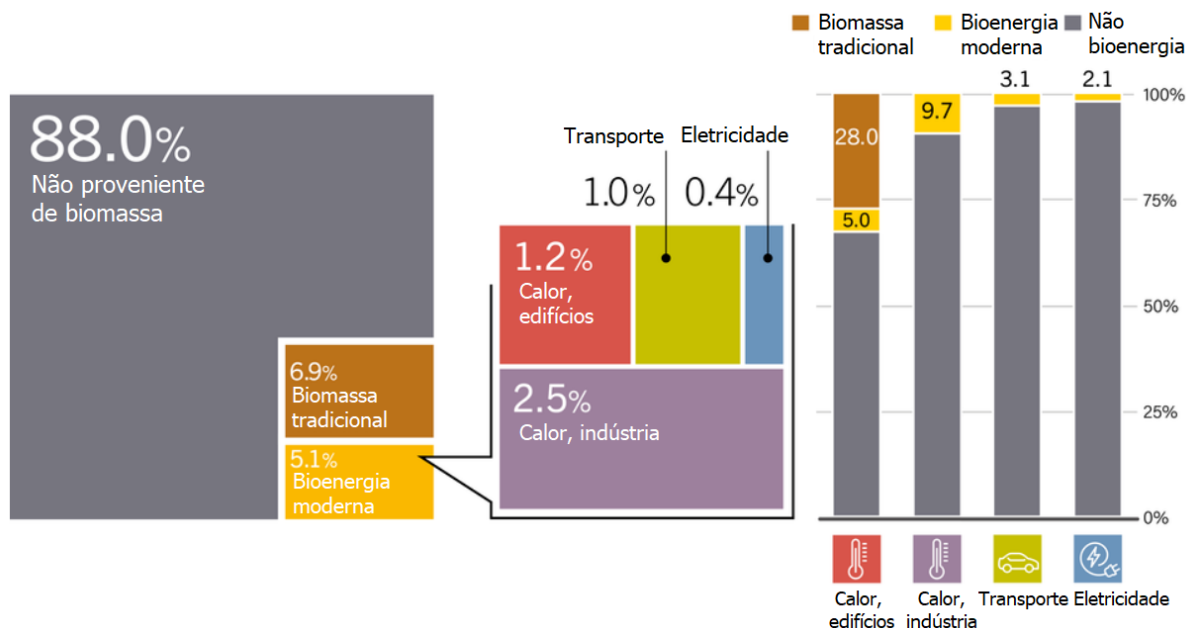


Figura 1 – Distribuição estimada do uso de bioenergias no consumo total de energia em 2018. (Adaptado de REN21 (2020).)

ou energia elétrica (CHEN; PENG; BI, 2015). Além dessa versatilidade, a biomassa é considerada uma fonte de energia neutra na emissão de carbono, visto que sua queima não gera adição líquida de dióxido de carbono na atmosfera, caracterizando uma alternativa promissora para a substituição dos combustíveis fósseis (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018).

No entanto, a biomassa em sua forma natural, é caracterizada por sua baixa densidade, alto teor de umidade, baixo poder calorífico, natureza higroscópica, heterogeneidade e grande volume, o que resulta em uma baixa eficiência energética, bem como dificuldades no manuseio, estocagem e transporte (Mostafa et al. (2019) e Chen, Peng e Bi (2015)). Geralmente, mistura-se biomassa junto à queima de carvão mineral, visando contornar essas desvantagens, porém não é o ideal, pois a alta diferença de densidade causa dificuldades na alimentação das caldeiras, gerando diminuição de eficiência da queima (TUMULURU et al., 2011).

Assim, tecnologias para densificação da biomassa se tornaram essenciais para transformarem o material orgânico em um produto competitivo no mercado. Comprovadamente capazes de aumentar a densidade volumétrica da biomassa de iniciais 40-200  $kg/m^3$  para finais 600-1400  $kg/m^3$  (CHEN; PENG; BI, 2015). O processo de densificação promove diversas vantagens para o uso de biomassa como fonte de energia, incluindo: o aumento da eficiência de transporte em toda a cadeia de distribuição, o melhor controle da uniformidade e densidade final do produto, a capacidade de misturar frações de diferentes biomassas para melhorar a performance do produto e a facilidade de padronização para adequação às normas de qualidade dos biocombustíveis (TUMULURU et al., 2011).



A peletização, junto da briquetagem e prensagem hidráulica, está entre os processos de densificação mais utilizados para a produção de bioenergia sólida. O resultado da densificação por um processo de peletização é a formação dos *pellets*, que são biocombustíveis sólidos de formato cilíndrico, uniformes e possuem elevada densidade energética (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). Temos um exemplo típico de *pellets* de biomassa apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Exemplo típico de *pellets* de biomassa. (BIOENERGIA, 2021)

Essencialmente, os *pellets* de biomassa são produzidos de fontes locais de matéria prima, como resíduos de agricultura, resíduos florestais e restos de biomassa sólida proveniente de cidades. Após serem produzidos, esses *pellets* são transportados e comercializados tanto no mercado interno quanto internacional, onde as aplicações variam desde a combustão em pequena escala, para aquecimento de residências, até a escala industrial, usado para a produção de energia térmica e elétrica (REN21, 2020).

A produção anual de *pellets* vem aumentando progressivamente a cada ano desde 2000 (Fig. 3), chegando ao patamar estimado de 55 milhões de toneladas no ano de 2018. Deste total a China lidera a produção com 20 milhões de toneladas, seguido pela Europa e América do Norte, com 17 e 11 milhões de toneladas respectivamente (REN21, 2020).

Em 2019, o Brasil foi o terceiro maior produtor de bioeletricidade do mundo, com 15 GW, em uma crescente na capacidade produtiva de 2% em relação ao ano anterior. Em 2018, foi o país que mais utilizou a biomassa para geração de calor na indústria, cerca de 1,6 EJ, sendo o bagaço da cana de açúcar a principal fonte de biomassa utilizada por esses dois tipos de geração no país e também uma das responsáveis pela presença do Brasil no mercado internacional de *pellets* (REN21, 2020).

A exportação de produtos peletizados para países com maior demanda de consumo é um mercado em potencial no qual as produtoras brasileiras estão investindo, por exemplo a empresa de produção de energia Raízen, que em 2020 começou a fechar seus primeiros contratos de venda de *pellets*, provenientes do bagaço da cana, para geradoras de energia do exterior, tal como a empresa alemã RWE (União Nacional de Bioenergia (UDOP), 2020).

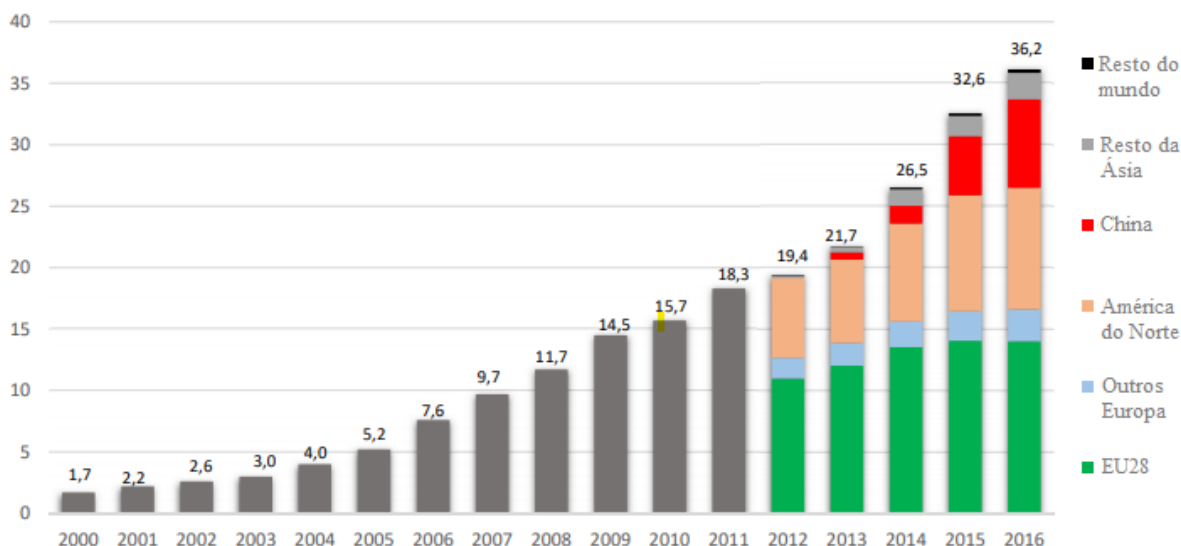


Figura 3 – Produção mundial de *pellets* desde 2000 até 2016 (milhões de toneladas). (European Biomass Association (AEBIOM), 2017)

## 1.2 Motivação

Junto da crescente demanda de *pellets* no mercado mundial, surge a necessidade e o interesse das academias pelo desenvolvimento de inovações e pela realização de pesquisas sobre o tema da peletização. Vinculado à Universidade de Brasília (UnB) e parceiro ao Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro, existe o Centro de pesquisa e aplicação de bambu e fibras naturais (CPAB), que realiza estudos relacionados ao segmento de biomassa para fins energéticos.

O presente trabalho está dentro do escopo de um projeto maior realizado pelo CPAB, de título "*Produção e caracterização de pellets de Phyllostachys aurea in natura e torreficado para fins energéticos*", o qual está em desenvolvimento e já teve artigo submetido para publicação na EUBCE 2021.

Atualmente, o laboratório possui um equipamento de peletização (Fig. 4) que está em desuso por questões técnicas. Foi relatado pela equipe de pesquisa presente no LPF que o equipamento em questão, adquirido no ano de 2016, está superdimensionado para a escala requerida. Bem como, possui um sistema construtivo que dificulta a manutenção e limpeza dos componentes.

A facilidade na desmontagem e remontagem do equipamento é essencial em situações que demandam limpezas repetidas de forma ágil e eficiente. Como por exemplo, a realização de peletização em sequência de diferentes tipos de biomassa, onde as diversas amostras não devem se misturar para não comprometer os resultados obtidos.



Figura 4 – Máquina peletizadora BEP-200, atualmente em desuso, presente no LPF

Para proceder com os experimentos, atualmente a equipe de pesquisa utiliza de um outro equipamento de escala mais adequada (Fig. 5), localizado na Fazenda Água Limpa (FAL) da UnB que fica cerca de 30km de distância do LPF. Dessa forma, a equipe relata que possui dificuldades logísticas para realizar os ensaios na FAL com regularidade.



Figura 5 – Máquina peletizadora, presente na FAL

Outras insatisfações levantadas pela equipe são a falta de monitoramento térmico da temperatura de certos componentes do equipamento, bem como a falta de um sistema de pré aquecimento da matriz de peletização. Fatores que são relevantes para a qualidade final dos *pellets* produzidos, como será visto em mais detalhes no capítulo 2.

Portanto, o trabalho é motivado pela contribuição na reestruturação e manutenção do equipamento de peletização do LPF, proporcionando aos pesquisadores do CPAB uma

infraestrutura de pesquisa mais adequada. E, de modo geral, favorecendo o desenvolvimento de conhecimentos e tecnologias em bioenergia, biomassa, biocombustíveis e todas as áreas que necessitem do processo de peletização como etapa indispensável.

## 1.3 Objetivos

O objetivo principal do trabalho consiste no projeto de reestruturação do equipamento de peletização BEP-200, presente no Laboratório de Produtos Florestais (LPF), adequando-o para escala de uso laboratorial. A solução deve ser manufaturável, financeiramente acessível e atender as demandas da equipe de pesquisa do laboratório.

### 1.3.1 Objetivos específicos

A partir dos relatos de contexto em relação aos problemas do equipamento atual, tem-se uma ideia preliminar das demandas do projeto. Porém, para identificar a real dimensão das dificuldades e restrições da máquina deve ser realizada uma investigação mais crítica com o apoio da revisão bibliográfica. Dessa forma, o presente projeto irá abarcar os objetivos específicos listados abaixo:

- Levantar as demandas e restrições de projeto a partir de teste diagnóstico e necessidades da equipe de pesquisa;
- Reestruturar sistema de alimentação para adequação à escala de uso da equipe de pesquisa do LPF;
- Modificar sistema de fixação da carcaça da câmara de peletização para facilitar desmontagem;
- Projetar sistema de monitoramento térmico para o equipamento;

## 1.4 Metodologia e estrutura da dissertação

A metodologia utilizada para guiar o presente projeto é dividida em 4 fases:

- Projeto conceitual: abrange a realização da fundamentação teórica, estudo de caso e levantamento dos parâmetros e restrições de projeto. Nesta etapa, é realizada a definição das demandas de projeto e são apresentadas as propostas de solução.
- Projeto intermediário: inclui o processo de dimensionamento e definições dos parâmetros de engenharia dos componentes do projeto. Nesta etapa, definem-se geometrias, materiais, processos de montagem e seleção de componentes.

- Projeto de detalhamento: neste momento são definidos os detalhes finais para fabricação dos componentes projetados. Realiza-se a construção dos desenhos técnicos de fabricação, incluindo tolerâncias, ajustes e processos de fabricação utilizados.

No capítulo 2 são apresentados os aspectos e conceitos teóricos do projeto. Será realizado a fundamentação sobre o processo de peletização, máquinas peletizadoras de matriz plana, transportadores helicoidais e silos de armazenamento. Aqui são revisados as metodologias de dimensionamento e principais parâmetros do projeto.

No capítulo 3 é realizada a apresentação do equipamento de estudo, bem como detalhes de seus componentes e princípios de funcionamento. Também é descrito as etapas do teste diagnóstico de peletização realizado para identificação dos gargalos atuais da máquina de estudo. É apresentado o levantamento e definição das demandas e restrições de projeto e após a identificação dos principais problemas e requisitos, são apresentadas as propostas de solução.

No capítulo 4 são apresentados o desenvolvimento das soluções definitivas do projeto, bem como são apresentados os modelos CAD definidos e são descritos elementos técnicos de fabricação.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do projeto, bem como são levantadas sugestões de trabalhos futuros.

A Figura 6 apresenta um fluxograma das atividades realizadas no presente trabalho.

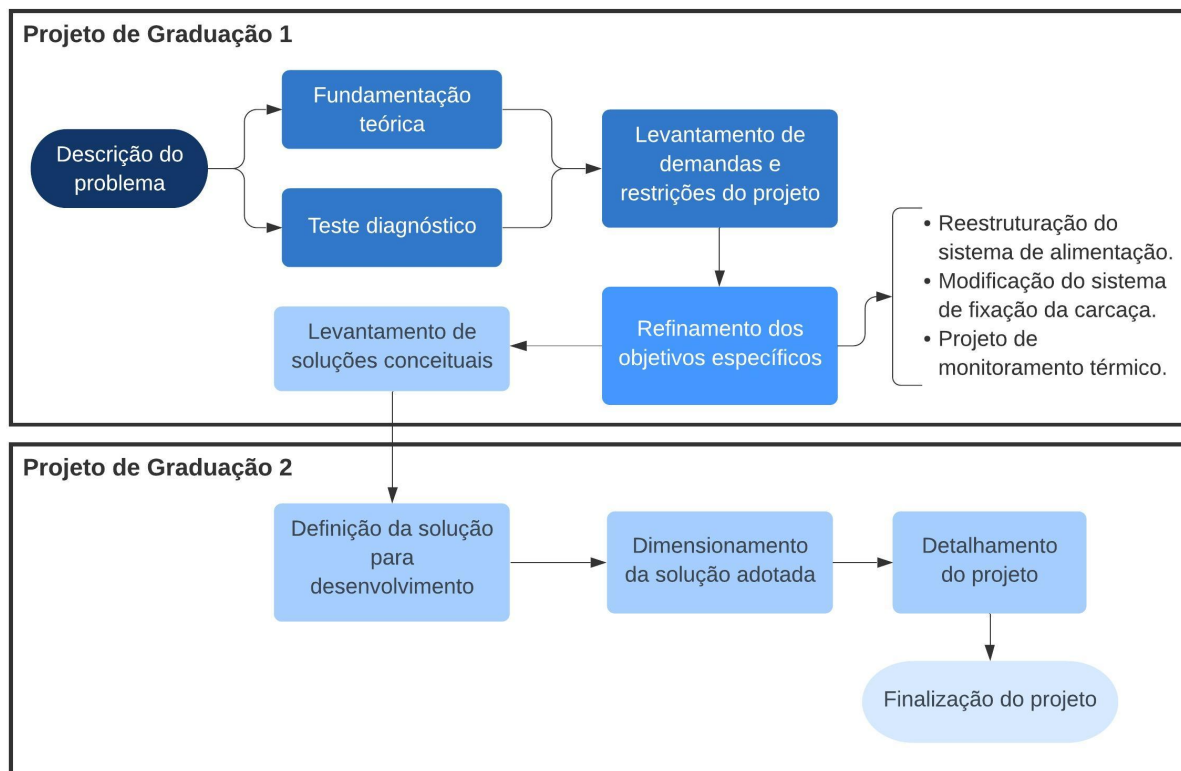


Figura 6 – Fluxograma das etapas de projeto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Peletização

A peletização está entre os processos padrões do mercado mais utilizados para a densificação de biomassa. Pode ser definido como o processo mecânico de compactação da matéria-prima sobre uma matriz de peletização com a aplicação de alta pressão, usado para converter o material orgânico com baixa densidade em *pellets* altamente densificados. Tornando economicamente viável as operações de transporte, manuseio e armazenamento dessa biomassa. (TUMULURU et al., 2011).



Figura 7 – Exemplos de *pellets* produzidos a partir de diferentes fontes de biomassa. (ABC Machinery, 2020)

Segundo Pradhan, Mahajani e Arora (2018), os *pellets* são biocombustíveis sólidos, granulados, cilíndricos, uniformes, com alta densidade energética e baixos níveis de umidade (<10%), permitindo alta eficiência na conversão energética, por volta de 75%. Geralmente, possuem menor teor de cinzas e sua queima gera menor emissão de partículas nocivas, como por exemplo o monóxido de carbono, se comparado com a queima do material em sua forma natural (SHEN et al., 2012).

Guiados por normas internacionais, os *pellets* geralmente possuem diâmetros entre 6 e 8 mm e no máximo 40mm de comprimento (MOSTAFA et al., 2019). Normas ISO para combustíveis sólidos definem uma densidade mínima de  $600 \text{ kg/m}^3$  para os produtos

da peletização e segundo Stelte et al. (2012) a densidade típica alcançada na produção de *pellets* é por volta de  $700 \text{ kg/m}^3$ .

A padronização das propriedades físicas e mecânicas dos *pellets*, definidas por normas internacionais, permite alcançar os requisitos de qualidade, durabilidade, densidade, eficiência energética, emissões e de geometrias adequados às exigências do mercado, permitindo usos desde a alimentação manual de aquecedores residenciais até a alimentação automática em operações industriais de larga escala (MOSTAFA et al., 2019).

A madeira é a matéria-prima de biomassa mais utilizada para peletização, sendo provenientes principalmente de resíduos florestais, agrícolas e da indústria madeireira. Assim, os *pellets* são considerados fonte de energia renovável, limpa e eficiente (PEREIRA, 2014).

### 2.1.1 Processo de peletização

Segundo Mostafa et al. (2019), o processo de peletização da biomassa é caracterizado por três principais etapas: pré-processamento, peletização e pós-tratamento. A primeira etapa consiste na seleção, coleta, filtragem, caracterização, ajuste do teor de umidade, moagem e pré-tratamento da matéria-prima. Os pré-tratamentos tem um papel importante na qualidade do processo e produto final, são alguns exemplos mais comuns a torrefação, redução da granulometria das partículas, secagem, condicionamento à vapor, uso de aditivos para ligação e tratamentos biológicos (WHITTAKER; SHIELD, 2017).

A biomassa pré-processada é direcionada para uma máquina peletizadora, equipamento responsável pela compressão das partículas de biomassa através de uma matriz metálica, dando forma aos *pellets* densificados. Após produzidos, os *pellets* saem da peletizadora à temperaturas elevadas e com resíduos de partículas soltas, dessa forma precisam passar por um pós-tratamento de resfriamento e limpeza, para então serem ensacados e manuseados para armazenamento e transporte, finalizando assim todo o processo de peletização (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). Na Figura 8 temos um esquema apresentando as etapas do fluxo típico de peletização.

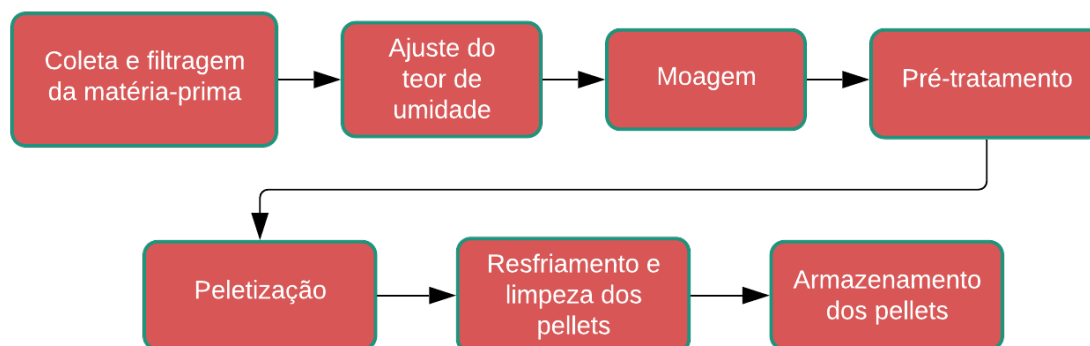


Figura 8 – Fluxograma das etapas de um processo típico de peletização.

## 2.1.2 Tecnologias de peletização

Existem três principais tipos de peletizadoras mais utilizadas na indústria, em pequena escala, temos a unidade pistão-cilindro hidráulico, design pensado para produzir apenas um único *pellet* por vez a partir da aplicação de pressão sobre o material em uma matriz cilíndrica, equipamento utilizado prioritariamente em pesquisas. Já em escala de produção contínua, temos as peletizadoras de rolos do tipo matriz plana e matriz anelar, representando majoritariamente o uso industrial, devido a alta produtividade e qualidade fornecida. Nas figuras 9 e 10 podemos ver esquemas dos 3 tipos de equipamentos.

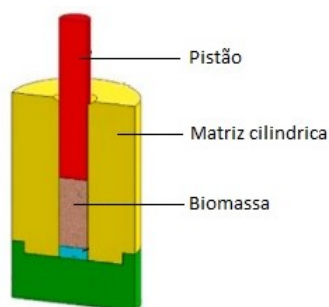


Figura 9 – Esquema de peletizadora do tipo unidade pistão-cilindro. (adaptado de Mostafa et al. (2019))

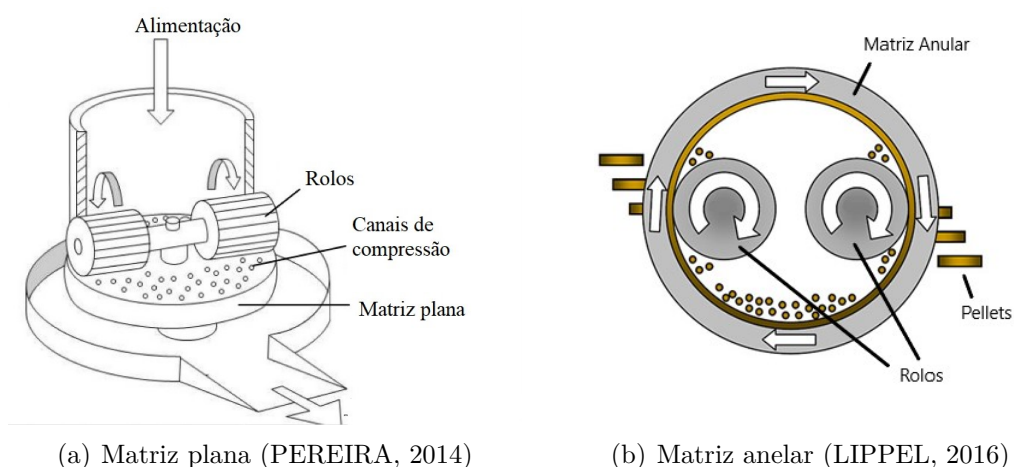


Figura 10 – Esquema de peletizadoras de rolos dos tipos matriz plana e anelar.

Geralmente, peletizadoras de matriz plana são utilizadas em pequenas e médias escalas de produção de *pellets*, já as de matriz anelar são destinadas para média e larga escala de produção (Garcia-Maraver, 2015). Nos dois casos, os *pellets* são criados comprimindo-se a matéria-prima através dos canais de compressão presentes na matriz de peletização (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018).

Percebe-se que os mecanismos de peletização contínua, exemplificados na Figura 10, são formados principalmente por dois elementos: a matriz, com os canais de compressão que atuam como molde para os *pellets*, e os rolos, que forçam a matéria-prima a passar pelos canais da matriz.



Em ambos os casos de peletizadoras de rolos com matriz, deve-se ter um elemento rotativo matriz. No caso do tipo matriz plana, é mais comum ter os rolos como componente móvel e a matriz ser fixa (Fig. 11(a)). Já para peletizadoras de matriz anelar, frequentemente a matriz é o elemento alimentado pelo motor, enquanto os rolos giram devido ao atrito com a biomassa (Fig. 11(b)). Porém, para ambos os tipos existem equipamentos com o princípio de funcionamento contrário. As principais vantagens e desvantagens entre estes dois tipos de peletizadoras estão apresentadas na tabela 1.



(a) Matriz plana com rolos girantes.



(b) Matriz anelar com matriz girante. (ENGMAQ, 2020)

Figura 11 – Exemplos de peletizadoras de rolos com matriz.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de peletizadoras de matriz plana e anelar (Garcia-Maraver, 2015)

	<b>Peletizadora matriz plana</b>	<b>Peletizadora matriz anelar</b>
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mais fácil de limpar</li> <li>- Acesso rápido a câmara de peletização</li> <li>- Design mais compacto</li> <li>- Visibilidade dos <i>pellets</i> produzidos</li> <li>- Maior robustez para matéria prima problemática</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior produtividade</li> <li>- Maior área superficial da matriz</li> <li>- Não sofre desgaste irregular da matriz e rolos</li> <li>- Maior atrito, resultando em mais calor para mesma velocidade</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possível desgaste irregular do rolo e matriz, devido rolagem assimétrica</li> <li>- Ação de deslizamento dos rolos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior atrito, resultando em maior consumo de energia</li> <li>- Design maior e mais pesado</li> <li>- Difícil acesso aos rolos e matriz</li> <li>- Maior complexidade, maior custo</li> <li>- Sem visibilidade dos <i>pellets</i> produzidos</li> </ul>

### 2.1.3 Aspectos teóricos

Segundo Stelte et al. (2012), o processo de peletização da biomassa propriamente dito ocorre dentro da câmara de peletização. Local onde se encontram a matriz e os rolos de compressão, posicionados à uma distância próxima um ao outro chamada de lacuna, que geralmente é em torno de 1mm, mas pode variar com o tipo de matéria-prima. Durante o processo, a biomassa ao entrar na câmara de peletização é comprimida entre esses dois componentes girantes e é forçada a passar pelos canais de compressão presentes na matriz.

Conforme o material é introduzido na câmara de peletização, ele entra em contato com a matriz e os rolos. Cada vez que a biomassa passa pelo rolo, parte do material é comprimido e então forma-se um carpete na superfície da matriz. Assim, os rolos comprimem o fundo do carpete de biomassa contra os canais da matriz e uma nova camada da estrutura dos *pellets* é formada a cada giro, como ilustrado pela Figura 12.

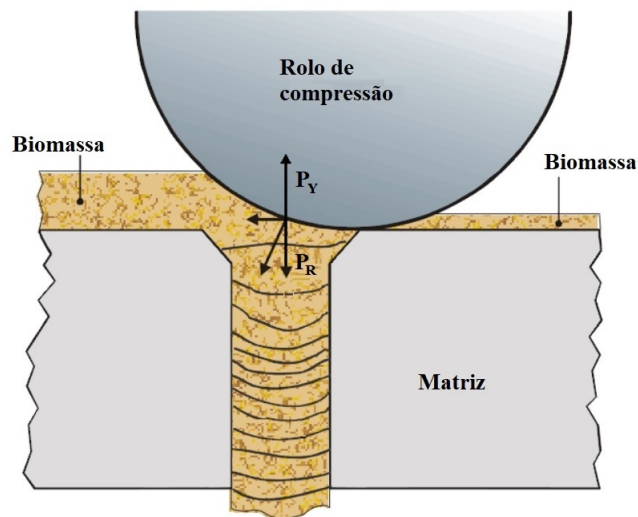


Figura 12 – Ilustração do processo de formação de *pellets* dentro da câmara de peletização e do esquema de forças sobre o rolo. (adaptado de Stelte et al. (2012))

A pressão exercida pelos rolos sobre a biomassa ( $P_R$ ) é dirigida de forma oposta para a pressão acumulada no canal de compressão ( $P_Y$ ) e supondo condições de regime permanente, elas estão em equilíbrio entre si. A pressão  $P_R$  é limitada de acordo com a potência do motor da peletizadora. Stelte et al. (2011) afirma que se a pressão de peletização  $P_Y$  ultrapassar o limite do motor, os canais de compressão da matriz serão bloqueados, pois os rolos não serão capazes de fornecer a pressão necessária para empurrar o material através desses canais. Alta pressão significa aumento do atrito entre os componentes e biomassa, conseqüentemente aumento da temperatura e aumento da energia utilizada.

Por outro lado, Stelte et al. (2011) também afirma que se a pressão for muito baixa não é possível produzir *pellets* dentro dos padrões de qualidade aceitáveis. Dessa forma, a magnitude ideal de  $P_Y$  é um *trade-off* entre a pressão necessária para produzir *pellets* estáveis e a energia requerida pela peletizadora.

As forças mecânicas atuantes sobre a biomassa durante o processo de peletização foram estudadas principalmente por Holm et al. (2006). Posteriormente, Pradhan, Mahajani e Arora (2018) fizeram adaptações desses estudos para uma peletizadora de matriz plana, como pode ser visto na Figura 13.

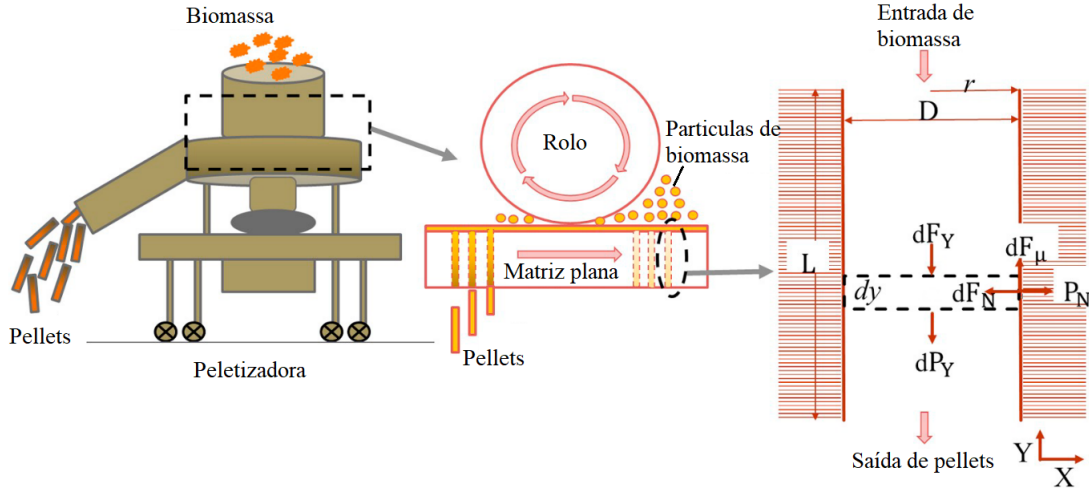


Figura 13 – Esquema das forças e pressões exercidas sobre um elemento de volume de biomassa, durante peletização com matriz plana. (adaptado de Pradhan, Mahajani e Arora (2018))

Segundo Holm et al. (2006) e posteriormente Stelte et al. (2012), a principal força atuante sobre a biomassa durante o processo de peletização é a força de atrito entre a parede do canal e a própria biomassa. Considerando que seja um material elástico e ortotrópico, onde as camadas formadas se alinham perpendicularmente à direção do canal da matriz, e que se trata de condições em regime permanente, a pressão de peletização ( $P_Y$ ) pode ser matematicamente descrita pela equação 2.1.

$$P_Y = \frac{P_{N0}}{v_{LR}} \left( e^{4\mu v_{LR} c} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Onde  $c$  é a razão de compressão (equação 2.2),  $P_{N0}$  é a pressão de pré-tensão que incorpora a plasticidade do modelo,  $v_{LR}$  é o coeficiente de Poisson (equação 2.3) e  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre a parede do canal e a biomassa.

$$c = \frac{L}{D} \quad (2.2)$$

$$v_{LR} = \frac{\text{tensão longitudinal}}{\text{tensão radial}} = \frac{dv}{dy} \bigg/ \frac{\Delta r}{r} \quad (2.3)$$

Durante o processo de peletização, deseja-se operar à uma máxima capacidade de produção com o menor consumo de energia possível, ao mesmo tempo que se produz *pellets* de alta qualidade. Assim, é importante entender os parâmetros do processo que afetam a

pressão de peletização  $P_Y$ , visto que deve-se mantê-la dentro de uma faixa apropriada de operação.

Pela equação 2.1 vemos que a pressão de peletização aumenta exponencialmente com a razão de compressão ( $c$ ), enquanto se mantém os outros parâmetros constantes. Sendo  $c$  a razão entre o comprimento do canal da matriz ( $L$ ) e o diâmetro desse canal ( $D$ ), podemos afirmar que este é um parâmetro específico da máquina, que se mantém o mesmo durante a operação, em regime permanente. Tumuluru et al. (2011) afirma que, um aumento no comprimento do canal gera maior pressão, já o aumento do diâmetro do canal gera uma menor pressão de peletização.

Stelte et al. (2012) avalia que, além da influência de  $c$ , a magnitude da pressão de peletização tem dependência em outros parâmetros do processo, sendo eles: a temperatura da matriz, teor de umidade, o tamanho das partículas da matéria-prima e a composição da biomassa utilizada.

De acordo com os referidos autores, o aumento da temperatura da matriz diminui a pressão  $P_Y$ , visto que a reação da lignina presente na biomassa faz com que atue como lubrificante, reduzindo o atrito entre a biomassa e a parede do canal da matriz. A influência do teor de umidade é ambíguo, dependendo da espécie de biomassa pode aumentar ou diminuir a pressão de peletização. Já os efeitos da granulometria da matéria-prima são mais consistentes e demonstram que a pressão aumenta com a diminuição das partículas devido o aumento de atrito pela maior área de contato.

## 2.1.4 Parâmetros que influenciam a qualidade da peletização

Para alcançar os padrões específicos de densidade, durabilidade e qualidade desejados, deve-se entender os fatores que regulam tanto o processo quanto as características físicas dos produtos da peletização. Pradhan, Mahajani e Arora (2018) afirma que a peletização é basicamente influenciada por parâmetros relacionados a matéria-prima, como teor de umidade, tamanho das partículas e composição da biomassa, e por parâmetros específicos de processo, como temperatura, pressão e geometria da matriz.

### 2.1.4.1 Pressão

Como apresentado na seção 2.1.3, a pressão de peletização tem um impacto significativo na densidade, durabilidade e qualidade dos *pellets* produzidos, tão como no consumo geral de energia do processo. Stelte et al. (2012) relata que as propriedades mecânicas dos *pellets*, resistência de compressão, durabilidade e densidade, tem significativa melhora com o aumento da pressão. Porém, existe um certo limiar de pressão o qual a energia adicional no processo é convertida principalmente em excesso de calor, contribuindo para um consumo excessivo de energia ao invés de contribuir para uma melhor qualidade dos *pellets*.

Tumuluru et al. (2011) cita que altas pressões durante a densificação podem gerar melhora da densidade final do produto, devido aumento das ligações criadas entre as moléculas por uma maior difusão dos pontos de contato. E que a densidade dos *pellets* é diretamente proporcional ao logaritmo natural da pressão aplicada. Stelte et al. (2011), descreve que existe um limite o qual a biomassa pode ser comprimida de forma a gerar melhora da densidade dos *pellets*, onde pressões acima de  $250\text{MPa}$  resultam em aumento pouco significativo dessa densidade final.

#### 2.1.4.2 Temperatura

A temperatura de peletização também tem efeitos sobre a qualidade dos atributos de durabilidade e densidade dos *pellets* produzidos. Sendo o calor gerado durante o processo decorrente do atrito entre a biomassa e as paredes do canal de peletização, Stelte et al. (2012) reporta que o aumento da temperatura reduz esse atrito e conseqüentemente diminui a energia necessária para realizar o processo.

É relatado também, que o aumento da temperatura de peletização, dado um certo teor de umidade, reduz a pressão necessária para se obter uma mesma densidade de *pellets*. Além disso, o teor de umidade máximo em que uma certa pressão era capaz de produzir uma densidade específica, aumenta pela adição de calor (TUMULURU et al., 2011).

A temperatura da matriz é outro fator importante para o controle da qualidade de peletização, no qual existem técnicas de pré-aquecimento no mercado, visto que melhoram a produtividade e reduzem a energia específica requerida para densificação (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018).

Stelte et al. (2012) relata que estudos sobre a distribuição de calor da peletização, realizados através da análise de imagens termográficas, observaram que a temperatura da matriz sob condições de operação estáveis é ideal a partir de  $90^{\circ}\text{C}$ , variando com o material. O estudo também descreve que operações acima dessa temperatura não resultou em níveis de densidade maiores. Outros estudos já demonstram que no quesito durabilidade temos resultados diferentes, peletizações realizadas com temperaturas da matriz acima de  $90^{\circ}\text{C}$  promovem melhora na ligação das partículas, apresentando aumento da durabilidades dos *pellets* (TUMULURU et al., 2011).

Em sua revisão sobre sistemas de densificação da biomassa, Tumuluru et al. (2011) relata estudos usando a temperatura de transição vítrea da lignina para entender o comportamento da densificação. Os estudos concluem que, os valores de durabilidade encontrados para *pellets* produzidos dentro dos limites das temperaturas de transição vítrea (valores em torno de  $75$  e  $100^{\circ}\text{C}$ ) são maiores que os produzidos fora dos limites. O autor ainda cita que expor a biomassa à temperaturas acima de  $300^{\circ}\text{C}$ , durante a densificação, não é recomendado devido a decomposição da proporcionada pelo processo de torrefação.

### 2.1.4.3 Geometria da matriz

Quando se fala em geometria da matriz, basicamente refere-se as dimensões gerais da matriz e as dimensões dos canais de compressão. Essas características afetam a quantidade de material que pode ser peletizado por vez e influenciam na quantidade de energia necessária para efetuar a compressão do material (TUMULURU et al., 2011).

A razão de compressão (Eq. 2.2) é um dos fatores de geometria que mais influenciam na magnitude da pressão de peletização gerada no canal da matriz (HOLM et al., 2006). Essa razão é considerada um bom instrumento de medida do grau de compressão durante o processo de peletização, onde o aumento do comprimento do canal da matriz aumenta a pressão, enquanto um aumento no diâmetro da matriz diminui a pressão de peletização.

Pradhan, Mahajani e Arora (2018) descreve que uma maior razão de compressão resulta em uma maior durabilidade dos *pellets* produzidos, devido ao aumento na força de atrito entre a biomassa e a parede do canal da matriz. Porém, uma força de atrito muito alta, decorrente de um canal de matriz muito longo ou diâmetro muito pequeno, pode ocasionar bloqueio da peletizadora. De acordo com (TUMULURU et al., 2011), a força de atrito,  $F$ , está relacionada as dimensões do canal da matriz de peletização, como apresentado na equação 2.4.

$$F = F_0 \cdot e^{\frac{4\mu L}{D}} \quad (2.4)$$

Onde  $F_0$  é a força de atrito inicial,  $L$  é o comprimento da matriz,  $D$  é o diâmetro do canal da matriz e  $\mu$  é o coeficiente de atrito.

Além disso, Pradhan, Mahajani e Arora (2018) observaram que o uso de matriz com diâmetros menores geralmente resultam em *pellets* com melhor durabilidade, porém menor capacidade de rendimento.

### 2.1.4.4 Parâmetros da matéria-prima

Mostafa et al. (2019), em seu estudo sobre a importância das condições de operação da peletização, descreve que o teor de umidade, tamanho das partículas, composição química e a espécie dos materiais de biomassa tem um papel essencial na qualidade da produção de *pellets*. Presentes na composição de biomassas, os componentes de ligação naturais como hemiceluloses, celulose, lignina, amido, proteínas e carboidratos solúveis em água, desempenham um papel importante em relação às propriedades físicas dos *pellets* produzidos, especialmente em alta pressão e temperatura.

O teor de umidade da biomassa atua como lubrificante e aglutinante no processo de peletização, sendo considerado o fator de matéria-prima mais importante que afeta a

qualidade dos *pellets*. A água contida no material aumenta a área de contato das partículas e conseqüentemente atua como um aglutinante, favorecendo as ligações de hidrogênio.

A partir da comparação de diversos estudos, Mostafa et al. (2019) descreve que o teor de umidade ideal recomendado para a produção de *pellets* de alta qualidade esta na faixa de 5-28% (base seca), visto que pode variar de acordo com o tipo de biomassa utilizada e de acordo com diferentes condições de operação.

Pradhan, Mahajani e Arora (2018) destaca em seu estudo as principais influências do teor de umidade sobre o processo de peletização, resumidos a seguir:

- A umidade presente na biomassa durante o processo de peletização atua como aglutinante e aumenta a ligação através das forças de van der Waals.
- O impacto do teor de umidade varia dependendo do tipo de biomassa.
- A umidade presente na biomassa reduz a temperatura de transição vítrea da lignina.
- O calor necessário para evaporação é menor em baixo teor de umidade e, portanto, maior quantidade estará disponível para o processo de compactação.
- O aumento no teor de umidade aumenta a mobilidade molecular de polímeros amorfos (lignina e hemiceluloses) e outros extrativos de baixa transição vítrea, reduzindo assim o atrito estático.
- A presença de umidade promove a formação de pontes de ligação entre as moléculas presentes na biomassa.

Segundo Mostafa et al. (2019), as ligações de hidrogênio e as forças de van der Waals são as forças de atração inter-moleculares mais comuns produzidas durante a densificação da biomassa. As forças de van der Waals são fortemente afetadas pelo tamanho de partícula da matéria-prima, quanto menor a granulometria maiores são as forças.

A partir da comparação de diversos estudos, Pradhan, Mahajani e Arora (2018) realiza um consolidado de informações sobre a influência do tamanho das partículas sobre o processo de peletização, no qual vale destacar as conclusões apresentadas a seguir:

- Grandes partículas de biomassa podem atuar como pontos de fragilidade nos *pellets*.
- Quanto menores forem as partículas, maior é a durabilidade, pois têm maior área de contato durante a peletização.
- Partículas menores aceitam mais umidade do que partículas grandes e, portanto, passam por um maior grau de condicionamento.
- Uma granulometria muito pequena de partículas pode levar ao bloqueio dos canais da matriz.

- A diminuição no tamanho das partículas resulta em menor expansão radial e longitudinal dos *pellets*.
- A pressão de peletização aumenta com a diminuição do tamanho das partículas.
- Partículas maiores resultam em maior consumo de energia durante o processo de peletização, devido a necessidade da trituração pela matriz e rolos.

A composição da biomassa tem um papel importante no quesito união das partículas, principalmente quando falamos de matéria-prima lignocelulósica, visto que seus componentes naturais atuam na formação estrutural e resistiva das camadas que constituem os *pellets*. Algumas das influências da composição, segundo Pradhan, Mahajani e Arora (2018), são:

- O teor de umidade ideal para peletização varia com o tipo de biomassa, que pode ser devido às diferentes composições da matéria-prima.
- Quando a biomassa é aquecida acima da temperatura de transição vítrea, a lignina amolece e exibe propriedades de termofixação.
- Uma biomassa com maior teor de lignina e baixo teor de extrativos apresenta maior durabilidade.
- A presença de extrativos formam uma camada limite externa que evita a ligação das partículas durante a peletização.
- A lignina favorece a aglomeração de partículas de biomassa devido ao seu comportamento termoplástico.

## 2.2 Máquinas peletizadoras de matriz plana

As peletizadoras de matriz plana são equipamentos populares dentro do mercado de densificação de biomassa, devido seu design simples e baixo custo. Apresentam uma versatilidade de tamanhos, podem ser pequenas e de baixa capacidade, sendo voltadas para uso doméstico e produção de pequena escala, com alimentação de biomassa prioritariamente manual (Fig. 14(a)). Mas também podem apresentar um design mais robusto, junto de um sistema de alimentação contínua, sendo adequada para produções de média escala (Fig. 14(b)).

Os principais componentes de uma máquina de peletização de matriz plana são: alimentador, rolo, matriz plana, motor de acionamento, eixo de transmissão, caixa de engrenagens e sistema de acionamento. O motor pode ser elétrico, a diesel ou até mesmo ser substituído por um conector do tipo Tomada de Força de um trator. O alimentador



pode ser apenas um funil de alimentação ou ser um transportador contínuo, como por exemplo um parafuso helicoidal.



(a) Peletizadora 3cv (KDWS, 2020)



(b) Peletizadora 350cv (ENG-MAQ, 2020)

Figura 14 – Exemplos de peletizadora de matriz plana comercializadas

Os rolos e a matriz plana são usados para o processo de densificação da biomassa e a partir desses elementos podemos classificar a peletizadora de matriz plana em dois tipos: um é o tipo em que o rolo é o elemento motriz e o outro a matriz é esse componente. No primeiro caso o rolo gira em volta do eixo principal e em volta do próprio eixo e a matriz é fixa, enquanto no segundo a matriz gira junto ao eixo principal e o rolo gira apenas em volta do próprio eixo.

Quando o motor de acionamento é iniciado, o eixo principal entra em movimento através do contato com o eixo de transmissão e a caixa de engrenagens. O eixo principal é conectado ao elemento elemento motriz (rolo ou matriz) gerando assim o movimento principal do equipamento. A Figura 15 apresenta um esquema típico com os principais elementos mecânicos de uma peletizadora de matriz plana do tipo matriz girante.

O funcionamento básico de uma peletizadora de matriz plana se dá pelo seguinte processo: após realizar o acionamento do motor principal, a matéria-prima selecionada é depositada na câmara de peletização, ela cai e se espalha sobre a matriz plana a partir do movimento do elemento motriz. O movimento relativo do rolo e da matriz aquece a matérias-prima e a pressiona contra os canais da matriz plana. Os *pellets* são formados e densificados ao passarem por esses canais, saindo em sua forma cilíndrica característica. Logo abaixo da matriz, existe um disco fatiador que corta os *pellets* em determinado comprimento e os lança em direção a saída, onde são coletados em algum recipiente.

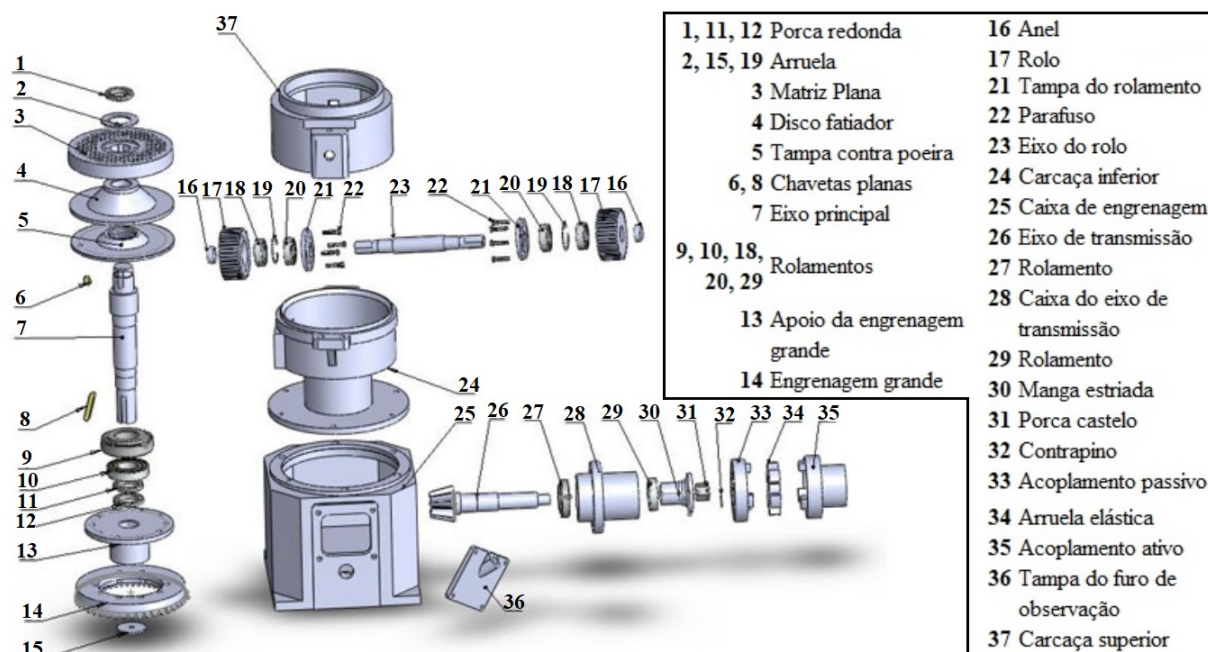
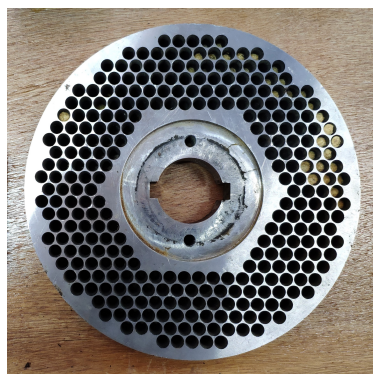


Figura 15 – Vista explodida de um exemplo típico dos componentes mecânicos de uma peletizadora de matriz plana do tipo matriz girante. (GEMCO, 2020)

## 2.2.1 Matriz



(a) Matriz plana do tipo girante



(b) Matriz plana do tipo fixa (AZEUS, 2020)

Figura 16 – Exemplos de peletizadora de matriz plana comercializadas.

A matriz plana de uma peletizadora tem um papel fundamental na qualidade resultante de um processo de peletização, onde os parâmetros e fatores foram apresentados na seção 2.1.4. Existem diversos modelos desse tipo de matriz, variando em relação às dimensões dos canais, padrão e quantidade dos furos, metal de fabricação, arremate dos furos e em relação ao tipo de fixação. A Figura 16 apresenta modelos que diferem no tipo de fixação, sendo um direcionado para peletizadora do tipo matriz girante (chavetas no eixo central) e a outra para o tipo matriz fixa (chavetas no eixo externo).

A matriz pode ser fabricada de diferentes materiais, cada um com vantagens e desvantagens. Deve suportar a pressão de peletização e ser resistente à abrasão e corrosão, mantendo a qualidade e produtividade máxima. Os materiais geralmente usados são ligas de aço carbono, ligas de aço inoxidável e ligas de aço com alto teor de cromo.

As matrizes feitas de aço carbono geralmente são termicamente tratadas e por isso possuem elevada resistência a abrasão e quebras, porém tem como desvantagem a falta de resistência a corrosão. O Aço oxida e a corrosão acumula nos furos da matriz, podendo afetar a produtividade. São utilizadas para a maioria dos materiais, visto que são matrizes mais fortes, com maior tempo de vida e geralmente mais baratas.

Matrizes de aço inoxidável e aço cromo possuem boa resistência a corrosão e desgaste, o segundo material mais que o primeiro. Possuem furos altamente polidos, o que reduz o atrito gerado e acaba exigindo maior comprimento de matriz para atingir a pressão necessária. Dessa forma a desvantagem desses dois materiais é o custo elevado de produção apresentado.

Um problema comum que pode ocorrer com a matriz plana durante o processo de peletização é o bloqueio dos canais de compressão, caindo a produtividade e a qualidade dos *pellets* produzidos. Os motivos que ocasionam esse problema são diversos: podem estar relacionado com geometria inadequada da matriz, com o tamanho das partículas da matéria-prima, com uma baixa temperatura de operação, com corrosão presente nos canais, com desgaste na superfície dos rolos e da matriz ou com um fluxo de alimentação de material inadequado.

Como descrito na seção 2.1.4.2 a temperatura da matriz é um fator fundamental para garantir a produção de *pellets* de qualidade e alta durabilidade. Dessa forma, é de grande importante ter um sistema de monitoramento térmico, de forma a entender o transiente de temperatura que ocorre durante o processo de peletização, característica que normalmente não está presente nos projetos básicos comercializados de peletizadoras de matriz plana.

## 2.2.2 Rolos

O rolo é outro componente essencial para o processo de peletização. São responsáveis por exercer a pressão sobre a biomassa, comprimindo-as em direção aos canais da matriz, os aspectos teóricos em volta dessa pressão estão apresentados na seção 2.1.3.

O design de rolos projetados para peletizadoras de matriz plana, tem como base a presença do casco do rolo, eixo do rolo e rolamentos. Podem variar quando o tipo de eixo, quantidade de rolos, diâmetro dos rolos, espaçamento entre rolos e tipo de ranhuras na superfície de contato. A Figura 17 exemplifica dois modelos de rolos, onde diferem principalmente na quantidade de cascos de rolos e no tipo de fixação do eixo, sendo um para matriz plana do tipo eixo matriz (Fig. 17(a)) e o outros do tipo matriz girante (Fig.

17(b)).

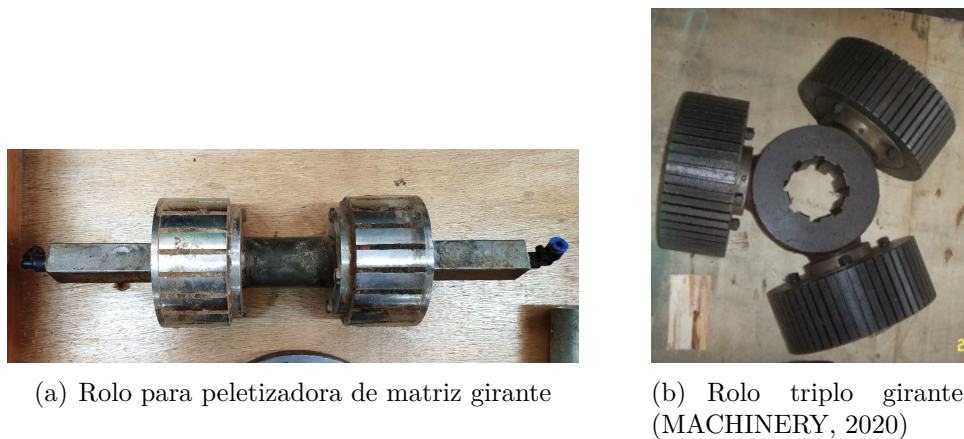


Figura 17 – Modelos de rolos para peletizadoras de matriz plana.

O rolo geralmente é fabricado em liga de aço carbono com tratamento térmico, com dureza igual ou inferior a da matriz plana, visando prolongar a vida útil da matriz. Não existe uma preocupação com a diminuição da rugosidade da superfície do rolo, visto que é essencial que este tenha bom atrito em contato com a biomassa, assim não são fabricados pensando em resistência a corrosão, mas sim em boa resistência à abrasão e quebras.

As ranhuras na superfície do rolo podem ter diferentes configurações (Fig. 18), visando se adequar a cada aplicação específica e buscando o máximo desempenho. Cada desenho geométrico é projetado para fornecer máxima compressão a biomassa sobre os canais da matriz, ao mesmo tempo que garante tração confiável.

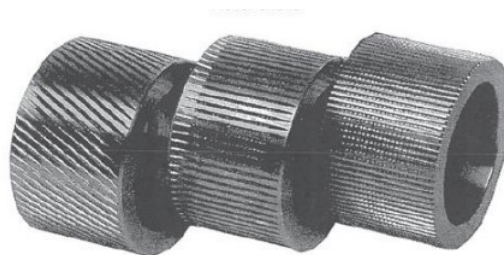


Figura 18 – Diferentes configurações geométricas de ranhuras na superfície de rolos. (TURNER, 2014)

A principal função das ranhuras está em auxiliar com um problema comum que ocorre com os rolos de peletizadoras de matriz plana: o deslizamento ou travamento dos rolos. Pode ser ocasionado por tamanho inadequado das partículas da matéria-prima, pela geometria inadequada da superfície do rolo, por baixa temperatura de operação, por uma lacuna inadequada entre o rolo e a matriz ou até por defeitos e bloqueios do rolamento do rolo (Tumuluru et al. (2011), Stelte et al. (2011) e Pradhan, Mahajani e Arora (2018)).

As ranhuras horizontais com extremidades abertas performam melhor para evitar este problema de deslizamento, dessa forma são a geometria mais comum encontrada no

mercado. As ranhuras helicoidais tendem a empurrar o material através da face da matriz em direção às bordas externas, dessa forma são indicadas para auxiliar em processos de peletização com distribuição desigual de biomassa sobre a matriz ou em casos de desgaste desigual da superfície da matriz (TURNER, 2014).

### 2.2.3 Alimentador helicoidal

Frequentemente utiliza-se um sistema de alimentação controlada junto ao processo de peletização de biomassa, onde o objetivo principal é garantir um fluxo uniforme de deposição de matéria-prima, visto que um fluxo inadequado pode gerar bloqueio dos canais da matriz e conseqüentemente diminuir a eficiência da produção. Dentre os diferentes tipos de transportadores, um dos mais utilizados junto aos equipamentos de peletização são os transportadores helicoidais (Fig. 19).



Figura 19 – Transportador helicoidal horizontal típico. (KWS, 2016)

Utilizados pela indústria especialmente para o transporte de materiais a granel, pastosos ou fibrosos, possuem princípio de funcionamento análogo a um parafuso de movimentação, a partir da aplicação de torque sobre um eixo e transformando o movimento circular em linear com o uso do atrito (CONVEYOR, 2016).

Sacramento et al. (2003) descreve que a característica de fluidez (ou grau de liberdade das partículas) do material é um fator importante na operação do transportador, pois a hélice presente no eixo central, ao girar dentro de uma calha, empurra o material ao longo das laterais e do fundo, fazendo com que o material tombe sobre si mesmo à medida que a pá da hélice tende a levantar o material novamente, gerando o ciclo do movimentação. A Figura 20 apresenta um esquema desses diferentes componentes mencionados de um transportador helicoidal típico.

Analisando a norma N°350-2019 da ANSI/CEMA (2019), vemos que os transportadores helicoidais são equipamentos versáteis, operando com baixas ou altas capacidades de vazões e podem operar na horizontal, inclinados ou na vertical. Além do transporte, podem ser utilizados como agitadores ou misturadores, dependendo do tipo de hélices utilizadas. Podem ser projetados para conter diversos pontos de entrada e saída de matéria-prima, aumentando a eficiência de distribuição de material. Também podem ser totalmente selados para evitar escape ou entradas de materiais indesejados.

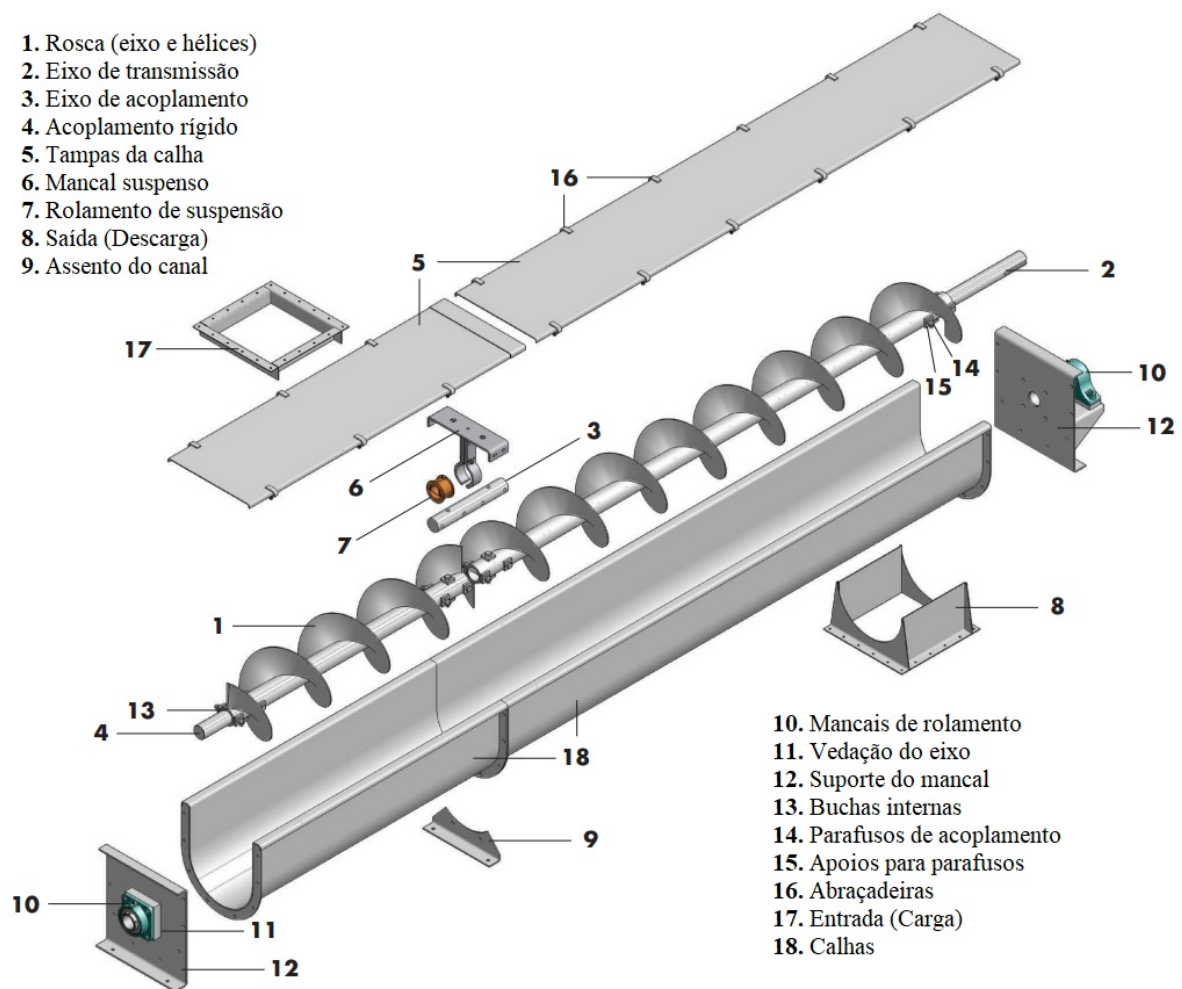
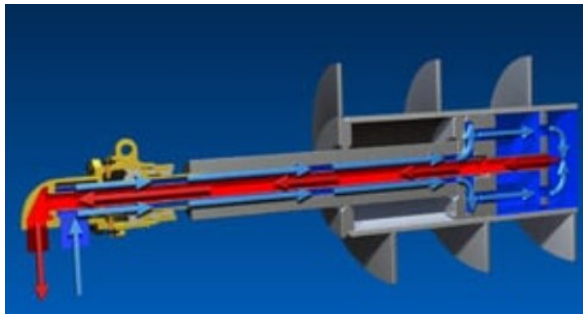


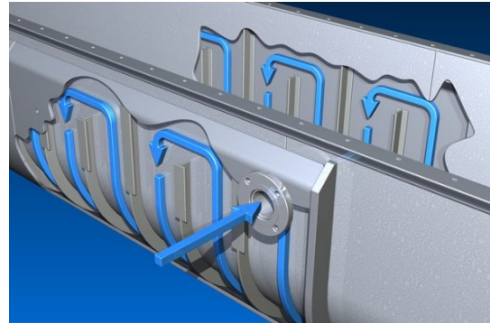
Figura 20 – Esquema dos componentes de um transportador helicoidal. Adaptado de Conveyor (2016)

As roscas transportadoras, em sua forma básica, possuem um projeto mecânico simples, ponto que garante melhor custo benefício em relação a outros tipos de transportadores, como canecas ou correias. Porém, podem ter design mais elaborados, sendo fabricados para ter resistência à corrosão, abrasão ou calor. Podem ter soluções de secagem, aquecimento ou resfriamento de materiais a granel, usadas para aplicações como o pré-aquecimento de biomassa ou resfriamento de cinzas.

A implementação dessas tecnologias existentes de condicionamento em transportadores helicoidais geralmente são realizadas a partir de um revestimento por uma resistência elétrica ou pela transferência indireta de calor com o uso de um fluido refrigerante (KWS, 2016). Temos como exemplo as soluções adotadas pela empresa KWS, que utiliza fluxo de água internamente ao eixo central (Fig. 21(a)) ou internamente a estrutura da calha (Fig. 21(b)).



(a) Eixo central



(b) Calha

Figura 21 – Exemplos de soluções de condicionamento térmico em transportadores helicoidais. (KWS, 2016)

### 2.2.3.1 Dimensionamento do transportador helicoidal

Para determinar a metodologia de dimensionamento de um transportador helicoidal, baseou-se nos projetos de Carvalho (2013) e Sacramento et al. (2003), nos estudos de Mondal e Nabendughosh (2018) e Yu (1997), no guia de dimensionamento da fabricante KWS (2016), no catálogo guia da fabricante Conveyor (2016) e nas informações presentes na norma N°350-2019 da ANSI/CEMA (2019).

O transportador helicoidal a ser estudado neste projeto é considerado de um tipo específico devido suas particularidades, chamado de alimentador helicoidal. São projetados objetivando realizar a dosagem de materiais a granel, controlando o fluxo de alimentação desejado. Como relatado no guia da (KWS, 2016), são frequentemente projetado para operar com sistemas de velocidades do eixo variáveis, ampliando as faixas de capacidades possíveis.

Outra característica fundamental dos alimentadores helicoidais é que o parafuso central é montado diretamente em um silo de armazenamento, dessa forma a entrada do parafuso de alimentação está sempre submersa em material, como representado na Figura 22.

Pensando nessas características, alguns fatores relevantes devem ser considerados para o dimensionamento de um alimentador helicoidal:

- Características de fluxo do material;
- Densidade e granulometria do material;
- Capacidade máxima e mínima de alimentação necessárias do processo;
- Largura e comprimento da seção de entrada do parafuso;
- Comprimento total necessário de transporte do material;
- Altura de material no silo.

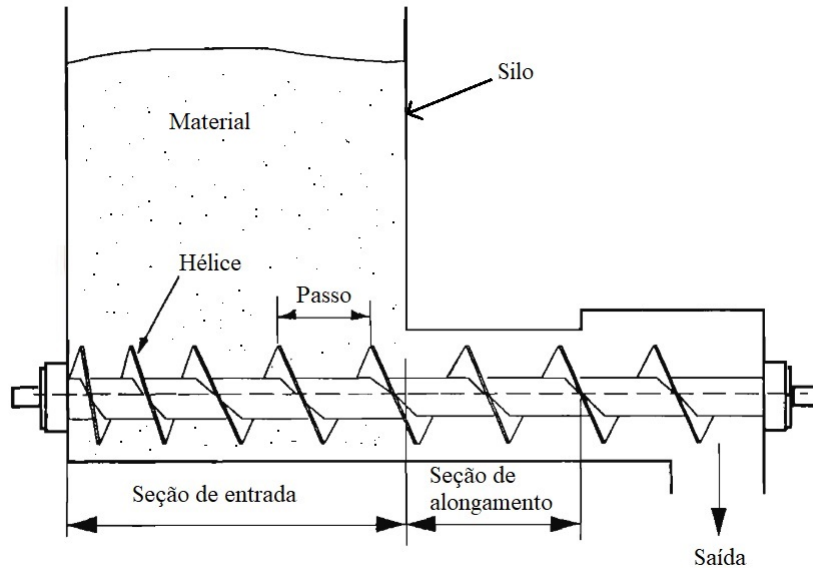


Figura 22 – Esquema de um alimentador helicoidal com silo de armazenamento. (Adaptado de Yu (1997))

Os fatores mais importantes a serem levantados sobre o material transportado são: a densidade, umidade e abrasividade. A biomassa, ou blends de biomassa, utilizada para produção de *pellets* devem possuir idealmente baixa umidade, por volta de 5-28% (teor de umidade em base seca) dependendo da matéria-prima, para garantir uma produção de alta qualidade (MOSTAFA et al., 2019).

Sendo essas as fontes mais comum de matéria prima, a biomassa composta de resíduos agrícolas tem uma densidade entre  $80-100 \text{ kg/m}^3$  e a biomassa de resíduos florestais entre  $150-200 \text{ kg/m}^3$  (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). A partir de tabelas de materiais presentes dos manuais da KWS (2016), da Conveyor (2016) e na norma da ANSI/CEMA (2019), observamos que materiais similares às biomassas utilizadas em peletização são considerados pouco abrasivos.

Assim, de posse das características do material a ser transportado, podemos definir o fator de correção do volume ocupado pelo material na hélice,  $\lambda$ . Segundo a norma da ANSI/CEMA (2019), em situações onde a entrada do parafuso helicoidal está totalmente submerso em material e quando esse material tem relativa boa fluidez (média densidade e pouca abrasividade), podemos considerar um fator  $\lambda$  de 0,95 para realizar o dimensionamento.

Segundo Mondal e Nabendughosh (2018), experimentos em um alimentador helicoidal com características similares ao deste projeto, demonstrou que o fator de preenchimento  $\lambda$  real sofre influência com a variação da velocidade de rotação do eixo. E ainda afirma que alimentadores helicoidais curtos possuem  $\lambda$  maiores se comparado com os de comprimento longo.

O passo da hélice,  $t$ , de um transportador helicoidal pode variar, mas sempre é



classificado pela norma em função do diâmetro. O passo padrão é exatamente igual ao diâmetro externo da hélice, mas também existem o passo curto (2/3 do diâmetro), o meio passo (1/2 do diâmetro) e o passo longo (1-1/2 do diâmetro). Frequentemente, parafusos helicoidais com passo curto, ou até mesmo passo variável, são utilizados em alimentadores helicoidais, como medida de garantir um fluxo uniforme na seção de entrada do material.

O passo do parafuso é um dos fatores que influenciam a velocidade de deslocamento,  $v$ , proporcionada no interior do equipamento, sendo o outro fator a velocidade de rotação do eixo,  $n$ . A equação 2.5, apresenta o cálculo da velocidade que o material se deslocará.

$$v = \frac{(t.n)}{60} \quad (2.5)$$

- Sendo  $n$  em RPM e  $t$  em metros, temos  $v$  em m/s.

Considerando que o presente projeto se trata de um transportador que opera na horizontal, a vazão  $Q$  fornecida pelo equipamento é encontrada a partir da equação 2.6, como descrito por Carvalho (2013).

$$Q = \lambda.\gamma.K.v.\left(\frac{\pi.D^2}{4}\right) \quad (2.6)$$

Onde:

- $Q$  = Vazão fornecida pelo transportador em kg/s;
- $\lambda$  = Fator de correção do volume ocupado;
- $\gamma$  = Densidade do material em  $kg/m^3$ ;
- $K$  = Fator de correção do ângulo de inclinação, sendo na horizontal igual a 1;
- $v$  = Velocidade de deslocamento linear do material em m/s;
- $D$  = Diâmetro externo da hélice em metros.

Assim, podemos determinar a potência requerida por um transportador helicoidal a partir da equação 2.7, como descrito por Carvalho (2013).

$$N = \frac{Q.H}{367} + C_0.\frac{Q.L}{367} \quad (2.7)$$

Onde:

- $N$  = Potência requerida pelo transportador helicoidal em kW;
- $Q$  = Vazão em ton/h;

- $H$  = Altura de elevação do material em metros. Sendo um transportador horizontal,  $H = 0$ ;
- $C_0$  = Coeficiente de resistência de acordo com a granulometria do material. Em que  $C_0$  igual 1,2 para materiais com pequeno tamanho de partículas;
- $L$  = Distância de transporte do material, em metros.

### 2.2.3.2 Dimensionamento do eixo do helicóide

Para garantir o bom funcionamento do eixo e a confiabilidade do projeto, o dimensionamento deve ser analisado para prevenção de falha por escoamento e falha por fadiga. Será utilizada a metodologia de projeto de eixo por tensão descrita por Budynas e Nisbeth (2016).

Em um eixo rotativo, o esforço relevante para o dimensionamento é principalmente de natureza torsional. No caso de transportadores helicoidais, existe também o esforço axial devido à resistência exercida pelo material ao ser transportado. O momento torsor máximo é determinado pelo torque máximo fornecido pelo motor do transportador helicoidal, calculado a partir da equação 2.8. Já o momento axial máximo pode ser determinado a partir da construção dos diagramas de corpo livre.

$$\tau = \frac{T_{max} \cdot r}{J} \quad (2.8)$$

Onde:

- $\tau$  = Torsor máximo exercido no eixo;
- $T_{max}$  = Torque máximo fornecido pelo motor;
- $r$  = Raio do eixo do helicóide;
- $J$  = Momento polar de área do eixo;

Eixos do helicóide de um transportador helicoidal que possuem motores de baixa potência, geralmente são projetados para ter geometria tubular, ou seja, eixos vazados. Com essa geometria, é possível ter um menor custo da produção do eixo, menor massa e conseqüentemente menor inercia de rotação. Assim, a equação 2.9 apresenta o cálculo do momento polar de área para eixo vazados.

$$J = \frac{\pi}{32}(d_e^4 - d_i^4) \quad (2.9)$$

Onde,  $d_e$  é o diâmetro externo do eixo e  $d_i$  é o diâmetro interno do eixo.

O torque exercido sobre o eixo pode ser calculado utilizando a equação 2.10.

$$T = \frac{60.N.1000}{2\pi.n} \quad (2.10)$$

Onde a potência,  $N$ , deve ser dada em kW e a rotação,  $n$ , deve ser dada em rpm.

Então, para verificação da resistência ao escoamento pode ser utilizado o critério da tensão de von Mises. A resistência ao escoamento consiste no principal método para projeto de estruturas para falha estática. Utilizando a teoria de falha de energia de distorção, o cálculo para tensão equivalente de von Mises ( $\sigma'$ ) para o equipamento em questão é representada pela equação 2.11.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2} \quad (2.11)$$

Onde  $\sigma_x$  é a tensão axial do eixo e  $\sigma_y$  é a tensão flexora, que no caso deste projeto é considerada nula. Assim, representando a tensão equivalente máxima de von Mises em função das tensões flutuantes temos a equação 2.12.

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_m + \sigma_a)^2 + 3(\tau_m + \tau_a)^2} \quad (2.12)$$

Onde o índice  $m$  representa as componentes de tensão média e o índice  $a$  as componentes de tensão alternada.

Então, para garantir que o eixo do helicóide resistirá a falha por escoamento estático, a tensão equivalente de von Mises deve ser comparada com o limite de resistência ao escoamento do material do eixo ( $S_y$ ) e com o fator de segurança do projeto ( $n_d$ ), obedecendo a relação apresentada na equação 2.13.

$$\sigma' \leq \frac{S_y}{n_d} \quad (2.13)$$

Agora, para a verificação da possibilidade de falha por fadiga, Budynas e Nisbeth (2016) recomenda a utilização do critério de Goodman modificado, por ser conservador. Assim, a equação 2.14 apresenta o cálculo para determinar o fator de segurança para fadiga ( $n_f$ ).

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (2.14)$$

Onde, o limite de resistência à fadiga ( $S_e$ ) é determinado através da convenção representada pela equação 2.15, na qual  $S_{ut}$  é a resistência última a tração do material do eixo. O limite de resistência à fadiga deve, então, ser modificada pelos fatores de Marin, equação 2.16, conforme a aplicação da peça projetada.

$$S_e = 0,5.S_{ut} \quad (2.15)$$

$$S'_e = K_a.K_b.K_c.K_d.K_e.K_f.S_e \quad (2.16)$$

Onde:

- $K_a$  = Fator de superfície
- $K_b$  = Fator de tamanho;
- $K_c$  = Fator de carregamento;
- $K_d$  = Fator de temperatura;
- $K_e$  = Fator de confiabilidade;
- $K_f$  = Fator de efeitos diversos;

#### 2.2.4 Silo de alimentação

Quando se fala em armazenamento e controle de fluxo de materiais a granel, o mecanismo usado para este fim é chamado de silo, que é diferente de um reservatório de fluidos, tendo assim uma teoria de cálculo diferente.

O design de silos variam quanto à geometria, ao tamanho, à esbeltez, ao tipo de entrada de ar e construção em relação ao solo. A parte inferior do silo é chamada especificamente de tremonha e desempenha importantes funções de descarga e controle de fluxo dos materiais armazenados. A tremonha pode variar quanto ao formato e ao ângulo de inclinação. Falando especificamente de silos conectados à transportadores helicoidais, a tremonha possui geometria de cunha, onde o comprimento do bocal de saída é o mesmo da seção de entrada.

Segundo Vieira (2009), o ângulo de inclinação da tremonha influencia no tipo de fluxo de material que irá ocorrer, podendo ser dois: fluxo de massa ou fluxo de funil. No fluxo de massa todas as partículas do material estão em movimento durante o processo de descarga, já o fluxo de funil caracteriza-se pela formação de um canal de fluxo, alinhado com a boca de descarga, envolvido por uma zona na qual o produto permanece estático (zona estagnada). A Figura 24 apresenta um esquema representativo dos dois tipos de fluxo.

Assim, o fluxo de massa é considerado o ideal para o uso em questão, visto que suas principais características são (ARAÚJO, 1997):

- O fluxo é uniforme e bem controlado.
- Não existem regiões de sobrecarga no interior do silo.

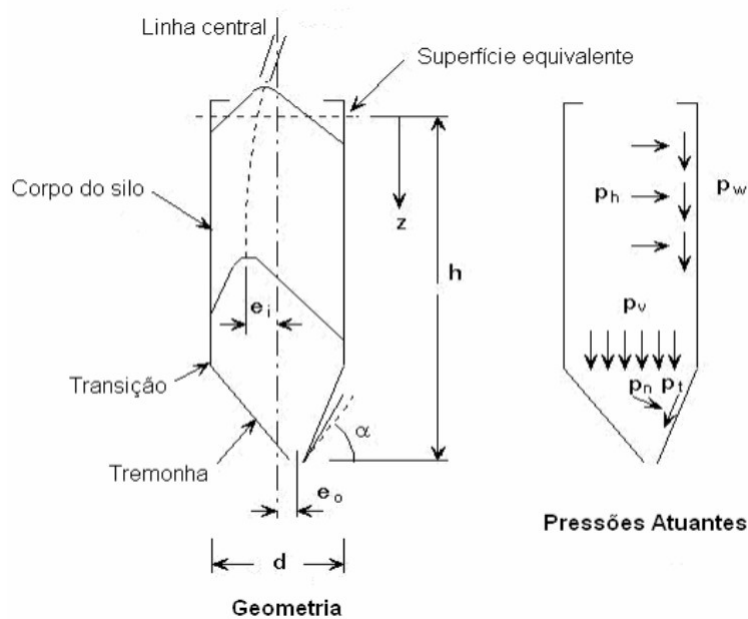


Figura 23 – Principais constituintes de um silo e pressões atuantes. (VIEIRA, 2009)

- As pressões, em qualquer seção transversal horizontal das tremonhas, são relativamente uniformes, ocasionando consolidação e permeabilidades do material também uniformes.

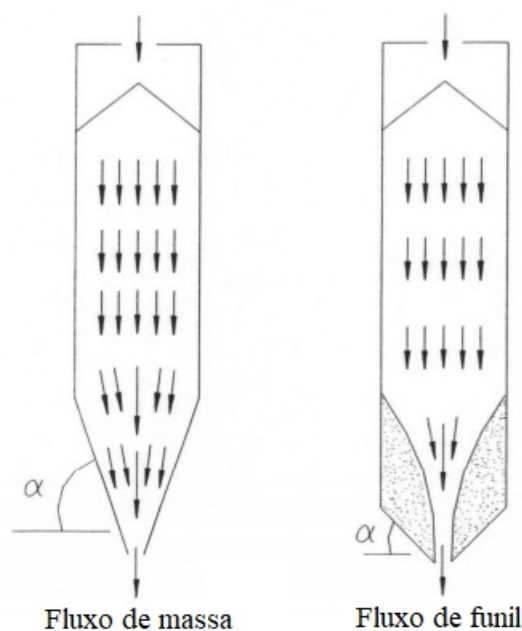


Figura 24 – Tipos básicos de fluxo de material em silos. (ARAÚJO, 1997)

As teorias em volta dos cálculos das pressões presentes em silos são diversas, a norma europeia EN 1991-4:2006 (EUROCODE, 2006) é um fonte bastante robusta que foca nas ações presentes em silos e tanques. Vieira (2009) faz uma análise detalhada de um dos métodos de cálculo das pressões em tremonhas descrita por esta norma.

Segundo a norma, a decomposição das pressões que atuam sobre as paredes da tremonha seguem o modelo proposto na Figura 25.

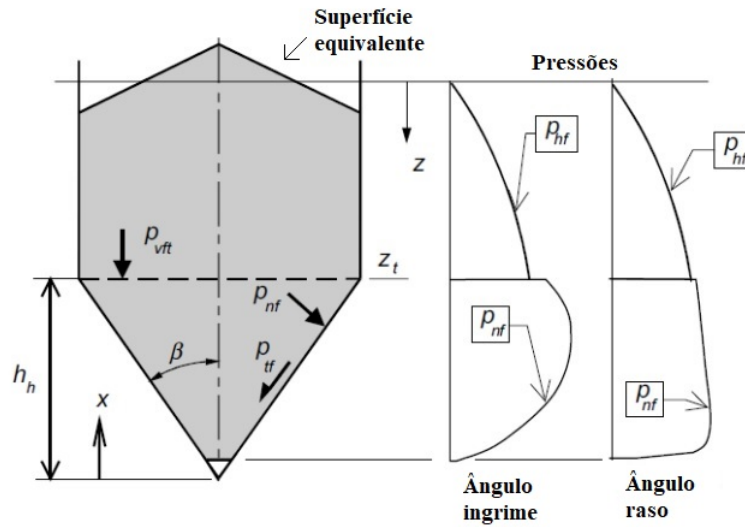


Figura 25 – Tipos básicos de fluxo de material em silos. (adaptado de Eurocode (2006))

Para determinar os valores da pressão normal,  $p_{nf}$ , que atuam sobre a parede da tremonha, a norma sugere o uso da equação 2.17.

$$p_{nf} = F_f \cdot p_v \quad (2.17)$$

Onde,  $F_f$  é a razão de pressão da tremonha após o enchimento, calculado pela equação 2.18, e a pressão vertical sobre o material armazenado,  $p_v$ , é calculada pela equação 2.19.

$$F_f = 1 - \frac{b}{\left(1 + \frac{\tan \beta}{\mu_h}\right)} \quad (2.18)$$

Em que:

- $\beta$  = Inclinação da parede da tremonha ( $^\circ$ );
- $b$  = Coeficiente empírico;  $b = 0,2$ ;
- $\mu_h$  = Valor característico inferior do coeficiente de atrito entre o material e a parede da tremonha.

$$p_v = \left(\frac{\gamma_h \cdot h_h}{n - 1}\right) \left\{ \left(\frac{x}{h_h}\right) - \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \right\} + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h}\right)^n \quad (2.19)$$

Onde:

- $\gamma_h$  = Valor característico superior do peso específico ( $kN.m^{-3}$ );

- $h_h$  = Altura vertical da tremonha (m);
- $x$  = Coordenada vertical da pressão na tremonha (m);
- $S$  = Coeficiente ligado ao formato da tremonha;  $S = 1$  para tremonhas tipo cunha.
- $n$  = Potência relacionada a pressão na tremonha, calculada pela equação 2.20.
- $p_{vft}$  = Pressão vertical no material armazenado na seção de transição após o enchimento, calculado pela equação 2.21.

$$n = S(F_f \cdot \mu_h \cdot \cot \beta + F_f) - 2 \quad (2.20)$$

$$p_{vft} = C_b \cdot p_{vf} \quad (2.21)$$

Em que  $C_b$  é um fator de carga para levar em conta a possibilidade de cargas maiores serem transferidas para a tremonha ou para o fundo do segmento de parede vertical (para silos de capacidade menor que 100 ton,  $C_b = 1$ ). A pressão vertical no material armazenado após o enchimento,  $p_{vf}$ , pode ser calculada pela equação 2.22;

$$p_{vf} = \gamma \cdot z_v \quad (2.22)$$

Onde:

$$z_v = h_0 - \frac{1}{(n+1)} \left( z_0 - h_0 - \frac{(z + z_0 - 2h_0)^{n+1}}{(z_0 - h_0)^n} \right) \quad (2.23)$$

Em que:

- $z_v$  = Medida de profundidade usada para avaliação de tensão em silos;
- $h_0$  = Profundidade abaixo da superfície equivalente da base da pilha de material superior (ponto mais baixo na parede que não está em contato com o material, vide Figura 26), calculada pela equação 2.24;
- $z_0$  = Altura equivalente da superfície na massa de produto (m), calculada pela equação 2.25.

$$h_0 = \frac{d_c}{4} \tan \phi_r \quad (2.24)$$

$$z_0 = \frac{1}{k\mu} \cdot \frac{A}{U} \quad (2.25)$$

Onde:

- $d_c$  = Dimensão característica do interior da seção transversal do silo (Fig. 26);
- $\phi_r$  = Ângulo de repouso de uma partícula de material (Fig. 26);
- $\mu$  = Coeficiente de atrito entre o material e a parede do silo;
- $k$  = Taxa de pressão lateral;
- $A$  = Área da seção transversal do silo;
- $U$  = Perímetro interno da seção transversal do silo;

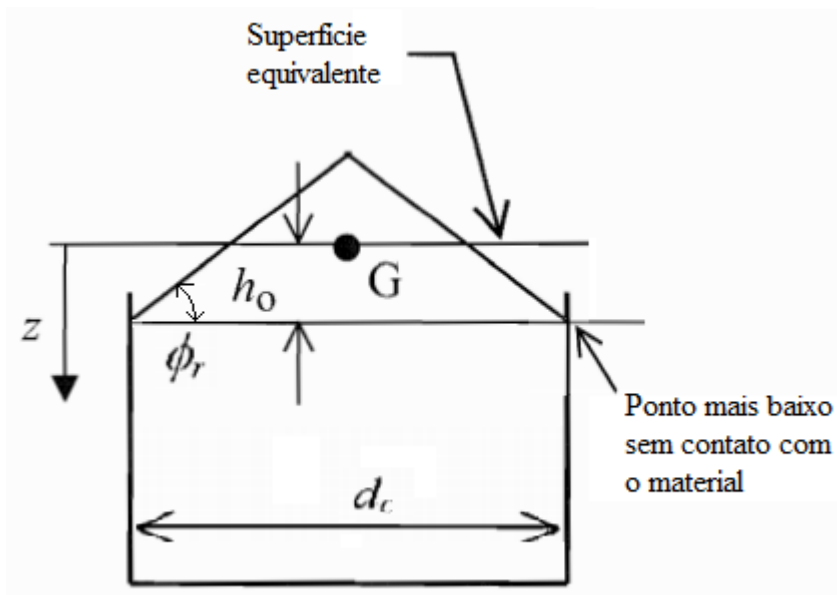


Figura 26 – Características dimensionais de um silo. (adaptado de Eurocode (2006))



## 3 ESTUDO DE CASO

### 3.1 Apresentação do equipamento



Figura 27 – Renderização 3D da Peletizadora BEP-200 (LIPPEL, 2016)

A máquina à ser reestruturada neste projeto é uma peletizadora do tipo matriz plana, modelo BEP-200, da fabricante Lippel Metal Mecânica Eireli (Fig. 27), foi projetada pela própria empresa e fabricada em fevereiro de 2016. A Tabela 2 apresenta um resumo dos dados técnicos gerais.

O equipamento completo é composto por dois principais sistemas: o sistema de peletização, composto pela peletizadora de matriz plana e o painel de controle, e o sistema de alimentação contínua, constituído por um silo e um transportador helicoidal. Além disso, o equipamento possui separadamente uma estrutura de escada para facilitar o acesso do operador ao silo de alimentação.

Segundo o manual do fabricante, a máquina BEP-200 foi projetada para trabalhar com quase a totalidade dos materiais lignocelulósicos, visto que possui um motor potente

de 15hp e tem a funcionalidade de ajuste da lacuna entre os rolos e matriz, característica que será melhor descrita na Seção 3.1.2.

Tabela 2 – Dados técnicos da Peletizadora BEP-200 (LIPPEL, 2016)

<b>Informações técnicas</b>	<b>Dados</b>
Fabricante	Lippel Metal Mecânica Eireli.
Modelo	BEP-200
Tipo	Matriz plana
Capacidade	Até 200 kg/h
Alimentação	Automática/Manual
Diâmetro dos <i>pellets</i> (matriz)	6-7-8 mm
Potência motor (peletizadora)	15 hp
RPM de operação (peletizadora)	230 rpm
Número de rolos compactadores	2 Rolos
Peso do conjunto	650 kg
Peso da peletizadora	275 kg
Diâmetro da matriz	200 mm
Peso da matriz	4 kg
Sistema de alimentação contínua	Transportador Helicoidal
Motoredutor	Motor 4P, 60Hz e 1,00cv; redução 1:130
Alimentação	220/380V
Tomada	Plug único 3P+N+T 16A

### 3.1.1 Sistema de alimentação

O módulo de alimentação da peletizadora BEP-200 (Fig. 28), que no processo de peletização fica posicionado antes do sistema de peletização, tem como função automatizar e uniformizar o fluxo de alimentação da biomassa à ser depositado na câmara de peletização. O conjunto inteiro é basicamente um transportador de eixo helicoidal, composto pelos seguintes componentes: um silo de entrada, um eixo central com hélices do tipo simples, um moto redutor, um mancal terminal de apoio do eixo, uma calha cilíndrica com bocal de saída da biomassa e um bocal de descarga de gases, tudo fixado em uma estrutura metálica com rodízios giratórios. A tabela 3 apresenta as dimensões gerais aproximadas deste módulo.



Figura 28 – Módulo de alimentação da Peletizadora BEP-200, posicionado sobre o módulo de peletização.

Tabela 3 – Dimensões aproximadas do módulo de alimentação (LIPPEL, 2016)

Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
1821	660	2340

A velocidade de alimentação do transportador pode ser ajustada manualmente pelo operador, através de um potenciômetro que controla a velocidade de rotação do eixo transportador, presente no painel do equipamento (Fig. 37). De acordo com o manual do equipamento, existe também um sistema de ajuste automático da velocidade de alimentação atrelado a corrente do motor de peletização. Caso ocorra dessa corrente ultrapassar o limite nominal do motor, o sistema paralisa o movimento do transportador helicoidal, segurando a deposição de material até que a corrente volte para níveis normais.

O silo de alimentação possui o formato de uma tremonha, com ângulo de inclinação íngreme, e é posicionado de forma a englobar o eixo helicoidal em sua base, garantindo com que as hélices fiquem submersas pelo material armazenado. Essa característica é relevante para uniformização do fluxo de alimentação.

A entrada superior do silo é aberta, não possuindo nenhum mecanismo de tampa, tem formato retangular e possui laterais inclinadas que afinam até formar o fundo que segue a curvatura da calha. A calha em si tem formato tubular e é totalmente fechada, sem nenhum tipo de mecanismo de abertura, o que dificulta a limpeza do sistema. Em uma das extremidades, a calha é soldada a base do silo de alimentação, criando um prolongamento por onde o eixo helicoidal passa internamente.

Todo o conjunto silo e calha é fabricado em material metálico fechado, sem conter nenhum ponto de visibilidade da parte interna em suas laterais, característica que dificulta

a observação da quantidade e do movimento do material armazenado. A tabela 4 descreve as dimensões características deste conjunto.

Tabela 4 – Dimensões características do silo e da calha. (LIPPEL, 2016)

Dimensões	Dados
Comprimento da entrada do silo	1000 <i>mm</i>
Largura interna da entrada do silo	600 <i>mm</i>
Altura total do silo	705 <i>mm</i>
Diâmetro externo da calha	220 <i>mm</i>
Comprimento da calha	1200 <i>mm</i>
Volume interno do silo	0,27 <i>m</i> <sup>3</sup>

O volume interno total do silo é de aproximadamente 0,27 *m*<sup>3</sup>. Considerando que a biomassa composta de resíduos agrícolas tem uma densidade entre 80-100 *kg/m*<sup>3</sup> e a biomassa de resíduos florestais entre 150-200 *kg/m*<sup>3</sup> (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018), o silo teria uma capacidade máxima de armazenamento por volta de 21-54 *kg* para os materiais tipicamente usados. Foi levantado junto à equipe do LPF que as amostras de biomassa utilizadas em seus experimentos possuem massa em torno de 5kg, requisito abaixo da capacidade máxima atual do silo.



Figura 29 – Eixo helicoidal interno ao silo de alimentação.

O eixo helicoidal (Fig. 29), posicionado internamente ao silo e a calha, de um lado é acoplado ao moto redutor e do outro é suportado por um mancal tipo flange com rolamento da fabricante *FRM*, modelo F208. As hélices do eixo são do modelo padrão simples e lisas, possuem espessura de aproximadamente 3,5 *mm*. As dimensões do eixo helicoidal estão apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões do eixo helicoidal.

Dimensões	Dados
Comprimento do helicóide	2100 mm
Diâmetro nominal do eixo central	50 mm
Diâmetro externo da hélice	180 mm
Passo	90 mm
Espessura da hélice	3,5 mm

Ao final do helicóide, próximo ao mancal terminal do eixo, está localizado o bocal cilíndrico de saída do material, que deve ser direcionado para a entrada do sistema de peletização durante o processo. Centralizado com esse bocal, existe 4 retângulos soldados ao eixo em formato de cruz, mecanismo utilizado para direcionar o material em direção a saída, visto em detalhe na Figura 30(b). Posicionado na calha, exatamente acima do bocal de saída do material, existe um bocal de descarga utilizada para direcionar a saída dos gases gerados durante o processo de peletização (Fig. 30(a)).



(a) Bocal de saída e chaminé.



(b) Mecanismo de direcionamento da biomassa presente no eixo helicoidal.

Figura 30 – Detalhes do bocal de saída da calha do sistema de alimentação.

O moto redutor elétrico acoplado ao eixo helicoidal é do modelo GO34, da fabricante *Geremia Redutores*. O motor elétrico é de 4 polos, 60hz, 1700rpm e com potência de entrada de 1,00cv. O conjunto possui uma redução de 1:130, dessa forma a rotação máxima no eixo helicoidal do transportador é de 13,1 rpm.

A partir da metodologia apresentada na seção 2.2.3.1, mais especificamente utilizando a equação 2.6, podemos encontrar a vazão máxima do sistema de alimentação da peletizadora em questão. Considerando que a densidade típica de biomassa para produ-

ção de *pellets* varia em torno de 80-200  $kg/m^3$  dependendo da composição, a tabela 6 apresenta a capacidade encontrada e as características utilizadas para o cálculo.

De acordo com o manual do equipamento, a capacidade máxima de produção da peletizadora é de 200 kg/h. Considerando o fato de o sistema de alimentação possuir um controle manual da velocidade do eixo helicoidal, onde podemos alcançar velocidades de rotação menores que 13,1 rpm, entende-se que a capacidade de alimentação está dentro dos limites requeridos pela peletizadora.

Dessa forma, para o projeto de reestruturação deste módulo, devemos manter as características que definem a capacidade de alimentação atual do equipamento, sendo elas o diâmetro externo da hélice e o passo do helicóide.

Tabela 6 – Características do transportador helicoidal da peletizadora BEP-200.

Definição	Símbolo	Valor
Densidade do material	$\lambda$	80 - 200 $kg/m^3$
Fator de correção do ângulo de inclinação	$K$	1
Velocidade de rotação do eixo	$n$	13,1 rpm
Fator de correção do volume ocupado	$\gamma$	0,95
Diâmetro externo da hélice	$D$	0,18 m
Passo do helicóide	$t$	0,09 m
Área ocupada pelo material	$s$	0,0242 $m^2$
Velocidade de deslocamento do material	$v$	0,0197 m/s
Vazão mássica do helicóide	$Q$	136,80 - 342,01 kg/h

### 3.1.2 Sistema de peletização



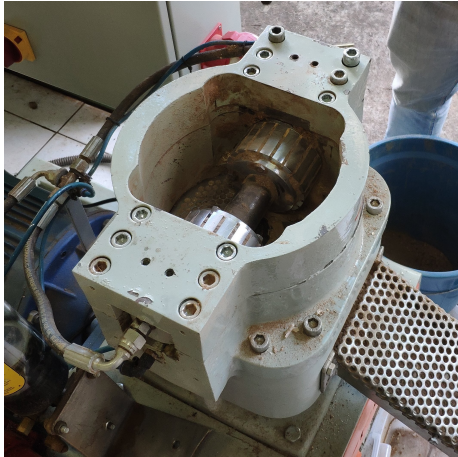
Figura 31 – Módulo do sistema de peletização, posicionado abaixo do transportador helicoidal.

O sistema de peletização do equipamento (Fig. 31) é um módulo separado do sistema de alimentação, montado sobre quatro rodízios giratórios para facilitar a movimentação. É composto pelo motor da peletizadora, pelo sistema de peletização, pelo sistema hidráulico e pelo painel de controle do equipamento. A tabela 7 apresenta as dimensões gerais aproximadas do conjunto montado.

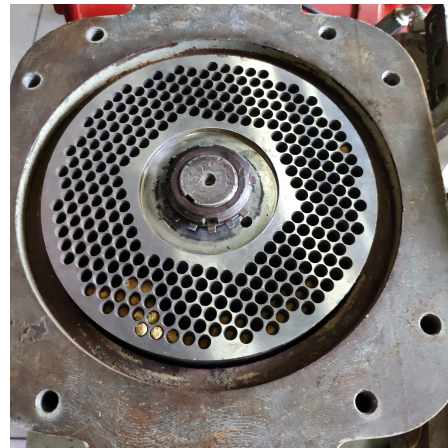
Tabela 7 – Dimensões aproximadas do módulo de peletização (LIPPEL, 2016)

Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
973	765	1141

O sistema de peletização é do tipo matriz plana com dois rolos de compressão, posicionados internamente à uma carcaça metálica que forma a câmara de peletização (Fig. 32(a)). O motor elétrico do sistema é acoplado à um eixo de transmissão que se conecta ao eixo principal a partir de uma caixa de engrenagem. O eixo principal tem saída na parte interna da carcaça, onde a matriz é fixada (Fig. 32(b)), fazendo desta a entrada de torque do sistema.



(a) Carcaça metálica externa aos rolos e a matriz.



(b) Matriz fixa ao eixo motor.

Figura 32 – Detalhes da carcaça montada e da matriz do sistema de peletização.

A fixação da matriz sobre o eixo principal é realizada com o uso de duas chavetas diametralmente opostas na ponta do eixo (Fig. 33(a)). Após posicionar a matriz no eixo, coloca-se um anel dentado e então rosqueia-se no eixo uma porca projetada especificamente para impedir o movimento axial da matriz (Fig. 33(b)).



(a) Posicionamento das chavetas sobre o eixo.



(b) Porca sobre a ponta rosqueada do eixo.

Figura 33 – Detalhes da fixação da matriz sobre o eixo principal.

A carcaça é dividida em três partes: inferior, central e superior. A parte inferior é fixada à estrutura do módulo e possui o bocal de saída dos *pellets*, abaixo do nível da matriz (Fig. 34(a)). Neste mesmo plano é posicionado e fixo ao eixo um disco fatiador (Fig. 34(b)), que tem como função cortar os *pellets* e lança-los em direção ao bocal de saída. A parte central é posicionada sobre a parte inferior, fixada por 8 parafusos (M-12 8.8), na qual a superfície da matriz ficará nivelada com a junta dessas duas partes, formando a base da câmara de peletização onde a biomassa será depositada (Fig. 32(b)).





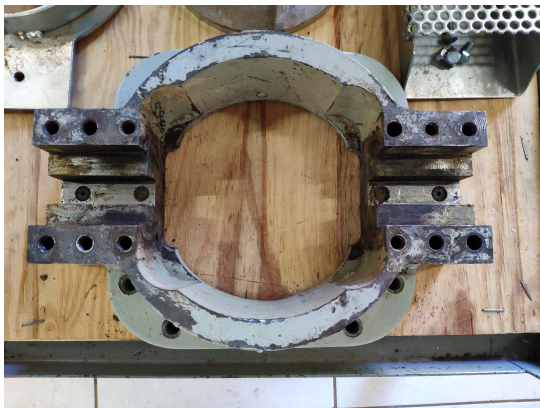
(a) Detalhe do bocal de saída de *pellets* na carcaça inferior.



(b) Disco fatiador posicionado sobre o eixo, abaixo da matriz.

Figura 34 – Detalhes da parte inferior da carcaça de peletização.

Na parte central da carcaça (Fig. 35(a)), vemos os encaixes no qual o eixo dos rolos é posicionado, projetado de forma que entre com certa interferência. Após posicionados, os rolos não entram em contato direto com a matriz, ficam à uma distância que pode ser ajustada através do sistema hidráulico presente na parte superior da carcaça. Ao encaixar carcaça superior sob a parte central, os pistões hidráulicos (35(b)) ficam posicionados sobre as extremidades do eixo dos rolos e, a partir do bombeamento hidráulico, pressionam os rolos em direção a matriz, diminuindo a lacuna entre eles.



(a) Parte central da carcaça.



(b) Pistão hidráulico presente na tampa da carcaça.

Figura 35 – Detalhe das partes central e superior da carcaça do sistema de peletização.

De acordo com o manual do equipamento, além de gerar pressão sobre os rolos, a parte hidráulica do sistema objetiva funcionar como um amortecedor, possibilitando que os rolos tenham movimento no sentido vertical. A pressão ideal varia de acordo com o material à ser peletizado e a pressão máxima de trabalho é de  $35 \text{ MPa}$ .

O eixo dos rolos é fabricado de modo a ter um sistema de lubrificação para os rolamentos, onde a entrada de fluido é pela lateral axial do eixo conectada a um sistema de bombeamento que é fixo à superfície da parte superior da carcaça. Os rolos possuem

ranhuras horizontais de extremidades abertas, característica benéfica contra problema de travamento dos rolos. O detalhe de montagem, bem como os componentes do sistema de rolos pode ser visto na Figura 36.

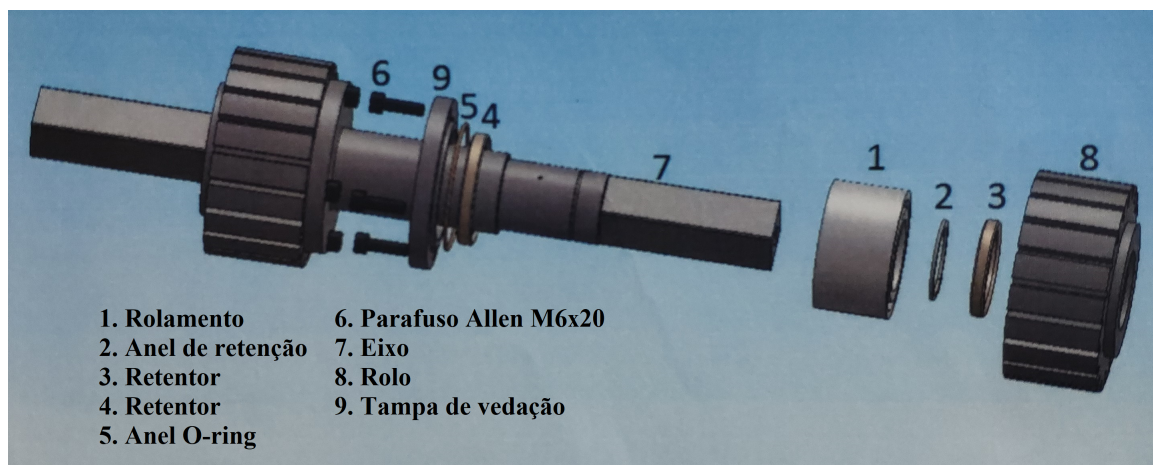


Figura 36 – Componentes do eixo dos rolos do sistema de peletização. (LIPPEL, 2016)

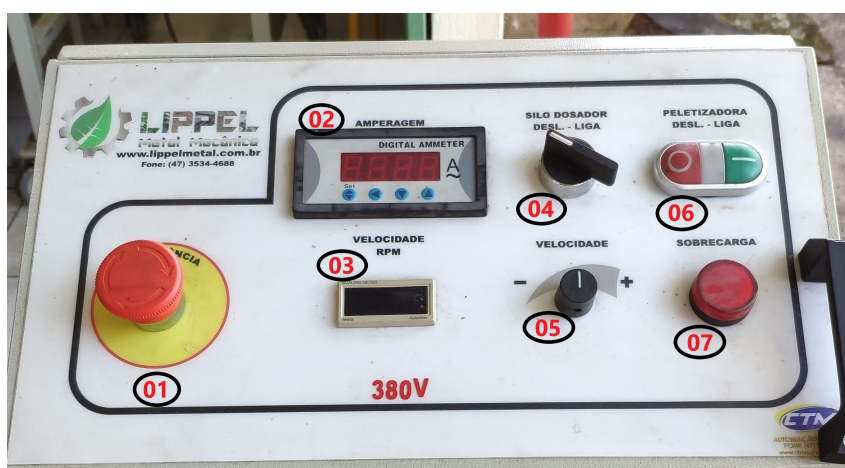


Figura 37 – Painel de controle do equipamento, acoplado ao módulo de peletização.

O painel do equipamento (Fig. 37) é a central de controle para toda a máquina, todo o sistema é energizado a partir dele. Na parte de trás do painel se encontra a chave geral do equipamento, quando desligada todos os componentes ficam sem energia, mas em caso de manutenção também deve-se retirar o equipamento da tomada. Além da chave geral, tem-se 2 botões de emergência, um localizado no painel e outro conectado por um cabo, permitindo o operador posicionar onde for mais efetivo. A seguir descreve-se os componentes do painel:

- Botão de emergência (01): o botão deve ser utilizado apenas em situações reais de parada total do equipamento ou necessidade, não deve ser usado como forma de desligar o equipamento.
- Indicador de amperagem (02): visor que indica a corrente que o motor da peletizadora está trabalhando, deve ser observado para realizar uma alimentação correta da

peletizadora sem sobrecarregar o sistema. A corrente máxima de trabalho admissível é de 22,35 A, podendo ter picos de até 10% a mais.

- Indicador de velocidade (**03**): indica a velocidade de rotação da rosca alimentadora do silo, em *RPM*.
- Liga/Desliga Silo (**04**): Chave seletora liga e desliga do módulo de alimentação, quando virada à esquerda desliga o transportador helicoidal.
- Velocidade (**05**): potenciômetro usado para regular a velocidade da rosca alimentadora, aumentando ou diminuindo a rotação. O equipamento também possui sistema NO-STRESS, que consiste em diminuir a velocidade de alimentação automaticamente conforme a corrente do motor de peletização aumenta.
- Liga/Desliga Peletizadora (**06**): Botões para ligar ou desligar o módulo de peletização separadamente.
- Indicador de sobrecarga (**07**): indicador LED vermelho, onde a luz acenderá caso o motor da peletizadora sofra sobrecarga de corrente.

## 3.2 Teste diagnóstico

Para realizar o levantamento das demandas e restrições do projeto, primeiramente buscou-se registrar os relatos da equipe de pesquisa do LPF sobre as condições de contorno dos experimentos praticados por eles, bem como identificar os pontos de gargalo presenciados na peletizadora BEP-200. Posteriormente, foi realizado um teste diagnóstico com o equipamento de estudo para análise e confirmação dos problemas apresentados.

Com o intuito de compreender o funcionamento de uma máquina peletizadora na prática, acompanhou-se a equipe em experimento de peletização realizado com uma peletizadora de escala apropriada presente na FAL (Fig. 38). Neste encontro, foi possível visualizar uma produção completa de *pellets*, registrar a importância da temperatura da matriz para a qualidade dos produtos, compreender o sistema de alimentação contínua e seu controle de velocidade, presenciar o processo de montagem e desmontagem da peletizadora, presenciar o problema de travamento dos rolos e foi possível identificar boas práticas e exemplos de uma produção adequada para a equipe.

Nessa visita à FAL, foi possível entender as necessidades da equipe e levantar as possíveis modificações para a peletizadora BEP-200. Para compreender as restrições do equipamento, registrar sua capacidade atual e identificar as origens dos problemas existentes, realizou-se um teste diagnóstico de peletização. O teste consistiu na realização de um processo completo de peletização, utilizando biomassa cedida pela própria equipe do LPF.



(a) Registro durante montagem da peletizadora.



(b) Peletizadora aberta após processo de peletização.

Figura 38 – Registros da visita à peletizadora da fabricante ENG-MAQ presente na FAL.

O teste não tinha como finalidade a produção de *pellets* de qualidade, mas sim observar o comportamento da máquina durante seu funcionamento. Dessa forma, foi utilizado como material de teste um blend de resíduos de madeira de serragem (Fig. 39). O condicionamento de umidade da biomassa foi realizado no momento do teste e a granulometria estava irregular, contendo pedaços maiores que o recomendado para peletização, dessa forma conseguimos observar o comportamento do sistema quando ocorre o travamento dos rolos de peletização.



(a)



(b)

Figura 39 – Blend de biomassa utilizado no teste diagnóstico de peletização.

Após realizar o condicionamento da biomassa, preparou-se todo o sistema de peletização realizando a montagem e posicionamento de todos os componentes e verificou-se toda a segurança do local e equipamento de teste, onde a máquina em estado pronto para teste pode ser visto na Figura 31.

Então, depositou-se toda a biomassa no silo de alimentação, momento o qual foi possível perceber o quanto o silo possui um volume superdimensionado para a escala de teste utilizada pela equipe de pesquisa. A Figura 40 apresenta do espaço ocupado por toda a biomassa utilizada durante o teste.



Figura 40 – Amostra de biomassa depositada no silo de alimentação.

Após colocar o material no silo, verificou-se a pressão hidráulica aplicada sobre os rolos de compressão e então iniciou-se o teste ligando apenas o módulo de peletização, o qual a matriz é o componente girante do sistema. Neste ponto, observou-se que, como esperado, os rolos não tinham movimento, visto que existe a lacuna proposital entre eles e a matriz girante. Notou-se também que sem a presença de biomassa o sistema não apresentou variações aparentes de temperatura, visto que todo o calor gerado é devido a força de atrito criada pelo contato da biomassa com os componentes.

Em seguida, ligou-se o silo alimentador, iniciando assim o processo de transporte da biomassa. Confirmou-se neste ponto que o controle manual da velocidade de rotação do eixo estava funcionando corretamente. Então, com o tempo iniciou-se a deposição de matéria-prima na peletizadora e após formar a camada superficial de material entre a matriz e os rolos ocorreu o início do movimento de ambos os rolos de compressão.

A partir deste ponto, começou a surgir uma cadeia de problemas. A medida que a deposição do material continuou acontecendo, a corrente do motor de peletização passou a subir rapidamente, como pôde ser visto através visor de corrente no painel do equipamento. Após uma certa quantidade de material, os rolos de compressão começaram a apresentar problema de travamentos e com isso a corrente de alimentação do motor começou a ultrapassar o limite do sistema. Percebeu-se que quando o sistema apresentava a indicação de sobrecarga, ele parava automaticamente a alimentação de biomassa, paralisando o movimento do eixo helicoidal, como um mecanismo de segurança.

Dessa forma, esperava-se que o sistema de segurança contornasse a situação, proporcionando paradas regulares do sistema de alimentação de forma síncrona com a produção de peletização, porém isto não ocorreu. O teste foi finalizado no momento em que a equipe percebeu que a quantidade de biomassa dentro da câmara de peletização estava excessiva, chegando ao ponto de transbordar a altura dos rolos. A Figura 41 apresenta o registro da situação, após finalização do teste.



Figura 41 – Biomassa transbordando câmara de peletização após realização do teste diagnóstico.

A princípio, não foi possível apontar uma única origem para os travamentos dos rolos, acredita-se que os principais fatores que podem ter influenciado são: temperatura inadequada de operação, tamanho inadequado das partículas do material, pressão excessiva no sistema hidráulico dos rolos (lacuna muito pequena) ou até por controle inadequado do fluxo de alimentação.

Após o desligamento da máquina, realizou-se desmonte dos componentes para observar outros possíveis detalhes. Neste momento, foi possível compreender a dificuldade existente para realizar a desmontagem da carcaça de peletização, como relatado pela equipe de pesquisa.

Para retirar a parte superior da carcaça é necessário remover 12 parafusos Allen M-12 8.8 e só então irá ter acesso ao eixo dos rolos. A retirada de todos os parafusos toma um tempo e esforço o qual a equipe deseja que seja melhorado, além disso a carcaça superior não possui nenhum tipo de alça para facilitar o içamento manual. Para a retirada do eixo dos rolos, deve-se lembrar que este foi pressionado pelo sistema hidráulico em direção a se aproximar da matriz, sendo assim necessário vencer a interferência criada para a remoção deste componente. A máquina não acompanha ferramenta adequada para a situação, então atualmente a equipe utiliza de um sistema de alavancas improvisadas.

Depois de remover a carcaça superior e posteriormente o eixo com os rolos, identificou-se que houve a deposição de matéria-prima no espaço existente entre os rolos e a parede da carcaça, como pode ser visto na Figura 42(a). Já pela Figura 42(b) conseguimos identificar que o material depositado no local indevidamente durante a rotação do rolo, formou uma espécie de lâmina de material densificado.



(a) Registro com o eixo ainda montado.



(b) Registro após retirada do eixo.

Figura 42 – Registro da deposição indevida de matéria-prima entre o rolo e a parede da carcaça.

Foi levantada a hipótese da presença deste material densificado entre a lateral dos rolos e a parede da carcaça ter gerado forças de atrito excessivas sobre os rolos, aumentando a energia necessária para que ocorra o movimento de giro. Dessa forma, o movimento da biomassa devido ao giro da matriz não teria criado atrito suficiente para girar o rolo em torno de seu próprio eixo, ocasionando o efeito de deslizamento ou trava dos rolos.

Devido ao problema de sobrecarga do motor de peletização e consequente parada inesperada do equipamento, o teste não apresentou resultados adequados de produção de *pellets*. Devido a falta de um sistema de monitoramento térmico, não foi possível identificar se a temperatura de peletização ideal de operação ou da matriz foram alcançadas.

### 3.3 Levantamento de demandas e restrições

As demandas e restrições do presente projeto foram determinadas a partir da realização do teste diagnóstico com a máquina de estudo, a partir da comparação com observações realizadas sobre o uso de outra peletizadora com capacidade adequada e a partir das variáveis de contexto descritas pela equipe de pesquisa que adquiriu e utilizou o equipamento em experimentos prévios. Decidiu-se dividir o levantamento entre os dois principais módulos do equipamento: sistema de alimentação e sistema de peletização.

#### 3.3.1 Sistema de alimentação

- Demandas:

1. Reestruturar o formato do silo de forma a compatibilizar o volume interno com a demanda de uso laboratorial: como descrito na seção 3.1.1, o silo apresenta um volume interno de  $0,27 \text{ m}^3$ , o que dependendo da composição da biomassa

representa uma massa entre 21-54kg, onde o requisitado pela equipe do LPF está entre 5-10 kg, como relatado.

2. Projetar pontos de visibilidade da biomassa armazenada no silo: atualmente o silo não apresenta nenhum tipo de visor em suas laterais, o que dificulta controle da quantidade e fluxo da biomassa armazenada.
3. Projetar mecanismo de abertura para calha: atualmente a calha presente no sistema é vedada para acesso em sua parte central, o que gera dificuldades para realização de limpeza e conseqüentemente matéria-prima pode se acumular no espaço existente entre as hélices e parede.

- Restrições:

1. Capacidade de alimentação do transportador helicoidal: como determinado no estudo de caso, a capacidade de alimentação do sistema está de acordo com a capacidade de produção da peletizadora, dessa forma devemos manter as características do eixo que definem a vazão do transportador;
2. Moto redutor e mancal do eixo helicoidal: com o objetivo de minimizar os custos, deve-se reaproveitar estes dois componentes no projeto de redimensionamento do eixo helicoidal;
3. Estrutura de apoio: deve-se aproveitar ao máximo os pontos de fixação e apoio estrutural do sistema atual, de forma a diminuir custos em material e de manter a altura ideal do bocal de saída em relação a entrada da peletizadora.
4. Bocal de saída da biomassa: a interseção entre o bocal de saída da matéria-prima e a entrada da câmara de peletização devem ter diâmetros correspondentes, de forma a gerar uma vedação durante a deposição, evitando perda de material. No mecanismo atual já temos essa relação, portanto devemos mantê-la no presente projeto.

### 3.3.2 Sistema de peletização

- Demandas:

1. Facilitar o processo de desmontagem da carcaça e rolos de compressão: atualmente o sistema construtivo de fixação desses elementos dificulta a agilidade na hora da limpeza e manutenção dos componentes de peletização, dessa forma deve-se pensar em mudanças estruturais que resultem maior rapidez e facilidade no processo de desmontagem.
2. Controlar sintoma de travamento dos rolos: como registrado pelo teste diagnóstico realizado (Seção 3.2), durante o processo de peletização do sistema atual ocorre o fenômeno de travamento dos rolos. Apesar de existirem outros fatores que podem provocar essas travas (Seção 3.2), percebe-se que quando



ocorre a entrada de material no espaço existente entre a lateral dos rolos e a parede da carcaça, esta biomassa acaba densificando pelo atrito gerado no local e conseqüentemente provoca uma resistência indevida sobre a lateral do rolo, aumentando assim a força necessária para gerar o movimento de giro. Deve-se pensar em uma solução para aliviar este sintoma indesejado.

3. Projetar sistema de monitoramento térmico: como descrito na secção 2.1.4.2, a temperatura de peletização é um dos fatores influentes na qualidade da produção, dessa forma deve-se pensar em um solução de monitoramento térmico da câmara interna de peletização.
4. Investigar necessidade de pré-aquecimento da matriz: atualmente o aumento da temperatura do sistema ocorre somente devido ao atrito gerado com a presença da biomassa, o que cria a necessidade de uma quantidade de material sacrifício até se atingir a temperatura ideal de peletização. Dessa forma, existe a necessidade de se analisar o transiente térmico atual da matriz durante o processo de peletização.

- Restrições:

1. Manter capacidade de produção atual: visto que os componentes mecânicos e elétricos, que determinam a capacidade máxima de produção do equipamento, possuem custos elevados, ao realizar os projetos de reestruturação deve-se garantir que nenhuma mudança afete negativamente a eficiência atual do sistema de peletização.
2. Pressão do sistema hidráulico: ao realizar as modificações do sistema de fixação da carcaça, deve-se levar em consideração a pressão exercida pelo sistema hidráulico dos rolos, que segundo o manual do equipamento, exerce uma pressão máxima de trabalho de 35 *MPa*.

### 3.4 Proposta de reestruturação

A intenção deste trabalho é propor modificações estruturais sobre a máquina peletizadora BEP-200, de forma a adequar o equipamento às demandas de uso da equipe de pesquisa do laboratório e facilitar a utilização durante o processo de peletização. Além disso, as soluções de propostas devem ser manufaturáveis, financeiramente aplicáveis e manter o funcionamento original do equipamento.

As alterações propostas para reestruturação da máquina são:

- Compatibilizar o volume do silo com a demanda de uso do laboratório;
- Adicionar pontos de visibilidade no silo, para monitoramento do volume da biomassa armazenada no silo;

- Adicionar mecanismo de abertura da calha do transportador helicoidal, para facilitar a limpeza;
- Modificar sistema de fixação da carcaça, de forma a facilitar o processo de desmontagem.

# 4 RESULTADOS

## 4.1 Sistema de Alimentação

A reestruturação do sistema de alimentação se dará pelos seguintes pontos: na adequação do volume de armazenamento interno do silo, na criação de um ponto de visibilidade na lateral inclinada do silo e na criação de um mecanismo de abertura da calha do sistema. Todos os desenhos técnicos se encontram no anexo B.

### 4.1.1 Ajuste de volume do silo

Para a adequação do volume do silo, devemos lembrar de que a quantidade de biomassa recomendada pela equipe de pesquisa para dimensionamento do projeto foi de 5kg. Considerando uma biomassa com a menor densidade aparente de material levantada neste trabalho,  $80kg/m^3$ , tem-se um volume mínimo de silo de  $0,0625 m^3$  para se adequar à demanda.

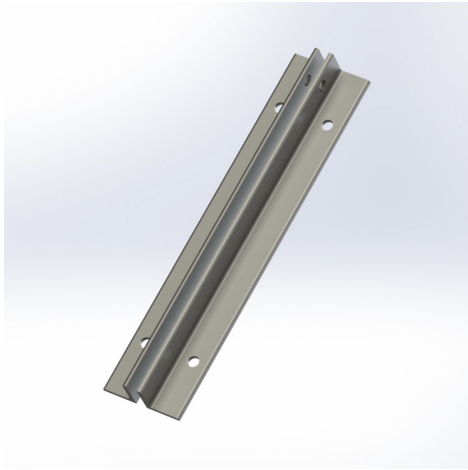
A solução determinada para adequação do volume do silo teve como principais motivações:

- Garantir uma adaptabilidade do volume, de forma a não restringir o uso da máquina;
- Manter originalidade do equipamento em relação ao transportador helicoidal, visto que foi determinado que seu dimensionamento está correto para a demanda prevista;
- Facilitar a manufatura e aproveitar a estrutura já existente do equipamento.

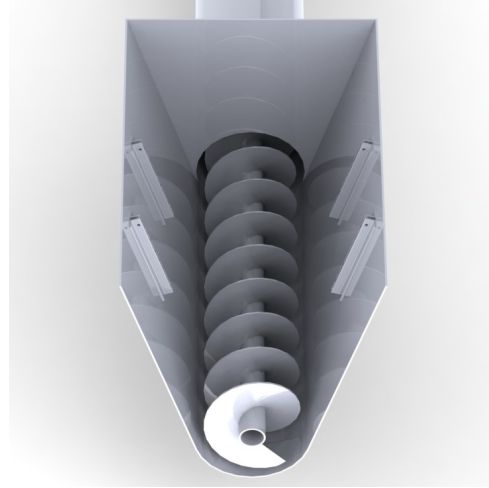
A solução definida consiste em manter o comprimento e largura original do silo, porém serão adicionados guias verticais internamente às paredes do silo, posicionadas em pontos estratégicos, de forma a permitir o posicionamento de placas que irão performar como uma parede de contenção para a biomassa. As placas serão removíveis, permitindo que se tenham diferentes configurações de posicionamento e assim teremos uma adaptabilidade do volume do silo.

A construção dos guias verticais será realizada com a utilização de cantoneiras de aço padronizadas, fixadas paralelamente às paredes internas do silo com o uso de

parafusos M6 e porcas autotravantes, de forma a terem um distanciamento entre suas abas, permitindo a passagem e posicionamento da placa de contenção. As cantoneiras possuirão furos passantes de forma a permitir a fixação e apoio da placa de contenção com o uso de parafusos, vide Figura 43.



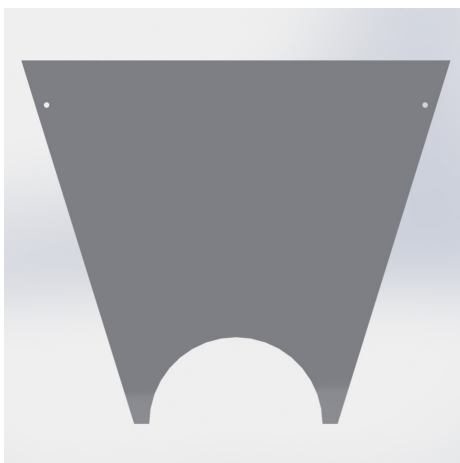
(a) Cantoneiras opostas com furo posicionadas como guia.



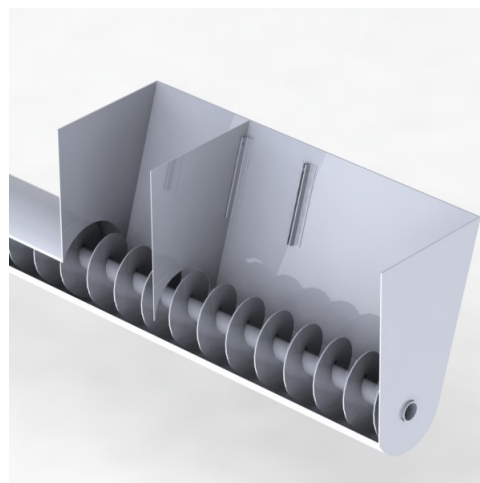
(b) Cantoneiras posicionadas internamente ao silo.

Figura 43 – Demonstração das guias verticais utilizadas para posicionamento das placas de contenção.

A placa de contenção foi projetada de forma a funcionar como uma parede para a biomassa que é depositada dentro do silo, criando uma câmara interna ao silo e limitando o volume total suportado naquele espaço. A placa terá como material Aço SAE 1010, de forma a ser facilmente encontrado e garantir a resistência necessária. O formato da placa foi projetado de forma a vedar o maior espaço possível e assim criar uma câmara interna, porém sem restringir o movimento do transportador helicoidal, vide Figura 44. Sua fabricação será através de corte a laser para garantir a precisão das dimensões.



(a) Formato da placa.



(b) Placa posicionada internamente aos guias.

Figura 44 – Demonstração da placa de contenção.

Dessa forma, a placa será posicionada utilizando as cantoneiras guias e será fixada com o uso de parafusos através dos guias presentes dos dois lados da placa. Como a placa não pode impedir o movimento do transportador helicoidal, existirá um espaço o qual a biomassa depositada poderá escorrer no sentido contrário do movimento (Figura 45), fora da limitação da câmara criada, porém não será um problema visto que toda a biomassa será levada em direção ao bocal de saída com o movimento do transportador.

Uma das vantagens de se utilizar esta solução se comparado com redimensionar o silo por completo é de que a placa é removível, permitindo que seja colocada em outra configuração de guias e assim modificando o volume máximo suportado. Não perder o volume original do silo permitirá com que o laboratório utilize um grande volume de biomassa, caso surja uma necessidade futura.

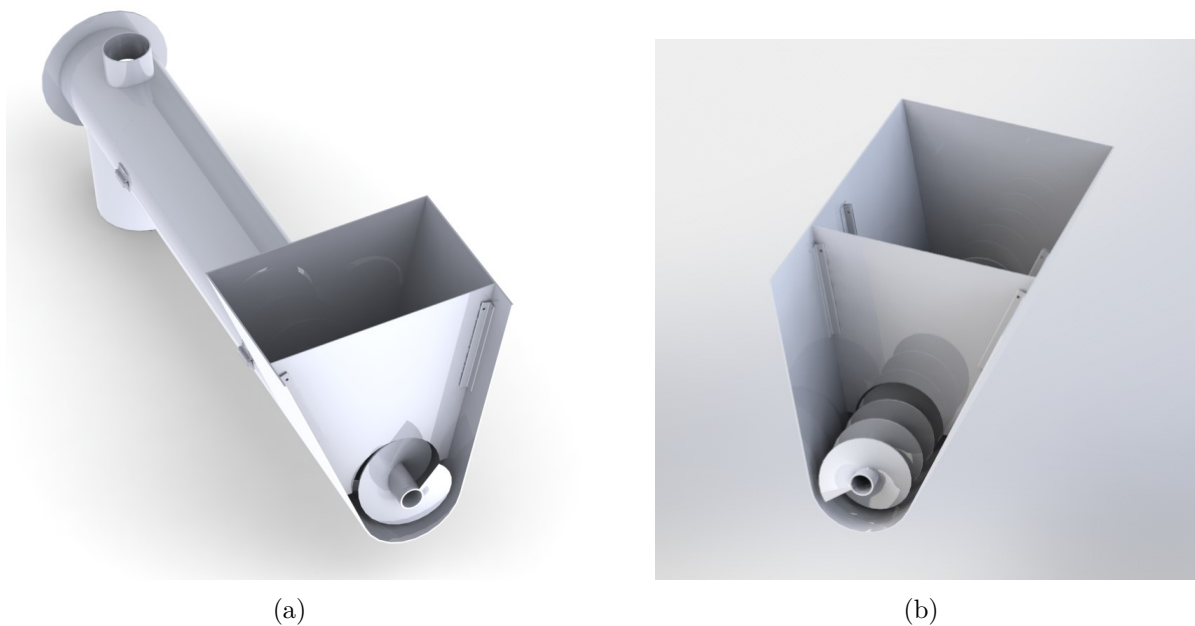


Figura 45 – Vistas de corte com a placa posicionada no conjunto de guias que gera menor volume.

Definiu-se utilizar dois conjuntos de guias, de forma a criar três opções de câmaras com volumes diferentes. Com a placa posicionada na configuração 1 (Figura 46), forma-se a primeira câmara, projetada para suportar a demanda de 5Kg definida pela equipe do laboratório, sendo a de menor volume. Com a placa na configuração 2, temos uma câmara de volume intermediário, sendo este metade do volume original. Já a terceira configuração é sem nenhuma placa de contenção, ou seja, o volume original do silo.

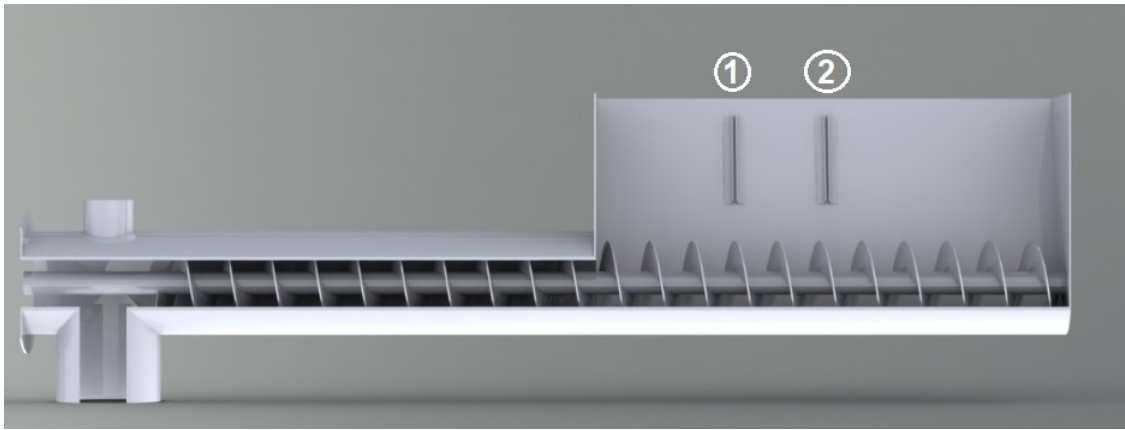


Figura 46 – Indicação das posições possíveis para a placa de contenção, configurações 1 e 2.

Por último, visando a necessidade da equipe de laboratório de ter maior facilidade de manuseio e monitoramento do silo de alimentação, decidiu-se diminuir a altura do silo em 200mm para melhor adaptação e usabilidade. A Tabela 8 apresenta uma comparação dos volumes obtidos para as diferentes configurações, com e sem o corte vertical.

Tabela 8 – Volumes determinados para as diferentes configurações do sistema de alimentação.

<b>Configuração</b>	<b>Altura original</b>	<b>Altura menor</b>
Sem placa de contenção	0,264 $m^3$	0,157 $m^3$
Configuração 1	0,078 $m^3$	0,046 $m^3$
Configuração 2	0,131 $m^3$	0,078 $m^3$

#### 4.1.2 Visor volumétrico do silo

Para garantir a visualização da biomassa depositada internamente à câmara de armazenamento do silo, decidiu-se utilizar duas placas de acrílico transparente de 2mm posicionadas em cada uma das laterais do silo, de forma a ficarem internas à primeira câmara, quando a placa de contenção está na primeira posição, vide Figura 47. As placas serão fixas com o uso de parafusos M4 cabeça Allen, arruelas e porcas calota.

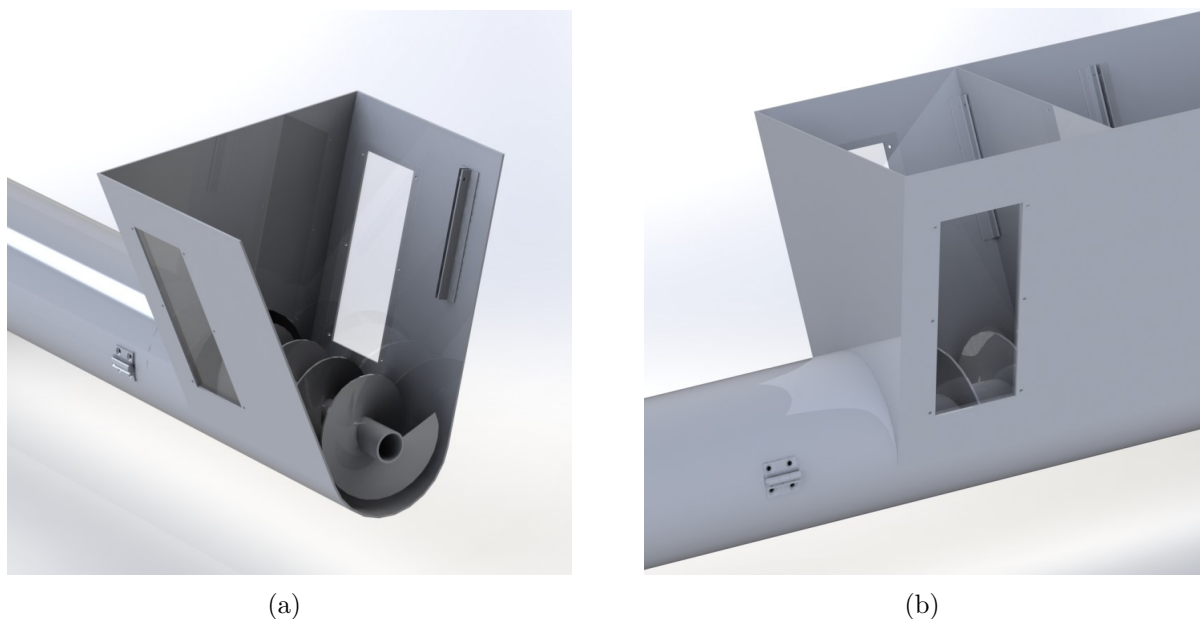


Figura 47 – Vistas em corte dos acrílicos posicionados na primeira câmara de armazenamento.

Com o intuito de facilitar o controle da quantidade de biomassa armazenada, propõe-se adicionar escalas volumétricas ao visor, uma para cada configuração de posicionamento da placa de contenção, no a fabricação pode ser realizada com o auxílio de gravação a laser. A Figura 48 apresenta um esquema de como ficaria a escala sobre o visor de acrílico.

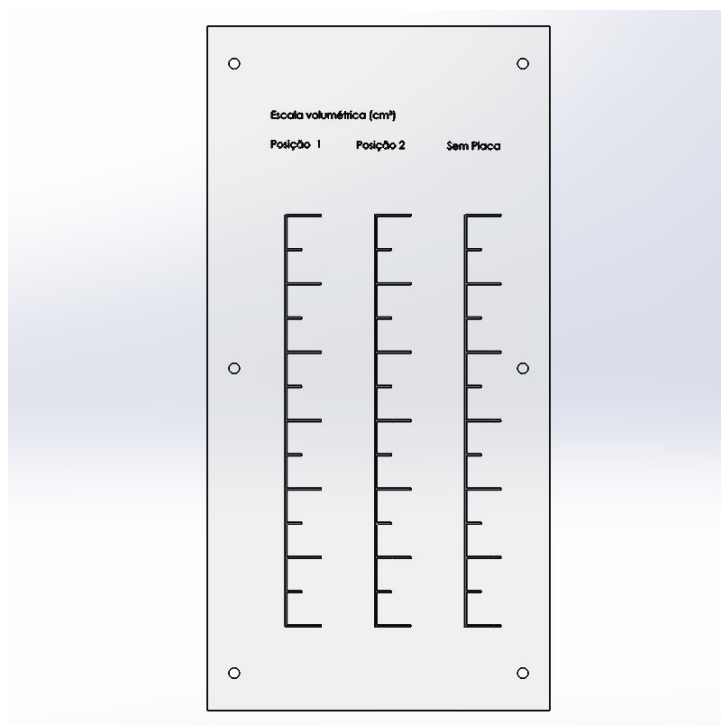


Figura 48 – Esquema representativo de escalas gravadas na placa de acrílico.

### 4.1.3 Mecanismo de abertura da calha

Para criar o mecanismo de abertura da calha, pretende-se utilizar o próprio tubo já existente, evitando a compra de novos materiais. A proposta é realizar um corte longitudinal ao centro do diâmetro da calha, somente em parte da seção entre a parede do silo e o plano do bocal de saída, retirando assim a parte que será utilizada como a tampa da calha (Figura 49).

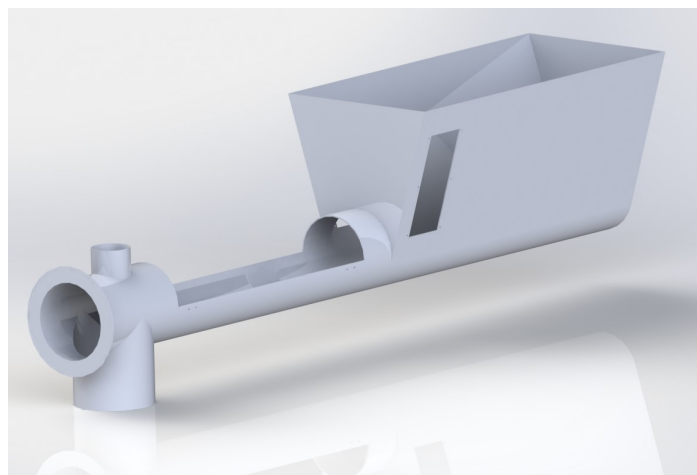
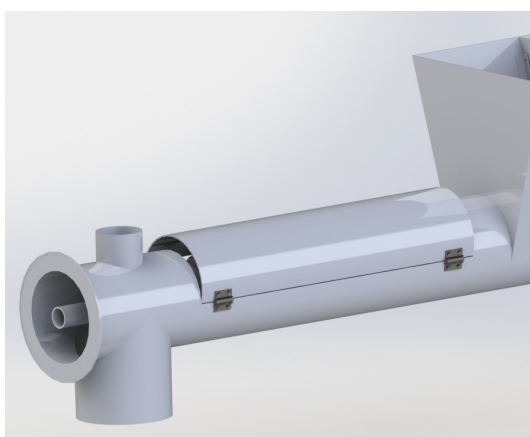
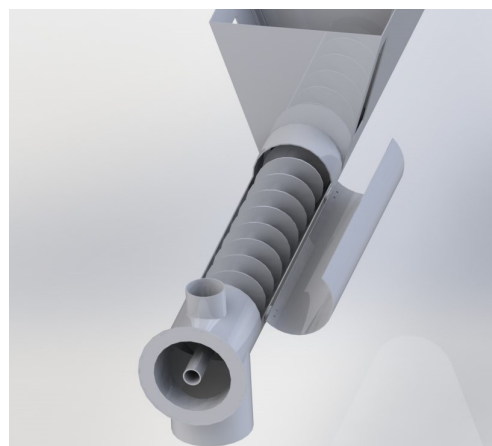


Figura 49 – Estrutura do silo de alimentação com a tampa da calha removida.

Para a fixação da tampa sobre o restante do corpo da calha e como mecanismo de abertura serão utilizadas dobradiças do tipo borboleta com limite de  $120^\circ$  de abertura, de modo a permitir o repouso da tampa. A tampa com as dimensões definidas terá uma massa de aproximadamente 7200g, dessa forma selecionou-se a dobradiça modelo FYHHPSNH6-120 da fabricante Dongguan, que de acordo com o catálogo suporta uma carga máxima de 98N, no qual serão utilizadas duas no projeto. A Figura 50(a) ilustra a tampa e o mecanismo posicionados no sistema de alimentação, já a Figura 50(b) apresenta a tampa em sua abertura máxima.



(a)



(b)

Figura 50 – Vistas do mecanismo de abertura da calha.



Ao realizar o corte sobre da tampa da calha, irá gerar um desgaste de material pelo desbaste da máquina de corte, dessa forma irá existir um espaçamento entre a tampa e o corpo da calha após a montagem. Pensando nisso, propõe-se o uso de perfis de borracha para vedação ao logo de toda a extremidade da calha. Já para que a tampa não abra durante o processo de peletização, serão utilizados fechos de engate rápido, como por exemplo o apresentado na Figura 51.



Figura 51 – Fecho de engate rápido com encaixe para cadeado, modelo FB3/E2. (FERRAMENTAS, 2021)

## 4.2 Sistema de Peletização

A reestruturação do sistema de peletização terá como foco facilitar o processo de desmontagem da carcaça da câmara de peletização, modificando o sistema de fixação atualmente utilizado.

### 4.2.1 Mecanismo de fixação da carcaça

Para facilitar o processo de desmontagem da parte superior da carcaça, que hoje é bastante onerosa para a equipe, utilizou-se de inspiração outros modelos de peletizadora existentes no mercado, principalmente da peletizadora da empresa ENG-MAQ presente na FAL (Figura 52), a qual realizou-se uma visita técnica junto da equipe do LPF, que utilizou o equipamento para peletização de amostras de blends de biomassa no dia da visita.



Figura 52 – Grampo de pressão para fixação da carcaça presente em peletizadora da ENG-MAQ.

A solução proposta consiste na substituição dos 12 parafusos Allen M-12 8.8, atualmente utilizados para fixação da carcaça superior na parte central, por alavancas de pressão, também chamadas de grampos de fixação.

Existem diferentes tipos de grampos de fixação, o que mais se encaixa para nossa aplicação é o tipo grampo tensor, no qual existem modelos desde o mais simples com força de retenção de 65kgf até modelos para aplicações mais robustas de 3400kgf, por exemplo. Os grampos podem ser utilizados em peças coplanares ou em planos perpendiculares, como exemplificados na Figura 53 pelos modelos da fabricante KIFIX.

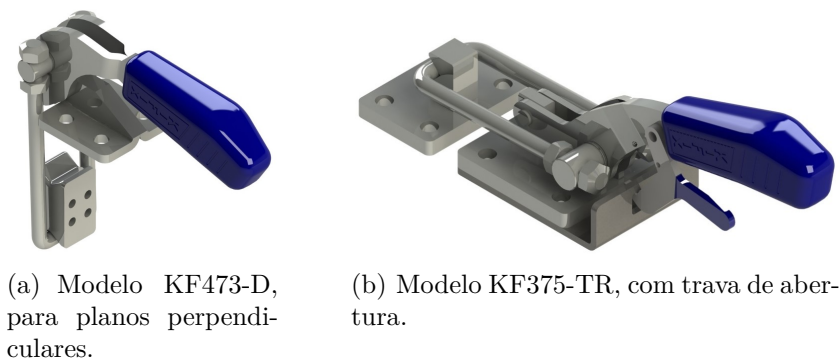


Figura 53 – Modelos de grampo tensor da fabricante KIFIX.

Um detalhe importante para aplicações com presença de vibração, é o uso de mecanismos de trava do grampo, evitando que abra inesperadamente durante o processo. Existem modelos que permitem o uso de cadeados e outros que já possuem mecanismos em sua própria estrutura, como o modelo KF375-TR da KIFIX apresentado na Figura 53(b).

#### 4.2.1.1 Determinação dos esforços

A seleção do caso mais crítico para determinação dos esforços é essencial para a realização da modificação dos sistema de fixação da carcaça, tendo em vista que os rolos exercem pressão sobre a carcaça durante o processo de peletização.

O sistema de peletização da BEP-200 possui um mecanismo de controle da lacuna entre o rolo e a matriz, controlado por um sistema hidráulico acoplado à carcaça superior. A pressão gerada pelo sistema hidráulico é exercida sobre um pistão que então pressiona o eixo do rolo em direção a carcaça central, limitando assim o movimento do eixo dos rolos no sentido vertical. O manual da fabricante da máquina determina que a pressão máxima que pode ser exercida é de 35 MPa, a qual poderia ser usada para dimensionar o grampo tensor.

Porém, visando manutenção da segurança original do equipamento, decidiu-se determinar a carga máxima suportada pelos 12 parafusos já existentes e replicá-la para o conjunto de grampos tensores que serão selecionados.

O tipo de parafuso utilizado para fixar a carcaça superior na central é o de cabeça cilíndrica com sextavado interno M12, classe de resistência 8.8, passo de 1,75mm e rosca parcial de 28mm em seu comprimento, vide Figura 54.



Figura 54 – Parafuso M12, classe de resistência 8.8, utilizado para fixação da carcaça.

Segundo Budynas e Nisbeth (2016), a carga de prova de um parafuso é a carga máxima que este pode suportar sem adquirir uma deformação permanente. Já a resistência de prova é o quociente entre a carga de prova e a área sob tensão de tração. Ainda segundo o autor, essa resistência de prova corresponde ao limite de prova equivalente a uma deformação permanente de 0,0001 polegadas no conector (primeiro desvio mensurável do comportamento elástico).

Em seu livro, Budynas e Nisbeth (2016) descreve que os parafusos seguem normas ISO de padronização, onde sua classe de resistência informa as especificações de resistência de prova, de tração e de escoamento. Então para uma classe de resistência 8.8 temos uma resistência mínima de prova de 600 *MPa*. Já Norton (2013) descreve que roscas padrão ISO, M12 e passo 1,75 possuem área sob tensão de tração de 84,3 *mm*<sup>2</sup>.

Possuindo os dados da área sob tensão de tração, da resistência mínima de prova e sabendo que o parafuso utilizado na carcaça possui um comprimento de rosca de 28mm, totalizando 16 passos de 1,75mm, conseguimos determinar a carga de prova máxima suportada pelo parafuso. A tabela 9 apresenta um consolidado desses dados e o resultado para o conjunto de 12 parafusos e a conversão para kgf.

Tabela 9 – Dados para determinação da carga de prova máxima dos parafusos da carcaça.

<b>Definição</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro maior do parafuso	M12
Passo	1,75 <i>mm</i>
Classe de resistência	8.8
Resistência mínima de prova	600 <i>MPa</i>
Área sob tensão de tração	84,3 <i>mm</i> <sup>2</sup>
Nº de passos de 1 parafuso	16
Carga de prova de 1 parafuso	113,88 <i>N</i>
Carga de prova de 12 parafusos	1480,42 <i>N</i> (150,96 <i>kgf</i> )

#### 4.2.1.2 Seleção e posicionamento do grampo tensor

Pensando na posição de fixação do grampo sobre a carcaça, deve-se lembrar da existência do sistema hidráulico dos rolos nas extremidades de cada lateral da carcaça superior, dessa forma propõe-se utilizar 4 grampos tensores, um par para cada lado da carcaça, como esquematizado na Figura 55, mantendo assim uma distribuição simétrica dos esforços.

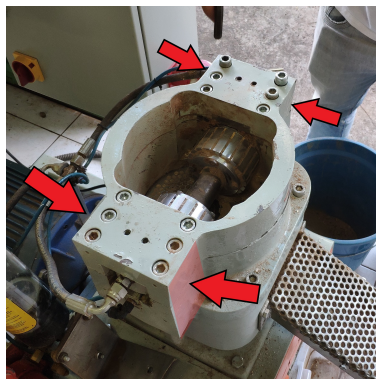


Figura 55 – Esquema indicativo da proposta de posicionamento dos grampos de fixação.

Decidiu-se fixar os grampos tensores selecionados parafusando-os diretamente na carcaça da câmara de peletização, dessa forma a seleção do grampo deve levar em consideração a posição dos parafusos, visto que os furos realizados para confecção da rosca não devem coincidir com os furo dos parafusos originais. Assim, selecionou-se o grampo tensor modelo KF-153DTR da fabricante KIFIX. A Figura 56 apresenta os 4 grampos já posicionados na carcaça da câmara de peletização.



Figura 56 – Grampos KF-153DTR posicionados nas laterais da carcaça.

Segundo o catálogo da fabricante KIFIX, O grampo tensor KF-153DTR possui uma força de retenção de 170 kgf, suprimindo assim a carga de prova dos parafusos M12 atualmente utilizados. Além disso, possui um sistema de trava, como pode ser visto na Figura 57. Sua fixação será realizada com a utilização de parafusos M6, de acordo com as dimensões especificadas em catálogo, de preferência com cabeça Allen para facilitar a montagem.

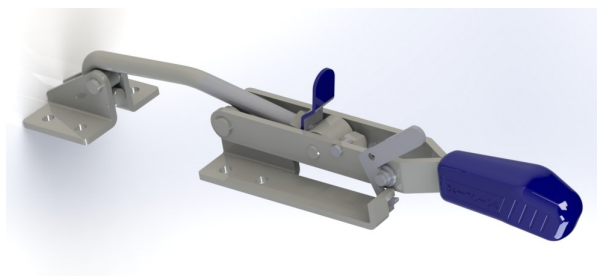


Figura 57 – Grampos KF-153DTR da fabricante KIFIX.

Para garantir um fator de segurança de resistência ao movimento na direção horizontal da carcaça superior, o qual já é resistido pelo atrito gerado com a pressão entre as duas partes da carcaça, serão utilizados dois pares de pinos posicionados sobre os furos já existentes dos parafusos, um par de cada lado, de forma a serem facilmente removíveis. Outra possível solução, de menor custo, é utilizar os próprios parafusos já existentes.

#### 4.2.2 Controle de sintomas de travamento dos rolos

O sintoma de travamento dos rolos, como descrito na seção 2.2.2, pode ser ocasionado por diferentes motivos, dentre eles um fluxo inadequado de alimentação de biomassa. A partir do teste diagnóstico realizado (Seção 3.2), percebemos que existe uma dificuldade de controle desse fluxo de alimentação na máquina BEP-200, no qual foi projetado a modificação de volume do silo que irá contribuir para a solução desse problema de controle.

Dessa forma, definiu-se que após a implementação das modificações no sistema de alimentação, descritas na Seção 4.1, poderá ser realizada uma correta regulagem e controle do fluxo de alimentação de biomassa. E então, tendo a garantia de que temos uma vazão de biomassa de acordo com o estipulado nas descrições de funcionamento do manual e após eliminar a possibilidade da falta de fluxo contínuo ser o problema fonte do travamento dos rolos, poderá ser realizado um controle de sintomas de travamento dos rolos.

### 4.2.3 Monitoramento térmico

Como já descrito na seção 2.1.4.2, a temperatura é um fator importante no processo de peletização, dessa forma faz-se necessário ter um monitoramento térmico da biomassa e da câmara de peletização. Assim, propõe-se o uso de termopares como instrumentos de medição da temperatura da câmara de peletização, com o auxílio de um hardware de controle em placa Arduino. Outra solução mais robusta, porém de maior custo, é utilizar um controlador lógico programável (CLP), no qual normalmente já é utilizado para soluções industriais de automação.

Definiu-se que serão implementados 3 pontos de medição para o sistema: o primeiro irá coletar a temperatura de entrada da biomassa no início da calha de transporte, o segundo a temperatura da biomassa no bocal de saída da calha e o terceiro a temperatura interna da câmara de peletização.

Visando o baixo custo do projeto e respeitando as temperaturas atingidas durante o processo de peletização, como descritos na Seção 2.1.4.2, iremos utilizar termopares tipo K que a equipe do laboratório já possui, onde seu range de temperatura suporta leituras entre -250 e 1250°C. Os termopares serão posicionados em pontos estratégicos da calha e da câmara de peletização, sendo fixados com o auxílio da rosca M6 presente nos cabeçotes do próprio dispositivo (Figura 58) e vedados com silicone térmico para evitar qualquer vazamento.

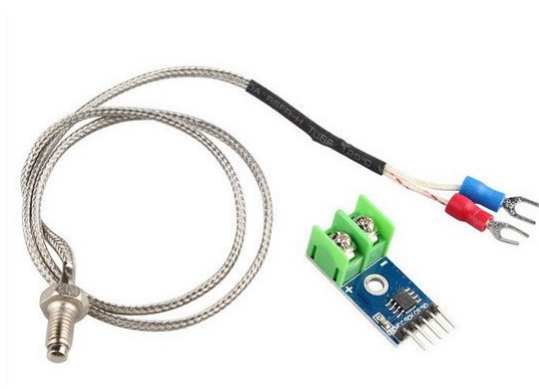
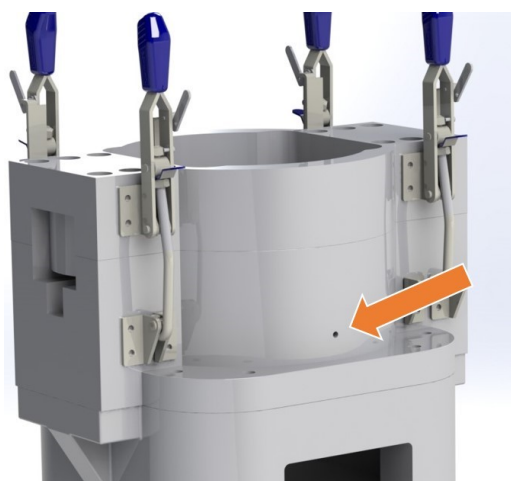
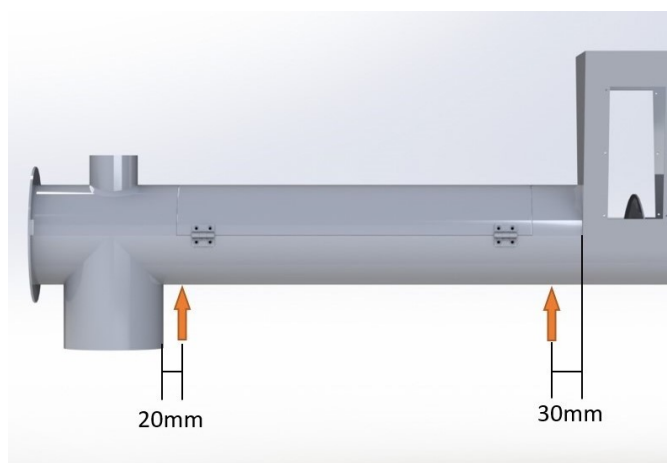


Figura 58 – Representação do Termopar e módulo de leitura para o arduino (Tipo K e modelo Max6675, respectivamente).

O posicionamento do termopar na câmara de peletização foi definido de modo a ficar próximo ao carpete de biomassa formado durante a peletização, porém tomando cuidado para não encostar na matriz. Assim, o termopar ficará posicionado na carcaça central da câmara de peletização, vide Figura 59(a). Já os termopares do sistema de alimentação serão posicionados na parte inferior da calha, vide Figura 59(b).



(a) Carcaça da câmara de peletização.



(b) Calha do sistema de alimentação.

Figura 59 – Indicação de posicionamento dos termopares.

Após a implementação do sistema de monitoramento térmico, será possível investigar a necessidade de pré-aquecimento da matriz a partir das temperaturas adquiridas pelos termopares instalados no sistema.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho entregou o projeto de reestruturação da máquina peletizadora BEP-200, com o objetivo de adequá-la para o uso laboratorial praticado pela equipe de pesquisa do LPF e da UnB.

Primeiramente, foi realizada uma fundamentação teórica sobre o processo de peletização, tecnologias utilizadas e aspectos teóricos da densificação através da matriz de peletização. Foram identificados os parâmetros de processo que influenciam na qualidade dos produtos e no correto funcionamento do equipamento, sendo os principais a pressão de peletização, temperatura de operação, geometria da matriz e parâmetros da matéria-prima utilizada.

Realizou-se um estudo de caso sobre a peletizadora a ser reestruturada, foram identificados seus componentes, fundamentos de operação, dimensões, restrições características e capacidades. Fez-se uma divisão dos módulos de alimentação e peletização apresentando os principais componentes e mecanismos de controle. Também foram levantados os principais problemas já conhecidos e hipóteses de suas origens.

Para realizar o levantamento das demandas e restrições do projeto foi realizado um teste diagnóstico da máquina de estudo. O teste consistiu na realização de um processo completo de peletização, passando por limpeza, montagem, configuração e operação do equipamento. O teste apresentou problemas tanto com o sistema de alimentação, quanto de peletização. Foi identificada a necessidade de outros testes para melhor investigação de problemas com os rolos e temperatura de operação.

O trabalho foi finalizado com a apresentação das soluções e desenvolvimento do projeto de reestruturação do equipamento, de acordo com as demandas e restrições caracterizadas. Entregou-se o projeto de adequação do volume de armazenamento interno do silo, dos pontos de visibilidade de biomassa, do mecanismo de abertura da calha do transportador helicoidal, da modificação do mecanismo de fixação da carcaça da câmara de peletização e do sistema de monitoramento térmico do equipamento. Todas as soluções foram definidas tendo em vista o baixo custo, simplicidade de fabricação e cumprir com as demandas da equipe do laboratório.

Dessa forma, o resultado final, visto nas Figuras 60 e 61, encontra-se detalhado por meio de desenhos técnicos de fabricação, presentes no anexo B.



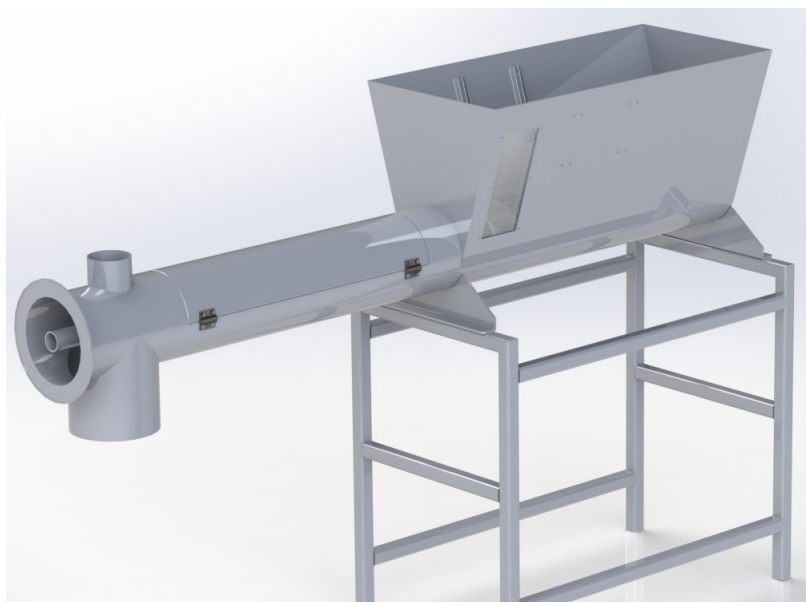


Figura 60 – Montagem do sistema de alimentação com modificações do projeto de reestruturação.

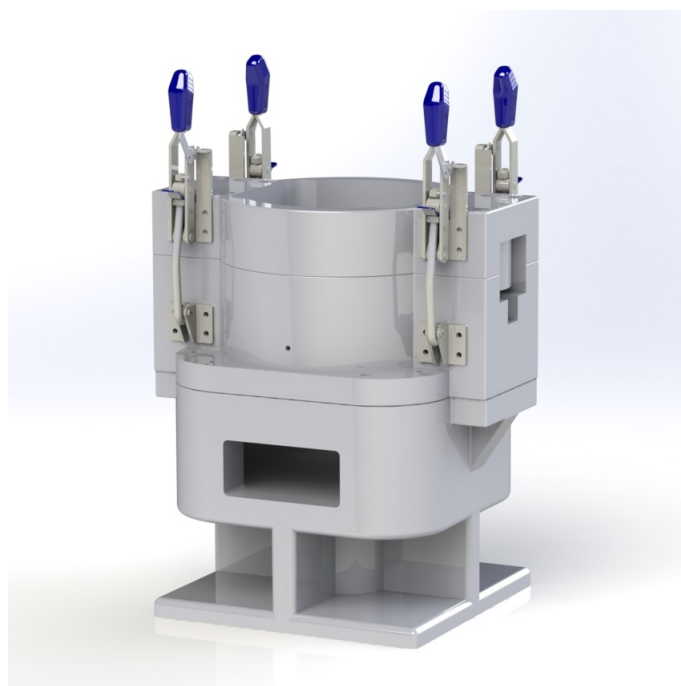


Figura 61 – Montagem da carcaça de peletização com as modificações do sistema de fixação.

## 5.1 Trabalhos futuros

A intenção deste trabalho junto ao escopo projeto realizado pelo CPAB, é que de que as soluções apresentadas sejam implementadas ao final. Dessa forma, com as demandas definidas e os conceitos de soluções apresentadas, deixamos aqui as etapas propostas de trabalhos futuros a serem realizados:

- Identificação, monitoramento e controle dos sintomas de travamento dos rolos: após a implementação das modificações do sistema de alimentação, deve-se realizar uma regulagem do equipamento de forma a garantir um fluxo contínuo de vazão de biomassa. Após este passo, recomenda-se identificar se os sintomas persistem e caso a resposta seja positiva, identificar a fonte e propor solução.
- Investigação do comportamento térmico da câmara de peletização para identificar a necessidade de pré-aquecimento da matriz.

# Referências

- ABC Machinery. *1TPH Biomass Pellet Production Equipment in Bulgaria*. 2020. Disponível em: <<http://www.bestpelletplant.com/1tph-biomass-pellet-production-equipment-in-Bulgaria.html>>. Citado 2 vezes nas páginas iv e 8.
- ANSI/CEMA. *ANSI/CEMA Standard No. 350 - Screw Conveyors for Bulk Materials*. [S.l.: s.n.], 2019. ISBN 9781891171581. Citado 3 vezes nas páginas 23, 25 e 26.
- ARAÚJO, E. C. de. *Estudo teórico e experimental de tremonhas piramidais para silos metálicos elevados*. Tese (Doutorado) — EESC - USP, 1997. Citado 3 vezes nas páginas v, 30 e 31.
- AZEUS. *Diesel flat die pellet mill*. 2020. Disponível em: <<https://www.azeuspelletmill.com/feed-pelletizing/diesel-flat-die-feed-pellet-mill.html>>. Citado na página 20.
- BIOENERGIA, B. *Biomassa Bioenergia*. 2021. Disponível em: <[www.biomassabioenergia.com.br](http://www.biomassabioenergia.com.br)>. Citado 2 vezes nas páginas iv e 3.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. K. *Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 61.
- CARVALHO, V. Desenvolvimento De Um Sistema Para A Dosagem De Micronutrientes Para Ração Animal. p. 63, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- CHEN, W. H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 44, p. 847–866, 2015. ISSN 13640321. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>>. Citado na página 2.
- CONVEYOR. *Screw Conveyor components & design - Version 2.24*. 2016. Citado 5 vezes nas páginas v, 23, 24, 25 e 26.
- ENGMAQ. *Peletizadoras convencionais*. 2020. Disponível em: <<https://www.engmaq.com.br/produtos/peletizadoras-convencionais>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 19.
- EUROCODE. EN 1991-4:2006 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks. 2006. Citado 4 vezes nas páginas v, 31, 32 e 34.
- European Biomass Association (AEBIOM). PELLET MARKET OVERVIEW. European Biomass Association. 2017. Disponível em: <[www.aebiom.org](http://www.aebiom.org)>. Citado 2 vezes nas páginas iv e 4.
- FERRAMENTAS, C. *C&G FERRAMENTAS*. 2021. Disponível em: <[www.cgferramentas.com.br](http://www.cgferramentas.com.br)>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 59.

Garcia-Maraver, A. *Biomass Pelletization Process*. [S.l.: s.n.], 2015. v. 85. 53–66 p. ISBN 9781845660628. Citado 3 vezes nas páginas vii, 10 e 11.

GEMCO. *The components of Die-turned flat die pellet mill*. 2020. Disponível em: <<http://www.gemcopelletmills.com/pellet-mill-parts.html>>. Citado 2 vezes nas páginas iv e 20.

HOLM, J. K. et al. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. *Energy and Fuels*, v. 20, n. 6, p. 2686–2694, 2006. ISSN 08870624. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 16.

KDWS. *Peletizadora KD-150B*. 2020. Citado na página 19.

KWS. *Guia de dimensionamento de transportadores helicoidais*. 2016. Disponível em: <<https://www.kwsmfg.com/engineering-guides/screw-conveyor/>>. Citado 6 vezes nas páginas iv, v, 23, 24, 25 e 26.

LIPPEL, M. M. *Manual Peletizadora BEP-200*. [S.l.]: Metal Mecânica, Lippel, 2016. Citado 10 vezes nas páginas v, vii, 10, 35, 36, 37, 38, 41, 44 e 73.

MACHINERY, L. C. *Peletizadora MKL335*. 2020. Citado na página 22.

MONDAL, D.; NABENDUGHOSH. Study on filling factor of short length screw conveyor with flood-feeding condition. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 1, p. 1286–1291, 2018. ISSN 22147853. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

MOSTAFA, M. E. et al. The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, v. 105, p. 332–348, may 2019. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119300772>>. Citado 8 vezes nas páginas iv, 2, 8, 9, 10, 16, 17 e 26.

NORTON, R. L. *Projeto de máquinas*. [S.l.]: bookman editora, 2013. Citado na página 61.

ONU. *United Nations Sustainable Development – 17 Goals to Transform Our World*. ONU, 2015. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/>>. Citado na página 1.

PEREIRA, B. L. C. *PROPRIEDADES DE PELLETS : BIOMASSAS , ADITIVOS E TRATAMENTO TÉRMICO*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa, 2014. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6843>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

PRADHAN, P.; MAHAJANI, S. M.; ARORA, A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, Elsevier B.V., v. 181, p. 215–232, dec 2018. ISSN 03783820. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382018314085>>. Citado 15 vezes nas páginas iv, 2, 3, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 26 e 38.

REN21. *RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT*. Paris: REN21 Secretariat, 2020. Disponível em: <<https://www.ren21.net/gsr-2020/>>. Citado 4 vezes nas páginas iv, 1, 2 e 3.

- SACRAMENTO, C. L. et al. Relatório Técnico Projeto e Construção de um Transportador Helicoidal Projeto e Construção de um Transportador Helicoidal. p. 33, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- SHEN, G. et al. Reductions in emissions of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of biomass pellets in comparison with raw fuel burning. *Environmental Science and Technology*, v. 46, n. 11, p. 6409–6416, 2012. ISSN 0013936X. Citado na página 8.
- STELTE, W. et al. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, Elsevier Ltd, v. 90, n. 11, p. 3285–3290, 2011. ISSN 00162361. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 15 e 22.
- STELTE, W. et al. Recent developments in biomass pelletization - a review. *BioResources*, v. 7, n. 3, p. 4451–4490, 2012. ISSN 19302126. Citado 6 vezes nas páginas iv, 9, 12, 13, 14 e 15.
- TUMULURU, J. S. et al. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 5, n. 6, p. 683–707, nov 2011. ISSN 1932-104X. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbb.324>>. Citado 6 vezes nas páginas 2, 8, 14, 15, 16 e 22.
- TURNER, R. *Pellet mill die and roller design*. Tese (Doutorado), 2014. Citado 3 vezes nas páginas iv, 22 e 23.
- UNFCCC. *The Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. Disponível em: <[http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php)>. Citado na página 1.
- União Nacional de Bioenergia (UDOP). *Raízen fecha venda de pellets de biomassa a empresas europeias*. 2020. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2020/10/29/raizen-fecha-venda-de-pellets-de-biomassa-a-empresas-europeias.html>>. Citado na página 3.
- VIEIRA, L. H. d. S. Estudo Téorico E Experimental Das Pressões Em Tremonhas Cônicas E Piramidais De Silos Metálicos. p. 128, 2009. Disponível em: <[http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3436/1/DISSERTAÇÃO{O}{A}{O}{\\\_\\\_}Estudote{ó}ricoeexperimentalaldaspress{~}{o}}esemtremonhasc{ô}nicasepiramidai](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3436/1/DISSERTAÇÃO{O}{A}{O}{\_\_}Estudote{ó}ricoeexperimentalaldaspress{~}{o}}esemtremonhasc{ô}nicasepiramidai)>. Citado 3 vezes nas páginas v, 30 e 31.
- WHITTAKER, C.; SHIELD, I. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, v. 71, p. 1–11, may 2017. ISSN 13640321. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116311777>>. Citado na página 9.
- YU, Y. Theoretical modelling and experimental investigation of the performance of screw feeders. p. 254, 1997. Disponível em: <<http://ro.uow.edu.au/theses/1601>>. Citado 3 vezes nas páginas v, 25 e 26.

# Anexos

# A Manutenção

As informações de manutenção para a peletizadora BEP-200 foram retirados do próprio manual do equipamento (LIPPEL, 2016).

Segundo a fabricante, todo e qualquer reparo ou manutenção só poderá ser feito enquanto a máquina está completamente parada. Todos os compartimentos abertos devem ser assegurados contra o fechamento acidental. Existem partes pesadas que podem causar ferimentos.

É importante que após as manutenções seja realizado o torque em todos os parafusos da máquina, conforme a tabela 10. Isso garantirá o aumento da vida útil do equipamento, bem como maior segurança de operação e a eliminação de custos desnecessários com manutenção.

Tabela 10 – Torques dos parafusos da peletizadora BEP-200.

<b>Bitola/Norma</b> <b>Parafuso</b>	<b>Torque de aperto</b>			<b>Periodo</b> <b>inspeção</b>
	Kgf.m	N.m	Lbf.ft	
M-16 8.8	20	197	145	150 horas
M-12 8.8	8,3	81	59,7	150 horas
M-10 8.8	4,8	47	34,7	150 horas
M-08 5.8	1,5	15	11,06	150 horas
M-06 5.8	0,6	6,1	45	150 horas

## A.1 Recomendações de manutenção da máquina:

- Verifique se a matriz está em boas condições;
- Engraxe a máquina;
- Esta máquina possui uma pequena vibração, por isso é necessário que pelo menos uma vez por semana seja feito uma verificação do torque dos parafusos;
- Rolamento vem engraxado de fábrica. Use graxa de qualidade para lubrificação posterior;

- Os rolamentos dos rolos compactadores não devem ser engraxados com frequência, caso haja excesso de graxa irá gerar uma pressão interna no rolamento e irá travar o rolo, caso isso ocorra deve-se retirar as mangueiras de graxa liberando a pressão interna;
- Monitore regularmente a condição e aperto das conexões das mangueiras hidráulicas;
- Use apenas óleo limpo no sistema hidráulico.
- Ao remover os rolamentos dos rolos, a remontagem deve ser feita com graxa de alta temperatura para rolamentos com alta rotação. Graxa indicada: "Graxa azul MP2 para rolamentos alta temperatura FAG".

## A.2 Lubrificação e engraxe:

Seguir corretamente os intervalos de lubrificação, utilizando as graxas e óleos recomendados. Nunca misture fluidos ou óleos entre si, use óleos e graxas de um único fabricante se possível.

Recomendados:

1. Graxa a base de lítio com aditivo de extrema pressão, grau NGLI-2.

- Petrobrás - LUBRAX GMA 2EP;
- Atlantic - LITHOLINE MP2;
- Agip - GR30/EP-NGNI-2;
- Texaco - MULTIFAK EP2.

2. Óleo Lubrificante ISO 220, com aditivos antioxidantes, anticorrosivos, antiespumantes e agentes de extrema pressão.

- Petrobrás - LUBRAX EGF 220PS;
- Texaco - MEROPA 220;
- Mobil - MOBIL GEAR 630.

## A.3 Regulagem da matriz

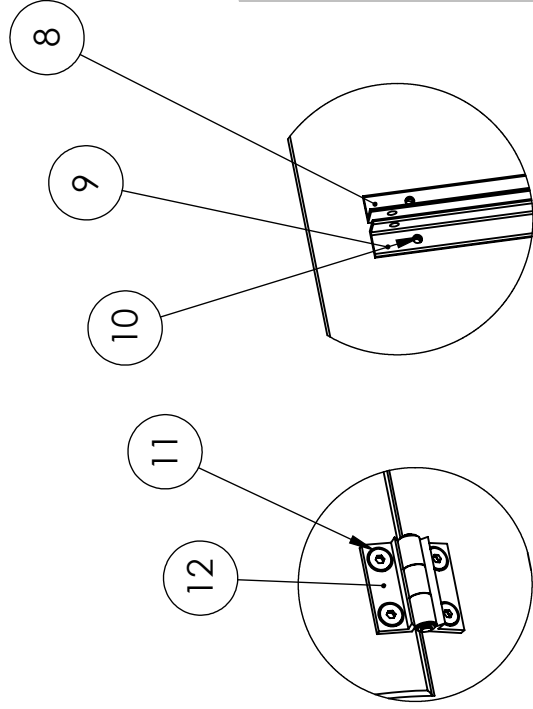
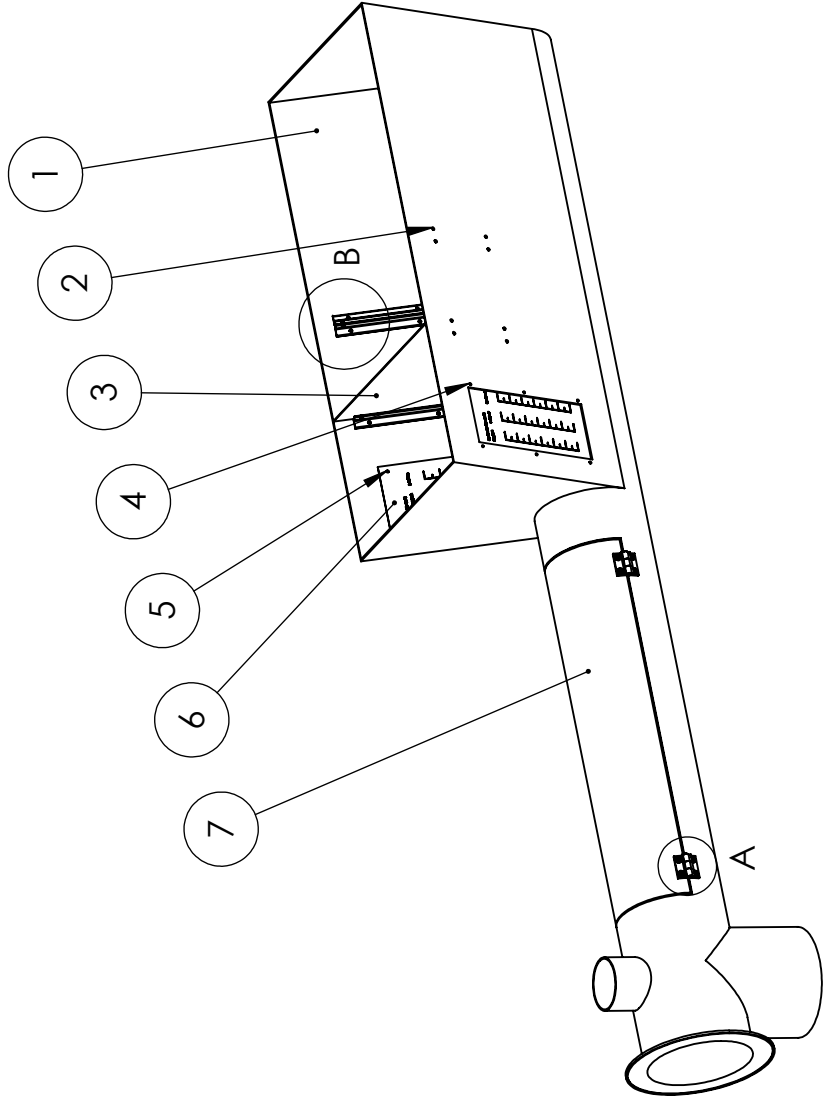
A matriz de compactação é reversível, possibilitando a utilização de ambos os lados. A matriz é colocada no eixo sob um calço de 10mm e a máquina acompanha mais dois calços, um com 10,3mm e outro com 10,6mm de espessura, dessa forma a matriz



pode ser retificada em sua superfície gasta por até dois processos de 0,3mm de desbaste em cada, sendo que ambas os lados devem ser retificados de forma igual para não ocorrer erros com a utilização dos calços.

## **B Desenhos técnicos**

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO DA PEÇA	QTD.
1	Silo de armazenamento	1
2	Parafuso M6x1,00 - cilíndrico sextavado interno	16
3	Placa de contenção	1
4	Parafuso M5x0,8 - cilíndrico sextavado interno	12
5	Porca M5x0,8 - Autotravante	12
6	Visor volumétrico	2
7	Tampa da Calha	1
8	Cantoneira guia direita	4
9	Cantoneira guia esquerda	4
10	Porca M6x1,00 - Autotravante	16
11	Parafuso M6x1,00x16 -cabeça plana sextavado interno	8
12	Dobradiça borboleta 120º	2



DETALHE A  
ESCALA 4 : 15

DETALHE B  
ESCALA 1 : 5

UnB

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação

Data: 11/05/2021

Sistema de alimentação

Dimensão: mm

Nome da Peça:

Desenho de Conjunto

Escala 1:15

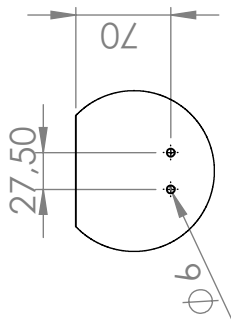
Diedro: 1º

Revisão:

Tolerância onde não especificado:

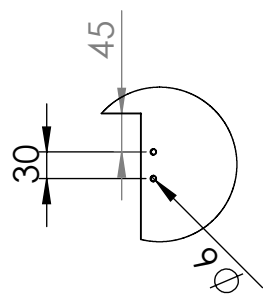
Folha: 1/10

D



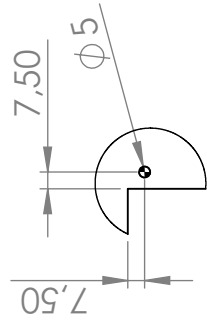
DETALHE A  
ESCALA 3:17

C



DETALHE B  
ESCALA 2:17

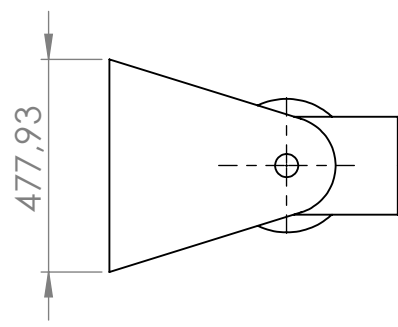
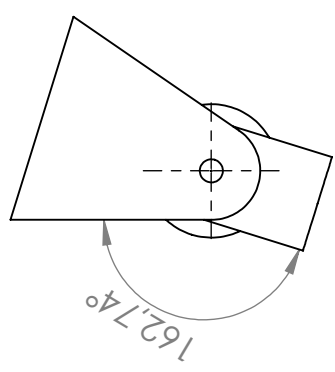
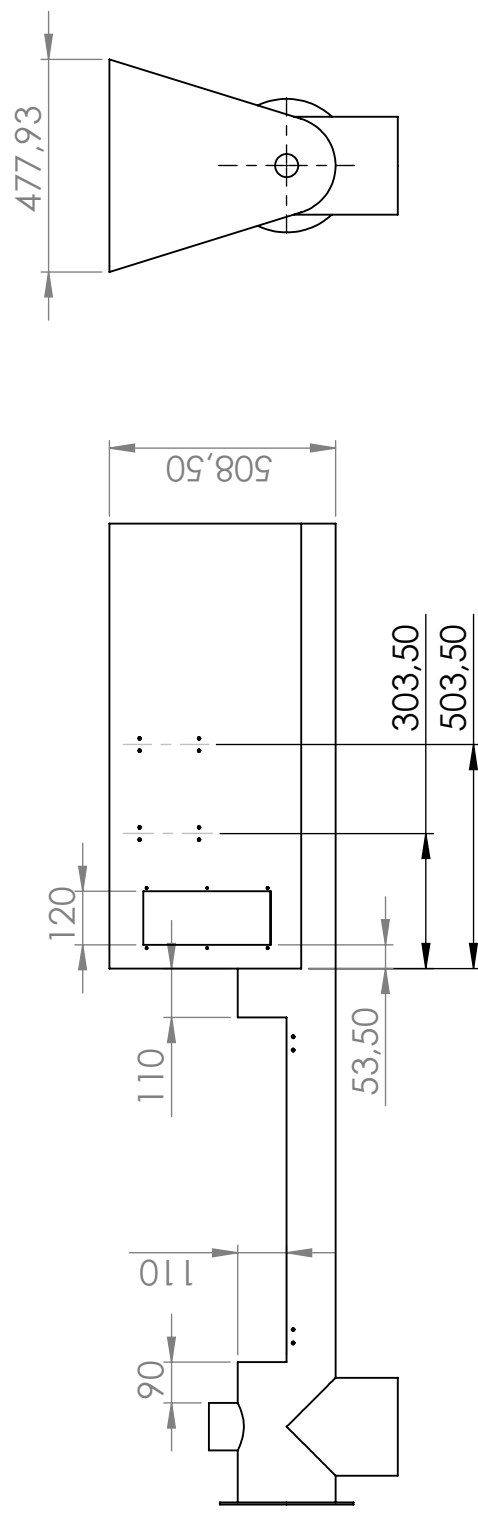
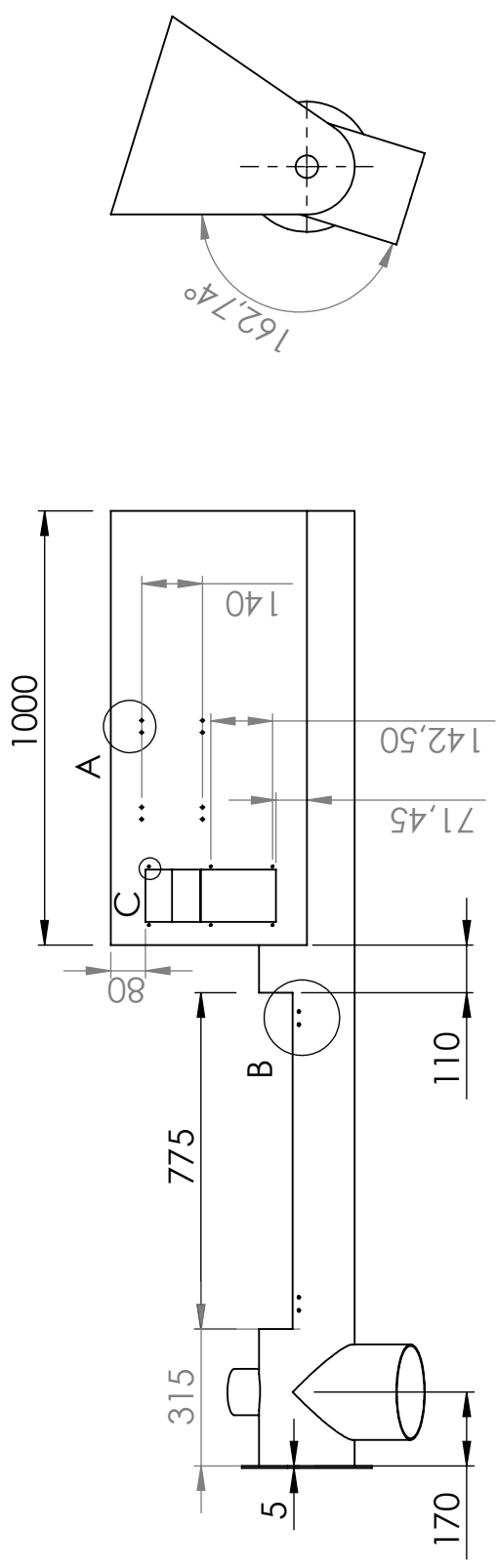
B



DETALHE C  
ESCALA 5:17

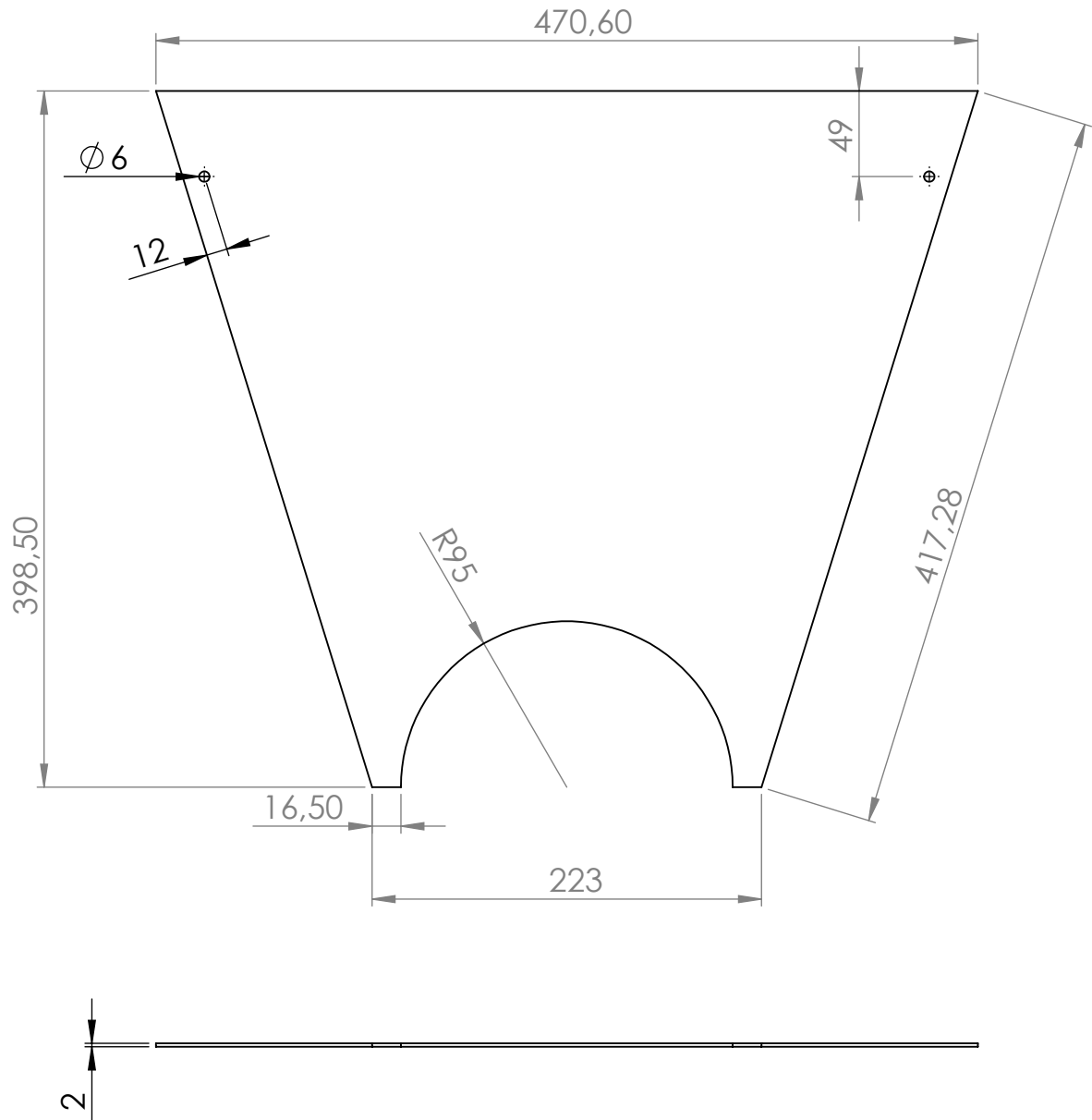
A

6 5 4 3 2 1

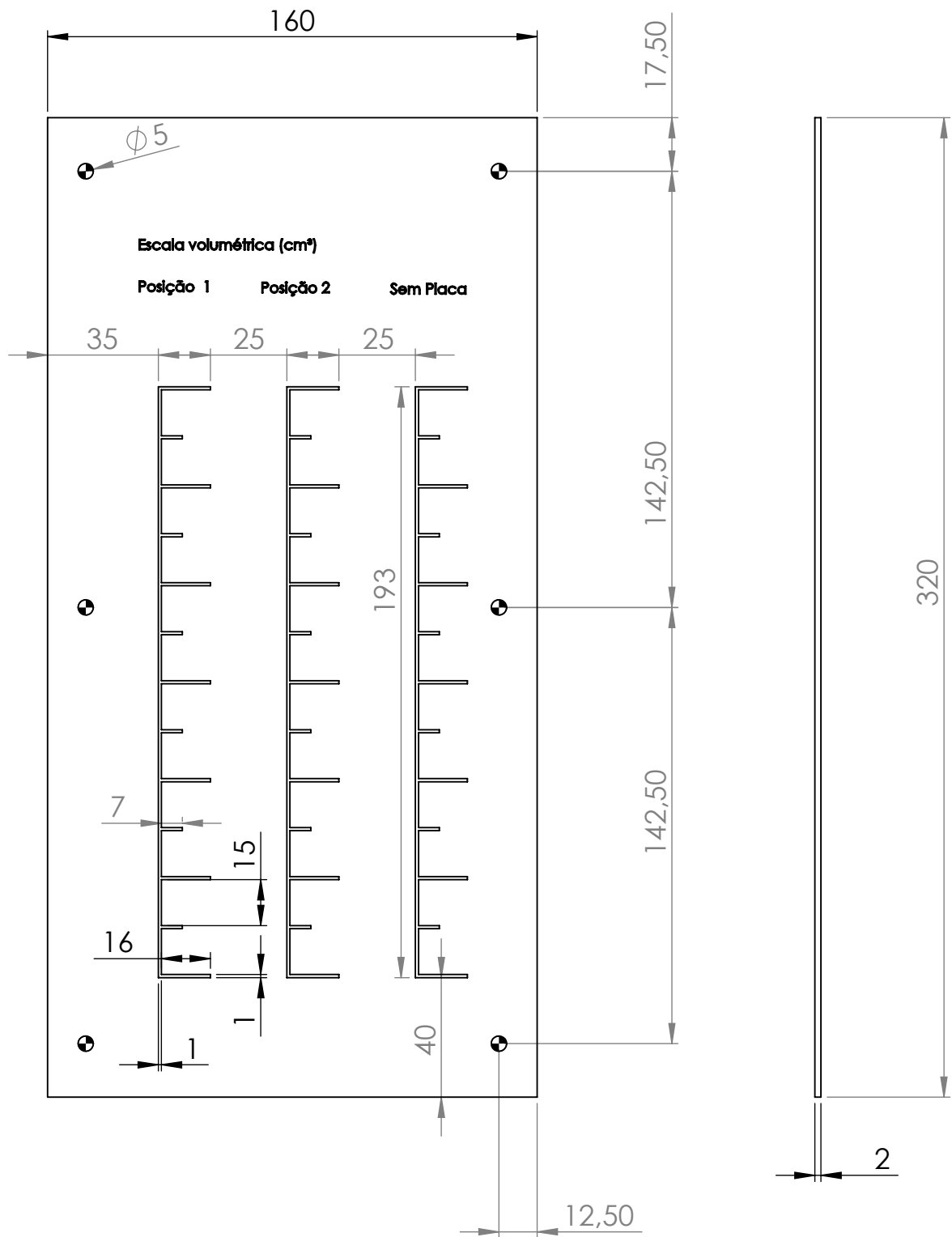


UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica	
	Projeto de Graduação	Data: 11/05/2021
	Sistema de alimentação	Dimensão: mm
Nome da Peça: Silo de armazenamento		Escala 1:17
Diedro: 1°	Material: Aço AISI 1010 laminado a frio	Revisão:
Tolerância onde não especificado: 0,1mm		Folha: 2/10

6 5 4 3 2 1



<b>UnB</b>	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica	
	Projeto de Graduação	Data: 11/05/2021
	Sistema de alimentação	Dimensão: mm
	Nome da Peça: Placa de contenção	Escala 1 :4
Diedro: 1°	Material: Aço AISI 1010 laminado a frio	Revisão:
Tolerância onde não especificado: 0,1mm		Folha: 3/10



<b>UnB</b>	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica	
	Projeto de Graduação	Data: 11/05/2021
	Sistema de alimentação	Dimensão: mm
	Nome da Peça: Visor volumétrico	Escala 1:2
Diedro: 1°	Material: Acrílico transparente	Revisão:
Tolerância onde não especificado: 0,1mm		Folha: 4/10

6 5 4 3 2 1

D

D

C

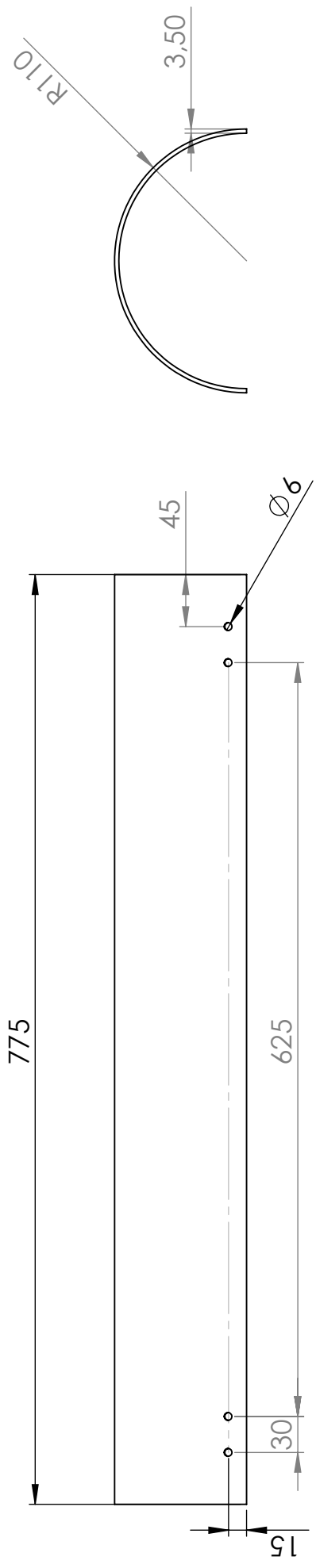
C

B

B

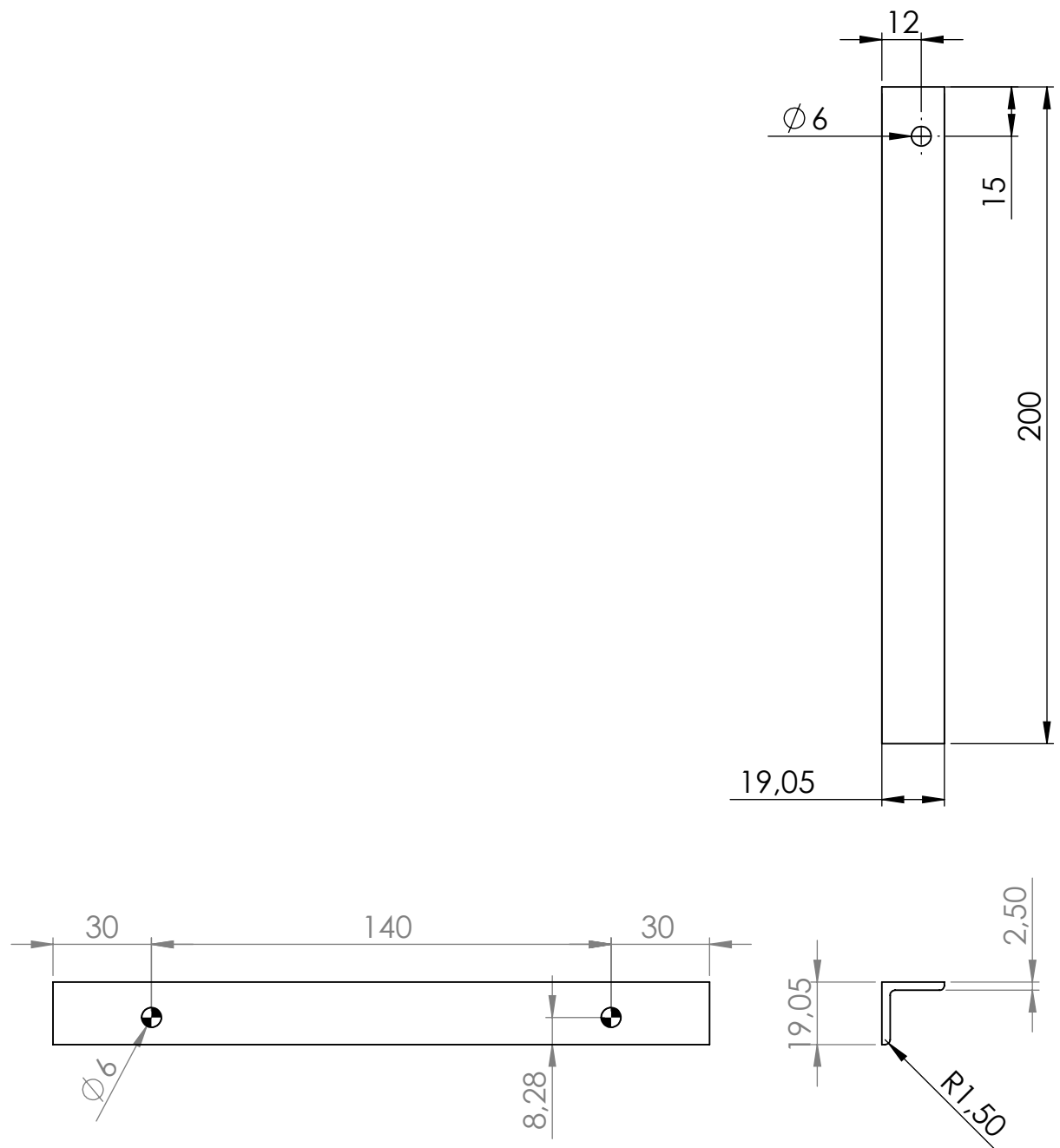
A

A



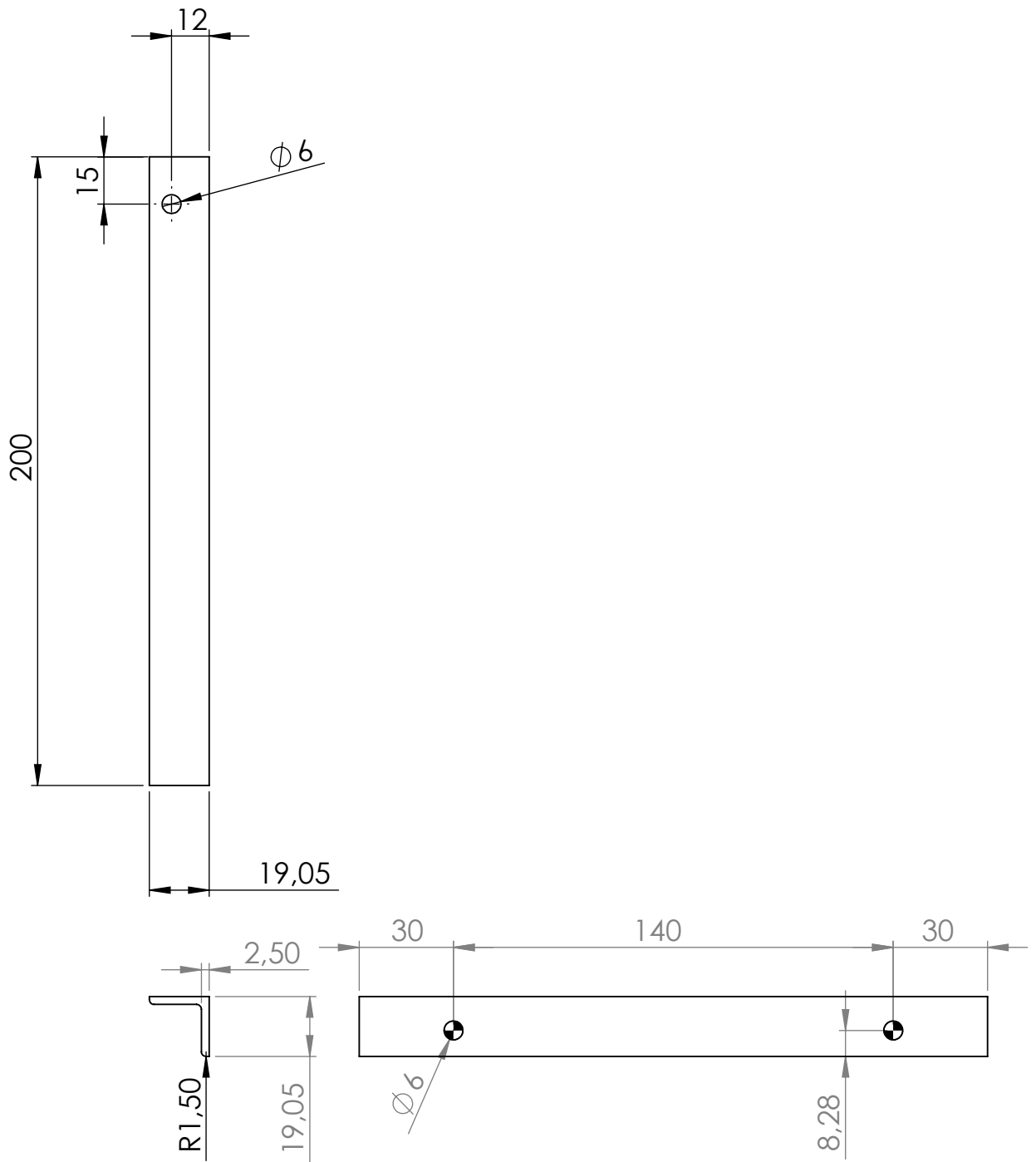
UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica	
	Projeto de Graduação	Data: 11/05/2021
	Sistema de alimentação	Dimensão: mm
Nome da Peça: Tapa da calha		Escala 1:5
Diedro: 1°	Material: Aço AISI 1010 laminado a frio	Revisão:
Tolerância onde não especificado: 0,1mm		Folha: 5/10

6 5 4 3 2 1



UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica	
	Projeto de Graduação	Data: 11/05/2021
	Sistema de alimentação	Dimensão: mm
	Nome da Peça: Cantoneira guia direita	Escala 1:2
Diedro: 1°	Material: Aço AISI 1010 laminado a frio	Revisão:
Tolerância onde não especificado: 0,1mm		Folha: 6/10

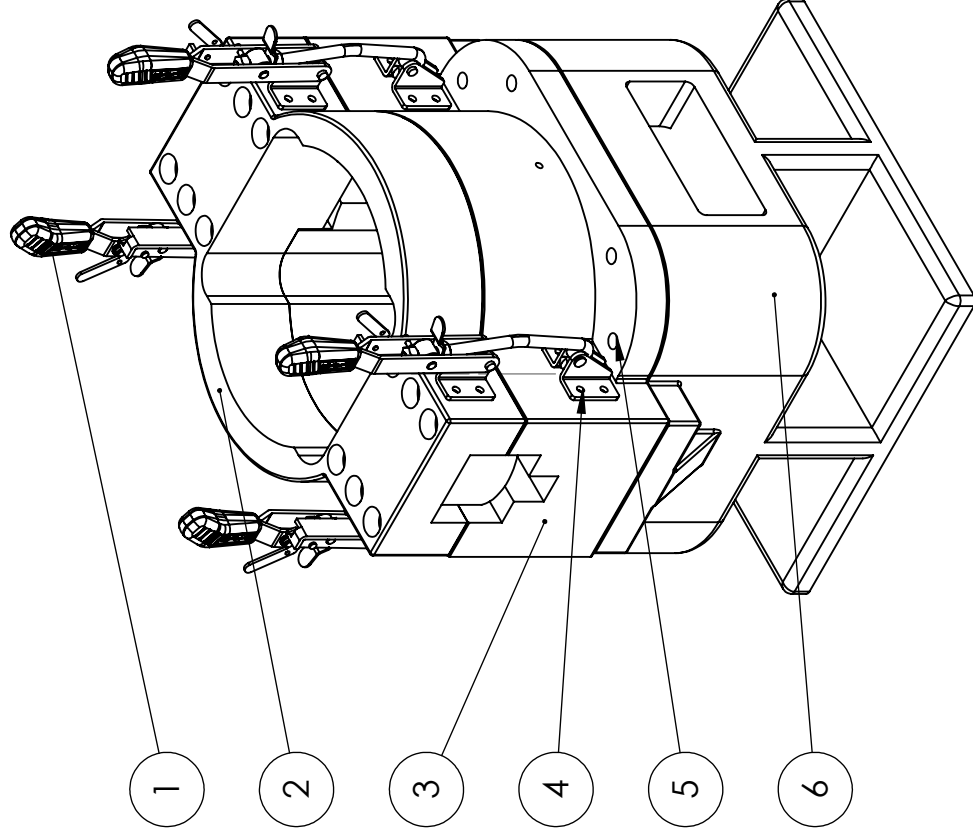




<b>UnB</b>	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica	
	Projeto de Graduação	Data: 11/05/2021
	Sistema de Alimentação	Dimensão: mm
	Nome da Peça: Cantoneira guia esquerda	Escala 1:2
Diedro: 1°	Material: Aço AISI 1010 laminado a frio	Revisão:
Tolerância onde não especificado: 0,1mm		Folha: 7/10

6 5 4 3 2 1

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO DA PEÇA	QTD.
1	Grampo tensor KF-153DTR KIFIX	4
2	Carcaça superior	1
3	Carcaça central	1
4	Parafuso M6x1,00 - cilíndrico sextavado interno	32
5	Parafuso M12x1,75 - cilíndrico sextavado interno	8
6	Carcaça inferior	1



D

C

B

A

UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica	
	Projeto de Graduação	Data: 11/05/2021
Sistema de peletização		Dimensão: mm
Nome da Peça: Desenho de conjunto		Escala 1:5
Diedro: 1º	Material:	Revisão:
Tolerância onde não especificado:		Folha: 8/10

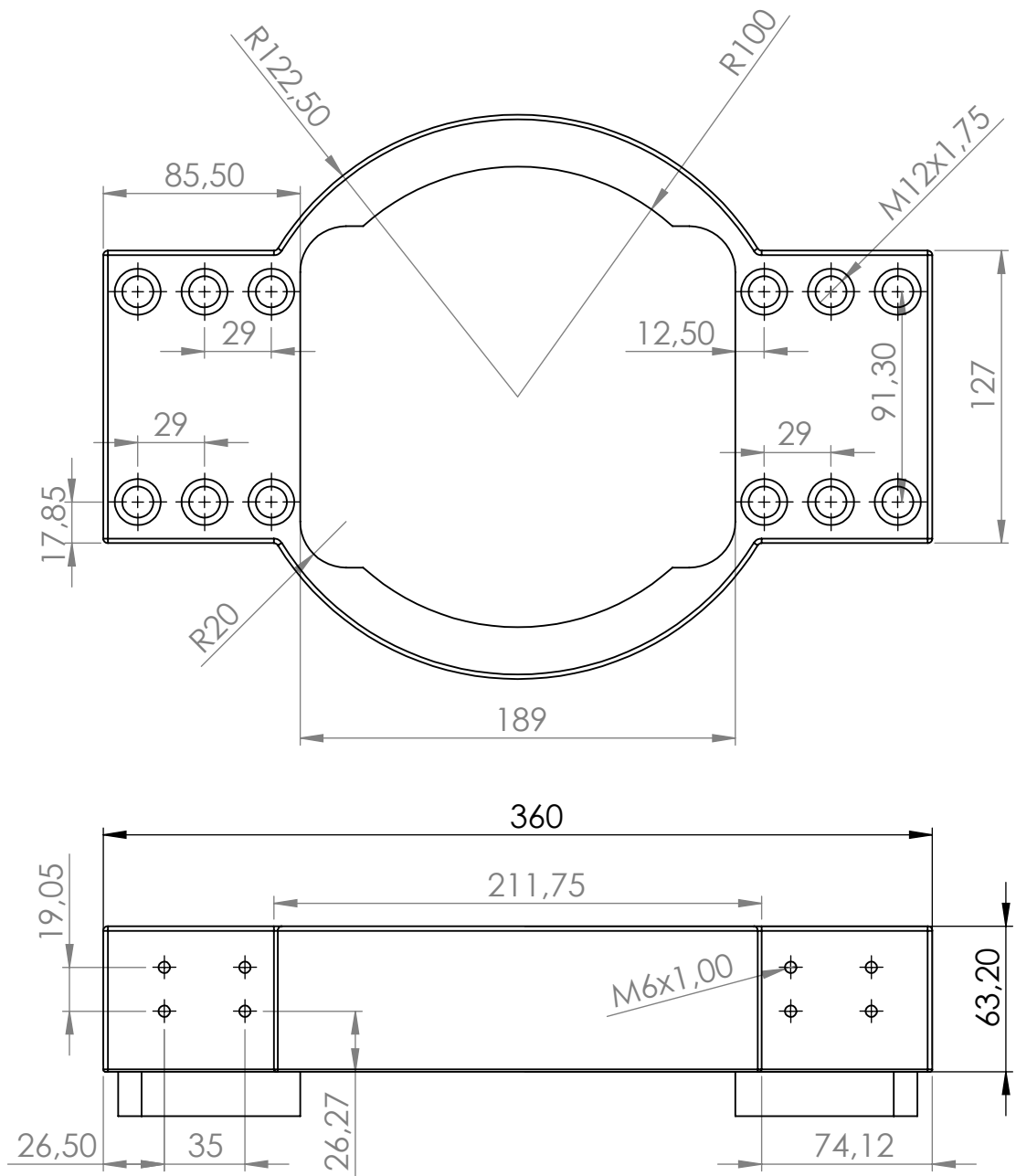
6 5 4 3 2 1

D

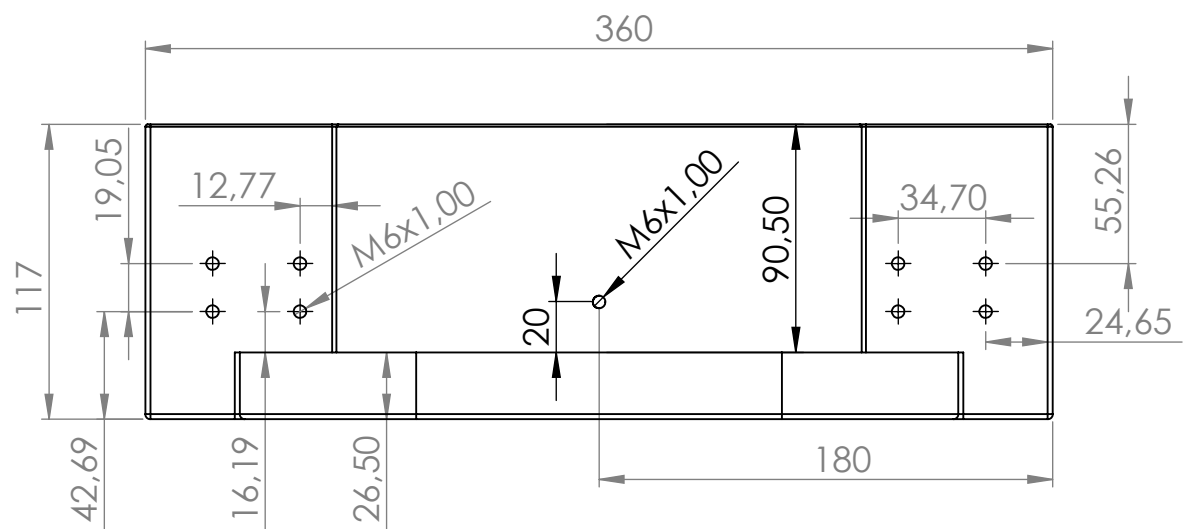
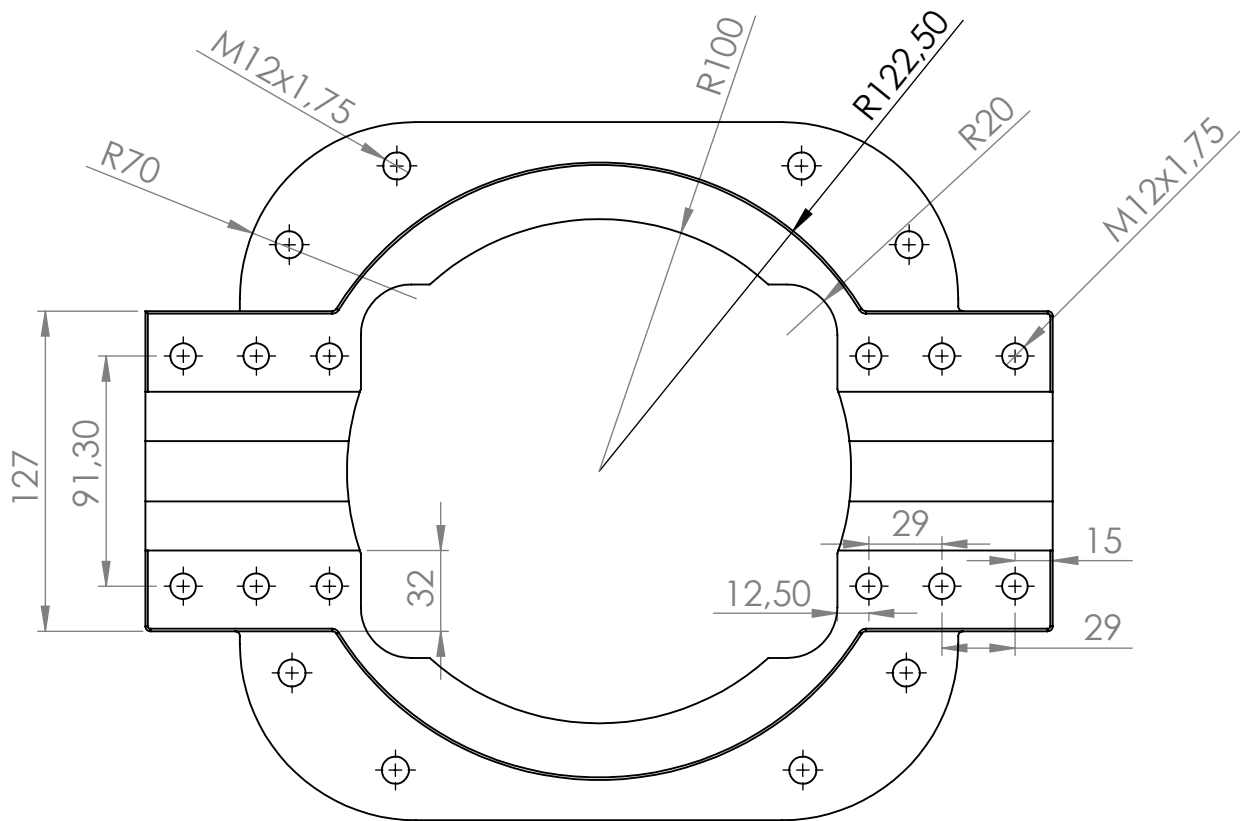
C

B

A



UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica	
	Projeto de Graduação	Data: 11/05/2021
	Sistema de peletização	Dimensão: mm
	Nome da Peça: Carcaça Superior	Escala 1:3
Diedro: 1°	Material: Aço AISI 1010 laminado a frio	Revisão:
Tolerância onde não especificado: 0,1mm		Folha: 9/10



UnB	Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica	
	Projeto de Graduação	Data: 11/05/2021
	Sistema de peletização	Dimensão: mm
	Nome da Peça: Carcaça central	Escala 1:3
Diedro: 1°	Material: Aço AISI 1010 laminado a frio	Revisão:
Tolerância onde não especificado: 0,1mm		Folha: 10/10