

GUILHERME HENRIQUE DA COSTA

**PROJETO DE UM TRITURADOR DE POLÍMEROS PARA A UTFPR
CÂMPUS GUARAPUAVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Aldo Przybysz

Coorientador: Lucas Franco Wrege

GUARAPUAVA
2023

GUILHERME HENRIQUE DA COSTA

**PROJETO DE UM TRITURADOR DE POLÍMEROS PARA A UTFPR
CÂMPUS GUARAPUAVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Aldo Przybysz

Coorientador: Lucas Franco Wrege

Guarapuava
2023



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GUILHERME HENRIQUE DA COSTA

**PROJETO DE UM TRITURADOR DE POLÍMEROS PARA A UTFPR
GUARAPUAVA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 21/ junho/2023

Aldo Przybysz
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcos Gonçalves Júnior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Henrique Ajuz Holzmann
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Guarapuava
2023**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro aos meus pais Valdeci e Carmen e minha irmã Mirela pelo constante apoio durante toda minha graduação, sem eles nada dessa trajetória seria possível. Também, aos mestres pela orientação durante o desenvolvimento e aos amigos e colegas pela contribuição em minha jornada.

A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.. (Nikola Tesla, 1856-1943).

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto, o detalhamento de peças e a simulação numérica das facas de um triturador de plásticos de bancada. A crescente demanda por soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos plásticos motivou a concepção deste dispositivo, que visa a redução do volume dos plásticos descartados, bem como a redução de custos de operação do laboratório de impressão 3D do campus UTFPR Guarapuava por meio de um processo eficiente e acessível. A pesquisa abrangeu diversas etapas. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os métodos de trituração de plásticos existentes, buscando identificar as melhores práticas e os principais desafios enfrentados nessa área. Com base nessas informações, foi desenvolvido um projeto conceitual para o triturador de plásticos de bancada. Em seguida, foram elaborados os desenhos técnicos e o detalhamento das peças que compõem o triturador. Cada componente foi cuidadosamente projetado levando em consideração fatores como resistência mecânica, durabilidade e facilidade de fabricação. Utilizou-se software de modelagem 3D para visualizar as peças e gerar os arquivos necessários para a fabricação. Além disso, foi realizada uma simulação numérica das facas do triturador, utilizando software de análise estrutural foram aplicadas cargas e condições de contorno representativas do processo de trituração de plásticos. Os resultados obtidos permitiram avaliar a resistência das facas e identificar possíveis áreas de melhoria. A listagem de peças necessárias para a construção do triturador de plásticos de bancada foi elaborada, considerando materiais disponíveis no mercado e custos viáveis. Conclui-se que o desenvolvimento de um triturador de plásticos de bancada é viável e oferece uma solução prática e acessível para o processamento de resíduos plásticos. O projeto detalhado das peças e a simulação numérica das facas fornecem embasamento técnico para a construção e otimização do dispositivo. Espera-se que esse trabalho possa contribuir para a disseminação de tecnologias sustentáveis de tratamento de plásticos, bem como facilitar o processo de construção do triturador para que efetivamente seja utilizado no campus.

Palavras-chave: impressão 3d. triturador. reciclagem

ABSTRACT

This work aims to present the design, detailed parts specification, and numerical simulation of the blades for a benchtop plastic shredder. The increasing demand for sustainable solutions in plastic waste treatment has led to the conception of this device, which aims to reduce the volume of discarded plastics and lower operation costs for the 3D printing laboratory at UTFPR Guarapuava campus through an efficient and accessible process. The research encompassed several stages. Initially, a literature review was conducted on existing plastic shredding methods, aiming to identify best practices and the main challenges in this field. Based on this information, a conceptual design for the benchtop plastic shredder was developed. Subsequently, technical drawings and detailed specifications of the parts comprising the shredder were elaborated. Each component was carefully designed, considering factors such as mechanical strength, durability, and ease of fabrication. 3D modeling software was utilized to visualize the parts and generate the necessary files for fabrication. Moreover, a numerical simulation of the shredder blades was performed using structural analysis software. Representative loads and boundary conditions for the plastic shredding process were applied. The obtained results allowed for the assessment of blade strength and identification of potential areas for improvement. A parts list required for the construction of the benchtop plastic shredder was compiled, considering available materials in the market and feasible costs. Suppliers for each component were identified, facilitating the material acquisition process. In conclusion, the development of a benchtop plastic shredder is viable and offers a practical and accessible solution for plastic waste processing. The detailed design of the parts and numerical simulation of the blades provide technical foundations for the construction and optimization of the device. It is expected that this work can contribute to the dissemination of sustainable plastic treatment technologies and facilitate the construction process of the shredder for effective utilization on the campus.

Keywords: 3d printing. shredder. recycling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo de Reciclagem	14
Figura 2 – Estrutura química de termoplásticos (A) e termofixos (B)	17
Figura 3 – Desenho esquemático - Triturador de Plásticos	20
Figura 4 – Unidade de trituração	21
Figura 5 – Triturador de 2 Eixos	21
Figura 6 – Triturador de 4 Eixos	22
Figura 7 – Modelo de triturador de bancada	23
Figura 8 – Projeto 3D	27
Figura 9 – Vista Isométrica 3D	27
Figura 10 – Vista Isométrica 3D	28
Figura 11 – Lâmina de Corte	29
Figura 12 – Transmissão de potência	29
Figura 13 – Motor Nema 34	30
Figura 14 – Redutor Nema 34	31
Figura 15 – Acomplamento Flexível	32
Figura 16 – Mancal SKF UCF 204	33
Figura 17 – Eixo	33
Figura 18 – Detalhamento Eixo	34
Figura 19 – Lâmina de Corte	35
Figura 20 – Tensão de Von Misses	36
Figura 21 – Projeto 3D	37
Figura 22 – Detalhamento Triturador de Polímeros	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações Motor Nema 34	30
Tabela 2 – Mancais SKF	33
Tabela 3 – Especificações Aço INOX AISI 304	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FDM	Fusion Deposited Modeling
<i>F</i>	Abreviatura Força
CNC	Comando Numérico Computadorizado
PLA	Biopolímero Ácido Poliláctico
PETG	Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
°C	Graus Celsius

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ	Sigma
Δ	Delta
ϵ	Epsilon
τ	Tau
ε	Deformação de Engenharia

SUMÁRIO

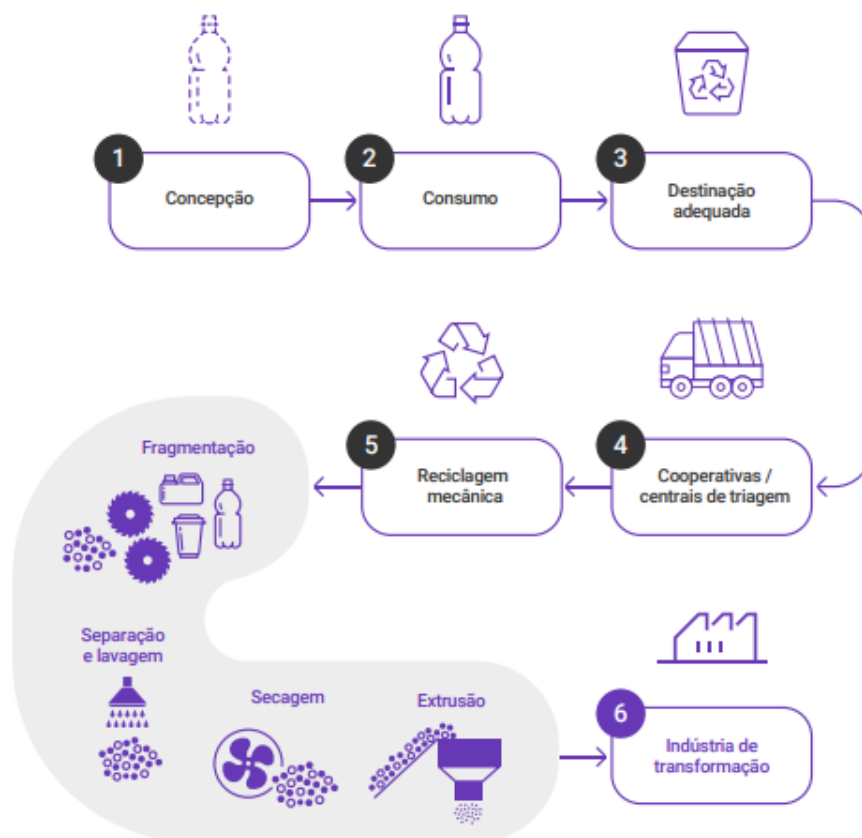
1 – INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 OBJETIVOS GERAIS	15
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Definição de Polímeros	16
2.2 Polímeros Termoplásticos	16
2.3 Polímeros Termofixos	16
2.4 Reciclagem Termoplástica	17
2.5 Reciclagem Mecânica	18
2.5.1 Equipamentos de Trituração	18
2.5.2 Tamanho dos Flakes	18
2.6 Resistência a Tração	19
2.7 Tensão de Von Misses	19
2.8 Fundamentos de projeto de Engenharia	19
2.8.1 Resistência ao Cisalhamento	20
2.9 Trituração	20
2.9.1 Triturador de Plástico (<i>Shredder</i>)	20
2.10 Impressão 3D	22
3 – DESENVOLVIMENTO	23
3.1 Tipo de Triturador	23
3.2 Projeto Base	23
3.2.1 Motor Elétrico	24
3.2.2 Caixa Redutora	24
3.2.3 Lâminas de Trituração	24
4 – PROJETO CONCEITUAL	26
4.1 Escopo do projeto	26
4.2 Concepção	26
4.3 Lâminas	28
4.4 Força Motriz requerida no Sistema	29
4.4.1 Motor	30
4.4.2 Redutor Orbital	31

4.4.3	Acoplamento	32
4.4.4	Mancal	33
4.4.5	Eixo	33
4.4.6	Torque	34
4.5	Lâminas	34
4.5.1	Força de Corte	35
4.5.2	Simulação Numérica	36
4.6	ESPECIFICAÇÕES FINAIS	37
5	– CONCLUSÃO	39
6	– SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	40
	Referências	41
	Apêndices	43
	APÊNDICE A – DESENHOS	45
A.1	Vista Explodida	45
A.2	Eixo Hexagonal	46
A.3	Espaçador	47
A.4	Lâmina de Corte	48
A.5	Peneira	49
A.6	Placa Lateral	50
A.7	Placa Dianteira e Traseira	51

1 INTRODUÇÃO

O avanço da manufatura aditiva marca uma nova era da indústria, a tecnologia atual de impressão 3D permitiu um uso sem precedentes desse método de fabricação (SIMPSON; WILLIAMS; HRIPKO, 2017). Segundo Ford e Minshall (2019) nas universidades o uso da impressão 3D tem papel relevante no que se refere a criação sistemas de impressão, modelos científicos e protótipos de teste. O artifício do protótipo impresso em polímero 3D tem sido amplamente utilizado por cursos de Engenharia Mecânica, na UTFPR Câmpus Guarapuava o projeto de extensão *4Print* tem dedicação exclusiva ao tema e fomenta as necessidades do Câmpus relacionadas a impressão 3D. O processo aditivo requer o uso de filamentos plásticos, também, a impressão gera resíduos que levantam questões relacionadas ao descarte dos polímeros. Dados da Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2020) mostram que o Brasil foi responsável pela produção de 8,2 milhões de toneladas de polímeros termoplásticos em 2019, já o indicador de reciclagem de resíduos plásticos apontou um índice de 24% em 2019.

Figura 1 – Fluxo de Reciclagem



Fonte: ABIPLAST (2020)

A reciclagem mecânica se baseia no uso dos resíduos industriais e plásticos pós

consumo para produzir novos produtos. A primeira etapa nesse processo se dá pela fragmentação dos resíduos o qual requer um triturador especificamente projetado para a fragmentação dos resíduos, após a fragmentação o resíduo segue para injeção ou extrusão. (MANO; PACHECO; BONELLI, 2010)

1.1 JUSTIFICATIVA

Levando em consideração os custos relacionados a compra de filamentos de impressão 3D e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos de impressão bem como utilização de polímeros recicláveis, surge a oportunidade do desenvolvimento do projeto de um triturador de polímeros termoplásticos destinado ao laboratório de impressão 3D do Câmpus da UTFPR Guarapuava.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

Projetar um triturador de polímeros de bancada para a UTFPR Campus Guarapuava.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar conceitualmente e detalhar o triturador de polímeros
- Levantar e listar peças e componentes
- Simular numericamente a lâmina de trituração.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definição de Polímeros

Os polímeros são macromoléculas formadas por cadeias de monômeros, grande parte dos polímeros é de origem orgânica, portanto são formados por longas cadeias de ligações repetidas entre moléculas de carbono e hidrogênio. Em relação aos polímeros sintéticos, estes são utilizados de forma geral na engenharia, se caracterizam quimicamente pela estrutura molecular de longas cadeias formadas por unidades repetidas ligadas entre si. O advento dos polímeros sintéticos ganha força com a Segunda Guerra Mundial onde os avanços da tecnologia possibilitaram a determinação das estruturas moleculares desse grupo de materiais e o desenvolvimento de inúmeros polímeros que são sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas. (JR; RETHWISCH, 2020).

A fonte de matéria prima dos materiais a serem processados em polímeros se dividem em três categorias: Produtos naturais como a celulose ou a borracha natural, hulha ou carvão mineral se submetido a um processo de destilação seca para produção de gases com intuito de extrair substâncias e o petróleo que representa a maior fonte de matéria prima (JR, 2002).

A classificação desse tipo de material é feita de acordo com seu comportamento em relação a elevação de temperatura. Duas grandes subdivisões são feitas sendo elas os polímeros termoplásticos (ou termoplásticos) e polímeros termorrígidos (ou termorrígidos) (JR; RETHWISCH, 2020).

2.2 Polímeros Termoplásticos

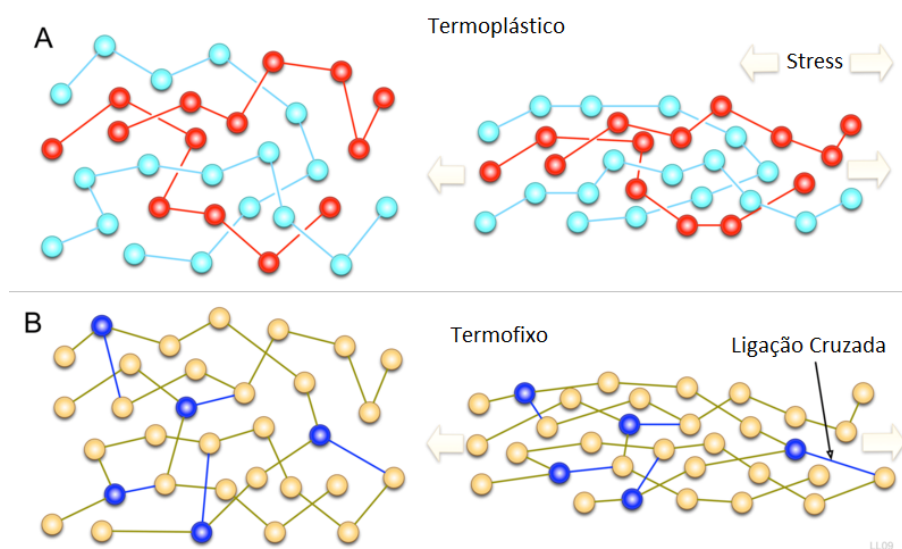
Os polímeros termoplásticos se caracterizam pela capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão, quando ocorre o resfriamento esses materiais endurecem. Em relação a escala molecular, conforme a temperatura é elevada ocorre um aumento no movimento das moléculas e as forças de ligação secundária diminuem, nos termoplásticos as cadeias não estão conectadas por forças primárias fortes, apenas por ligações secundárias (Forças de Van der Waals) A degradação do material é irreversível quando a temperatura de um termoplástico fundido é aumentada em excesso. São exemplos de polímeros termoplásticos o polietileno, poliestireno, poli(tereftalato de etileno) e o poli(cloreto de vinila). (JR; RETHWISCH, 2020).

2.3 Polímeros Termofixos

Termofixos são plásticos que amolecem uma vez com o aquecimento, estes possuem ligações químicas primárias entre as cadeias, chamadas de ligações cruzadas . As ligações

cruzadas são formadas por processo químico irreversível chamado de cura ou reticulação, esses materiais não mais alteram seu estado físico impossibilitando o amolecimento e se tornando infusíveis e insolúveis. São exemplos de termofixos borrachas vulcanizadas, os epóxis, as resinas fenólicas e algumas resinas poliéster (JR, 2002).

Figura 2 – Estrutura química de termoplásticos (A) e termofixos (B)



Fonte: Jr e Rethwisch (2020)

2.4 Reciclagem Termoplástica

A reciclagem termoplástica é um processo fundamental na gestão de resíduos plásticos, oferecendo uma solução sustentável para reduzir a dependência de recursos naturais e minimizar o impacto ambiental. Esse método de reciclagem é aplicado a polímeros termoplásticos, que possuem a capacidade de serem fundidos e moldados repetidamente sem perder suas propriedades. (SPINACÉ; PAOLI, 2005)

O processo envolve uma série de etapas, como a coleta e triagem dos resíduos plásticos, a trituração dos materiais em flakes, a fusão e moldagem do plástico derretido, e a produção de novos produtos. Esse processo permite a reutilização dos polímeros termoplásticos, reduzindo a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários e diminuindo a demanda por matéria-prima virgem. (SPINACÉ; PAOLI, 2005)

Além dos benefícios ambientais, a reciclagem termoplástica também oferece vantagens econômicas, como a redução de custos na produção de materiais reciclados em comparação com a fabricação de plásticos virgens. Além disso, o mercado de produtos reciclados tem apresentado um crescimento significativo, abrindo oportunidades para negócios e investimentos na área da reciclagem termoplástica. No entanto, é importante promover a conscientização sobre a importância da reciclagem e estabelecer políticas e

infraestruturas adequadas para melhorar ainda mais a eficiência e a adoção desse processo. (SPINACÉ; PAOLI, 2005)

2.5 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica tem por base o uso dos resíduos plásticos pós consumos com intuito de fabricar novos produtos. O processo consiste na redução do volume das peças originais em granulados ou lascas para que seja utilizado em processos de injeção ou extrusão de polímeros. Dentre as etapas do processo primeiro ocorre a triagem onde é feita a separação dos tipos de plásticos. Na etapa de trituração os resíduos são reduzidos ao tamanho desejado. Na etapa de lavagem os resíduos são imersos em água ou soluções específicas com intuito de separar o material por densidade e também a retirada dos agentes contaminantes que inviabilizariam a qualidade após a extrusão. (MANO; PACHECO; BONELLI, 2010) A etapa de trituração é um dos processos fundamentais na reciclagem mecânica de polímeros termoplásticos. Essa etapa envolve a redução dos resíduos plásticos em pequenos pedaços, conhecidos como flakes. A trituração tem como objetivo facilitar o manuseio e o processamento posterior dos materiais, além de aumentar a eficiência do processo de reciclagem. A seguir, serão abordados alguns pontos importantes sobre a trituração na reciclagem de polímeros termoplásticos.

2.5.1 Equipamentos de Trituração

Existem diferentes tipos de equipamentos utilizados na trituração de polímeros termoplásticos, sendo os mais comuns os moinhos de facas e os moinhos de rotor. Os moinhos de facas são compostos por um conjunto de facas rotativas que cortam os materiais em pequenos pedaços, enquanto os moinhos de rotor utilizam um rotor giratório para desfiar e triturar os resíduos plásticos. A escolha do equipamento adequado depende de vários fatores, como o tipo de polímero a ser processado, a quantidade de resíduos plásticos a ser triturada e o tamanho desejado dos flakes. É importante selecionar um equipamento que ofereça eficiência de trituração e que seja capaz de lidar com a capacidade de produção requerida.

2.5.2 Tamanho dos Flakes

O tamanho dos flakes obtidos na etapa de trituração é um aspecto importante, pois pode afetar diretamente a qualidade dos materiais reciclados. Geralmente, os flakes são produzidos em diferentes tamanhos, variando de alguns milímetros a centímetros, dependendo da aplicação final dos polímeros reciclados. O tamanho dos flakes influencia propriedades como a reatividade química, a resistência mecânica e a fluidez dos materiais. Por exemplo, para aplicações que exigem alta resistência mecânica, é necessário obter

flakes menores, pois isso aumenta a área de contato entre as partículas, melhorando a ligação entre elas durante o processo de fusão.

2.6 Resistência a Tração

A resistência à tração indica a capacidade do material de suportar esforços axiais, portanto ela se trata de um indicador de resistência do material através da norma ASTM D638 é possível mensurar a resistência à tração de polímeros onde avalia-se a variação do comprimento de um corpo de prova em função da carga aplicada.

2.7 Tensão de Von Misses

A tensão de Von Mises se caracteriza pela medida de tensão em materiais submetidos a cargas complexas levando em conta as tensões de tração, compressão e cisalhamento. É amplamente utilizado em projetos de engenharia para prever possíveis falhas e avaliar a resistência dos materiais. A fórmula de cálculo é baseada nas tensões principais do objeto e fornece uma medida de tensão equivalente que pode ser comparada à resistência à tração do material. No entanto, é importante lembrar que o comportamento real do material pode ser influenciado por diversos fatores, como a qualidade do material, geometria do objeto e condições de carregamento. (NORTON, 2013)

2.8 Fundamentos de projeto de Engenharia

Por se tratar de um projeto de máquina, deve-se respeitar os critérios para máquinas com partes móveis, este projeto de máquina se trata basicamente de um conjunto de peças inter-relacionadas, sendo assim, deve-se aplicar conceitos fundamentais de engenharia como estática e dinâmica em análises de tensões e deformações (NORTON, 2013)

Para carregamentos estáticos, o comportamento mecânico pode ser caracterizado pelo ensaio de tração uniaxial. Existem três formas básicas de aplicação de uma carga: tração, compressão e cisalhamento. O resultado de um ensaio em geral é representado na forma de força em função do alongamento. As equações para cálculo das tensões e deformações estão representadas nas Equações 2, 3 e 4 respectivamente .

A Tensão de engenharia é definida por:

$$\sigma_o = \frac{F_0}{A_0} \quad (1)$$

Onde F_0 é força e A_0 é a área da seção transversal.

A Deformação de engenharia é definida por:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Onde Δl é a variação do comprimento e l_0 o comprimento inicial

2.8.1 Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento define onde as partes serão completamente separada por uma força cisalhante, a tensão de cisalhamento, ou tensão de corte, é um tipo de tensão gerado por forças aplicadas em sentidos iguais ou opostos, que irá causar o rompimento do material. A resistência pode ser mensurada pela Equação 1, que define parâmetros e métodos para avaliar a resistência ao cisalhamento de polímeros.

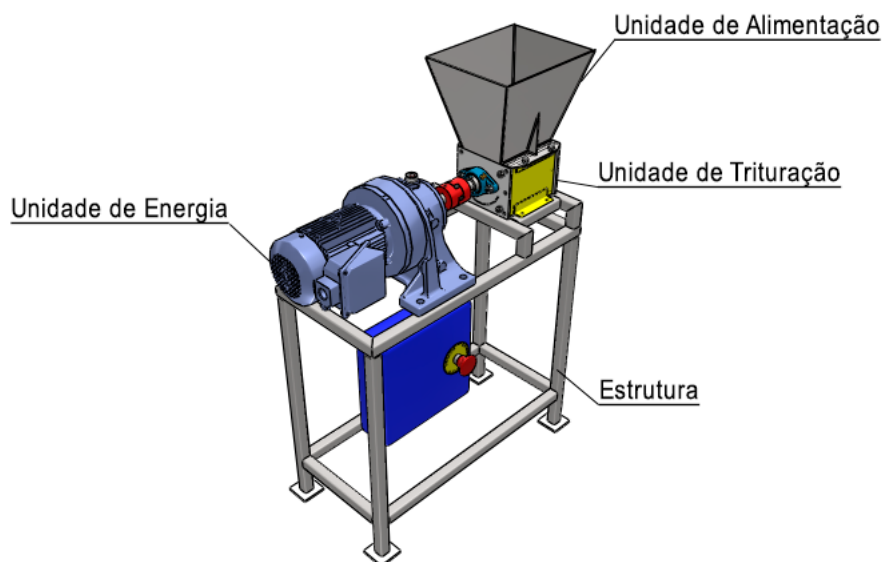
$$\tau = F_c/A_c \quad (3)$$

Sendo F_c a força de corte e A_c a área da borda cisalhante

2.9 Trituração

Para que ocorra a fragmentação mecânica do polímero, é necessária a etapa de trituração. Um triturador consiste basicamente em quatro partes principais: Uma unidade de trituração propriamente dita, unidade de energia, unidade de alimentação e estrutura. O processo de funcionamento se dá pela alimentação do triturador mecânico por um funil de alimentação, as facas de corte do triturador realizarão esforços de rasgo, quebra e cisalhamento que ocasionarão a fragmentação controlada do material. (AYO; OLUKUNLE; ADELABU, 2017)

Figura 3 – Desenho esquemático - Triturador de Plásticos



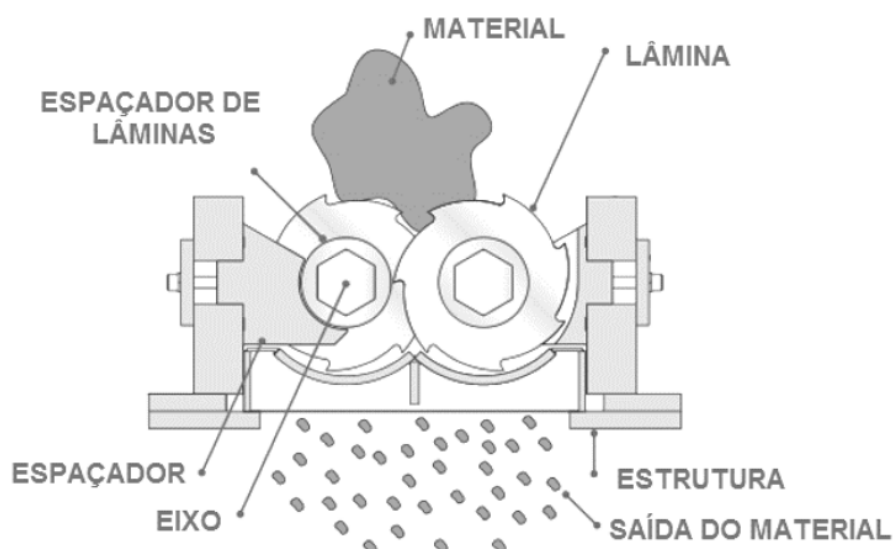
Fonte: Peraza (2021)

2.9.1 Triturador de Plástico (*Shredder*)

Após alimentação pelo bocal principal, o polímero Ao entrar em contato com as lâminas o é puxado entre os eixos. Os eixos giram no mesmo sentido, o que faz com

que o material seja forçado a passar pelo espaço entre as lâminas e os espaçadores, assim cisalhando o material. Após o corte o material passa pela peneira com objetivo de atingir a granulometria especificada

Figura 4 – Unidade de trituração



Fonte: [Jordan \(2022\)](#)

Falando da unidade de trituração especificamente, o fator que difere os tipos existentes é o número de eixos e o número de dentes utilizados. O número de eixos está diretamente relacionado a capacidade de carga exercida para que o material seja puxado para trituração. A grande maioria dos trituradores se apresenta com dois eixos, no entanto ao falar de escala industrial que exija uma maior robustez, trituradores de quatro eixos podem ser encontrados ([EKMAN, 2018](#)).

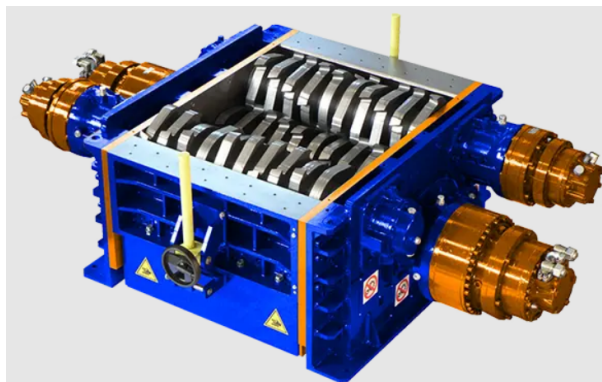
Figura 5 – Triturador de 2 Eixos



Fonte: [Satrindtech \(2022\)](#)

Quanto ao design das facas, um maior número de dentes implica em uma velocidade de corte maior, porém o risco de travamento da máquina e dos eixos se apresenta com

Figura 6 – Triturador de 4 Eixos



Fonte: [Satrindtech \(2022\)](#)

maior severidade. A espessura e o material utilizado nas facas está diretamente relacionado ao tipo de material que será triturado. Segundo [Chen, Gao e Xu \(2019\)](#) o aço inoxidável é uma boa opção como matéria prima para as facas devido à sua alta resistência à corrosão e à abrasão, o autor conclui baseado em uma análise de diferentes materiais para facas de trituração de plásticos, incluindo aço rápido, aço carbono, aço inoxidável, liga de tungstênio e liga de titânio.

2.10 Impressão 3D

A Impressão 3D ou fabricação aditiva é um processo de fabricação que tem por objetivo unir camadas finas de materiais, sólidos ou líquidos em seção transversal horizontal, com objetivo de criar um objeto tridimensional e físico a partir de um modelo digital. No processo de FDM é utilizado um filamento de material termoplástico que é puxado por um rolo de alimentação para uma câmara de liquefação que eleva a temperatura além da temperatura de amolecimento do plástico. A partir de um sistema de eixos CNC, é movimentada a mesa enquanto o material é depositado formando a geometria da peça em camadas horizontais. Dentro os polímeros mais comuns a serem utilizados nos processos de FDM podemos listar o PLA (poliácido láctico) que tem por característica ser biodegradável, o ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e PETG que é uma combinação do polímero PET com Glicol. O PETG e o ABS são materiais recicláveis, porém, não são biodegradáveis como o PLA. O ABS é solúvel em acetona e outros solventes enquanto o PETG é inerte a maioria dos solventes e produtos químicos, ainda tendo a vantagem de ser seguro para alimentos. Ao se imprimir utilizando ABS necessita-se um aquecimento da mesa de pelo menos 100°C. O PETG tem maior resistência a flexão e maior tenacidade em comparação ao ABS ([FILA, 2022](#))

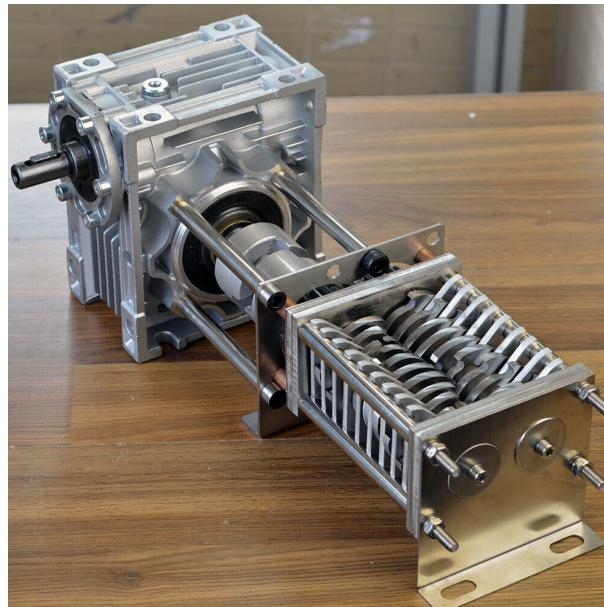
3 DESENVOLVIMENTO

Este trabalho tem por objetivo projetar um triturador de bancada para que seja utilizado no laboratório de impressão 3D da UTFPR Guarapuava, em virtude do custo envolvido para a construção de um protótipo, o foco ficou apenas na parte conceitual.

3.1 Tipo de Triturador

A ideia é que o triturador seja dimensionado de forma a caber na bancada do laboratório, o motivo da escolha do tamanho reduzido envolve principalmente os custos e a demanda de utilização do equipamento.

Figura 7 – Modelo de triturador de bancada



Fonte: ([DIYCHEN.XYZ, 2022](#))

3.2 Projeto Base

O triturador de bancada foi baseado no Projeto Precious Plastic, uma comunidade fundada em 2013 por Dave Hakkens que tem por objetivo solucionar problemas relacionados a poluição por desperdício de plástico. Falando sobre o projeto, o acionamento se dará por um motorreductor acoplado ao eixo do triturador, este possui laminas de corte (facas) que por sua vez se constituem de duas partes, a fixa e a móvel. Ao se rotacionar as lâminas o material plástico estará acometido por forças cisalhantes de rasgo e quebra gerando uma fragmentação onde por gravidade cairá somente os *flakes* de tamanho menor do que o da peneira. ([PLASTIC, 2022](#))

3.2.1 Motor Elétrico

Com base no projeto de referência [Plastic \(2022\)](#), motores na faixa dos 2 cv de potência irão atender as demandas do projeto. O motor Nema 34 é amplamente utilizado na indústria, ele abrange áreas como máquinas fresadoras CNC, sistemas de posicionamento de alta precisão, roteadores CNC e sistemas de controle de movimento. Além disso, é capaz de fornecer altos torques em baixas velocidades, tornando-o ideal para aplicações que exigem movimentos precisos e controlados. ([ATHANI, 1997](#))

3.2.2 Caixa Redutora

Caixas redutoras são utilizadas em máquinas como forma de transmitir torque e reduzir a velocidade do eixo de saída em relação ao eixo de entrada. De acordo com a teoria dos elementos de máquinas, as caixas redutoras são consideradas como elementos de transmissão de potência, que podem modificar a relação de velocidade, o torque e a direção de rotação. Além disso, elas ajudam a aumentar a eficiência do sistema, melhorando a relação de transmissão de torque e minimizando a perda de energia por atrito. ([NORTON, 2013](#))

3.2.3 Lâminas de Trituração

Constituída das lâminas móveis pode-se prever alguns modelos preliminares do tipo de material e design das facas. A maioria dos projetos segue uma linha de modelagem do design das facas semelhante ao apresentado no projeto [Plastic \(2022\)](#), esse estudo avaliou a resistência ao desgaste e à corrosão de lâminas de trituração de aço inoxidável em comparação com outros materiais, como aço carbono e ferro fundido. Os resultados mostraram que as lâminas de aço inoxidável apresentaram melhor desempenho em termos de resistência ao desgaste e à corrosão em condições de uso intensivo.

O formato da Lâmina tem influência direta no resultado do processo, o objetivo nesse tipo de equipamento é cisalhar o material, o chamado *Shredding*, diferente da quebra, o rasgo forma pedaços uniformes e de fina espessura que são requisitos para o uso posterior a trituração. Questões como performance do equipamento também são afetadas pois um dimensionamento inadequado pode levar a travamentos por matéria prima e redução da vida útil das lâminas. Num modelo de lâmina que apresenta menor volume de material e maior comprimento das pontas a tendência é que sejam formados pedaços de plástico de maior comprimento impossibilitando o uso pós processo para extrusão. O artigo [Wong et al. \(2022\)](#) apresenta uma investigação experimental do desgaste e desempenho de lâminas de trituração de PET com diferentes geometrias e orientações. Foram avaliadas quatro geometrias diferentes de lâminas, sendo que a lâmina com a geometria em forma de V apresentou o melhor desempenho em termos de redução de tamanho e menor desgaste. Os resultados também mostraram que a orientação da lâmina pode afetar significativamente

o desgaste e o desempenho da trituração, com a orientação da lâmina em 45 graus em relação ao eixo do tambor apresentando o menor desgaste e melhor desempenho.

4 PROJETO CONCEITUAL

4.1 Escopo do projeto

O projeto do Triturador de Bancada deve atender aos seguintes requisitos:

1. Tamanho compacto: O triturador de bancada deve ser projetado para caber em uma bancada ou mesa, sem ocupar muito espaço.
2. Fácil de usar: Deve ser fácil de operar e não exigir habilidades técnicas ou treinamento especializado para usar.
3. Segurança: O triturador deve ser equipado com medidas de segurança para evitar acidentes, como proteção contra sobrecarga e desligamento automático em caso de falha ou sobreaquecimento.
4. Eficiência de trituração: O triturador deve ser capaz de triturar o polímero de impressão 3D em pedaços pequenos o suficiente para facilitar o processo de reciclagem.
5. Facilidade de manutenção: O triturador deve ser projetado para permitir a fácil manutenção e limpeza, a fim de garantir sua durabilidade e eficiência.
6. Custo acessível: O triturador de bancada deve ser projetado com materiais e componentes acessíveis para reduzir o custo de fabricação e, portanto, torná-lo acessível para estudantes, pequenas empresas e entusiastas de impressão 3D.

4.2 Concepção

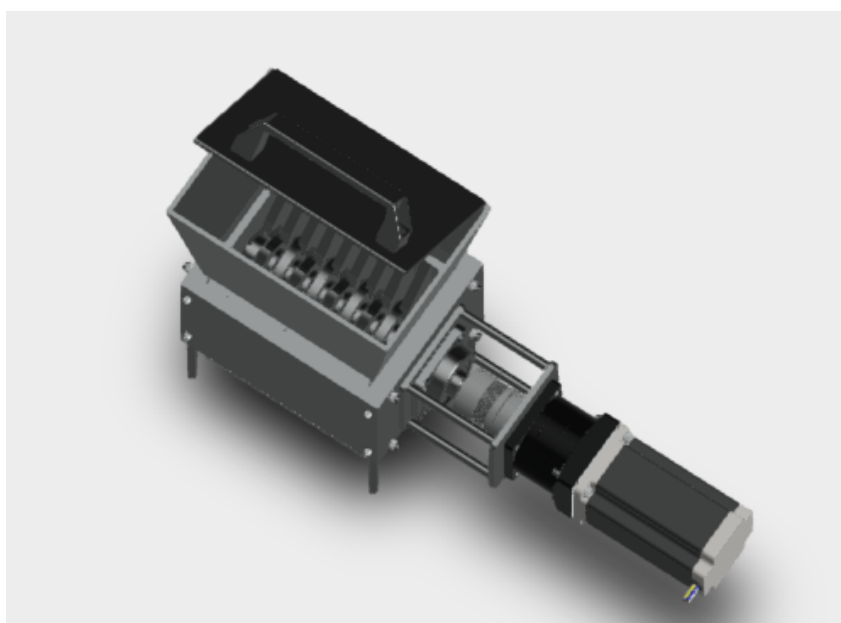
Através do Software Fusion 360, disponibilizado gratuitamente para alunos da UTFPR, foi desenvolvido o projeto 3D do equipamento sendo descrito detalhadamente nas próximas seções. A seguir uma prévia do detalhamento.

Figura 8 – Projeto 3D



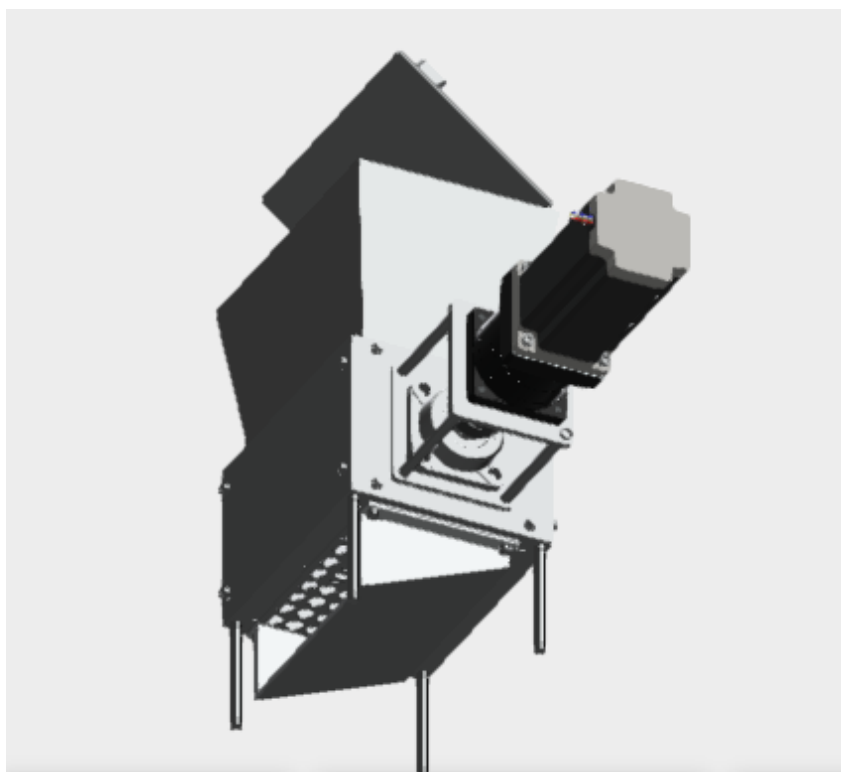
Fonte: Autor

Figura 9 – Vista Isométrica 3D



Fonte: Autor

Figura 10 – Vista Isométrica 3D



Fonte: Autor

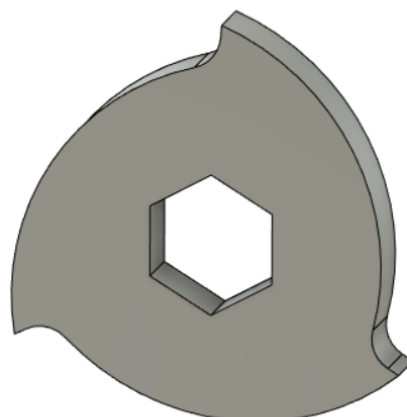
4.3 Lâminas

Como citado no Desenvolvimento em 3.2.3 o material escolhido será o aço inoxidável AISI 304 com suas respectivas constantes físicas:

Modulo de Young	210 GPa
Coefficiente de Poisson	0.3
Resistência a Escoamento	207 Mpa
Resistência Máxima a Tração	345 Mpa

A lâmina teve seu dimensionamento considerando o aumento do volume da peça com cantos mais suavizados, fatores que contribuem para o rasgo do material e evitam o travamento da matéria durante o processo. Desenho disponível no Apêndice [A](#)

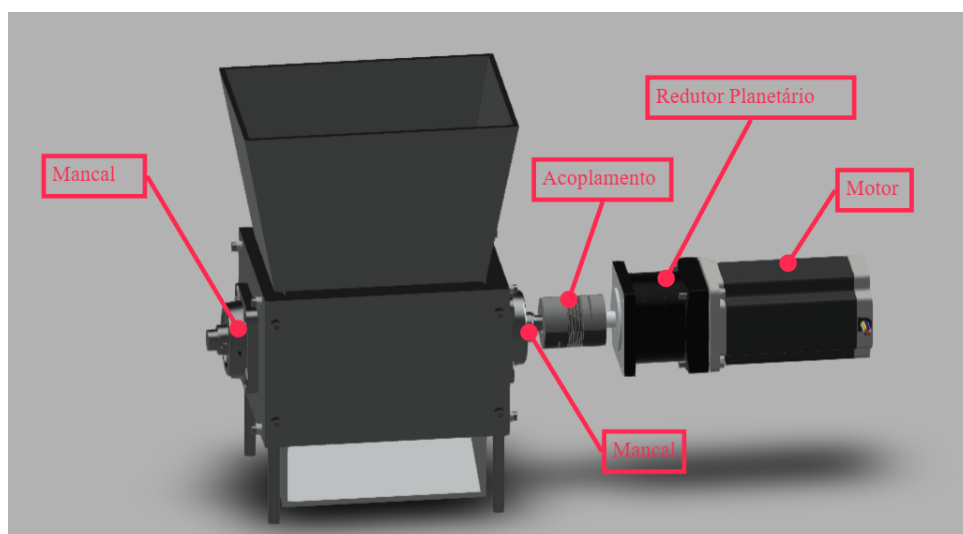
Figura 11 – Lâmina de Corte



Fonte: Autor

4.4 Força Motriz requerida no Sistema

Figura 12 – Transmissão de potência

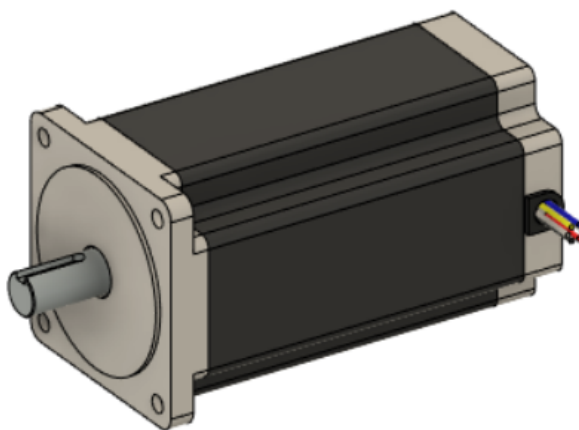


Fonte: Autor

A partir do projeto conceitual, o sistema de transmissão de potência no equipamento ficou composto pelo motor de acionamento, redutor orbital, acoplamento flexível do eixo e dois mancais para o eixo.

4.4.1 Motor

Figura 13 – Motor Nema 34



Fonte: Grabcad

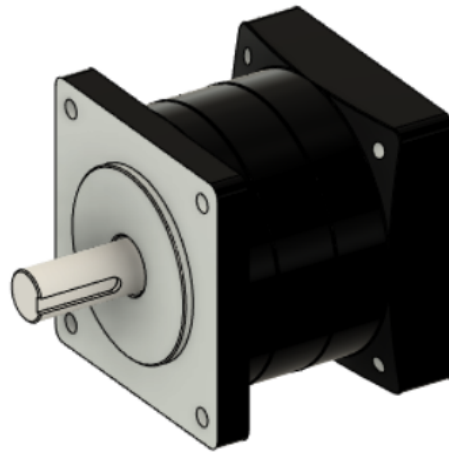
Justificado em 3.2.1 pela versatilidade do uso e alta relação de confiabilidade e custo benefício o motor escolhido será o Nema 34. As especificações técnicas do motor estão descritas na Tabela 1.

Motor Nema 34	
Dimensões	3,4 polegadas
Torque	3 a 6 N.m.
Velocidade	Até 3000 RPM
Corrente	3 a 5A
Potência	Máx de 1,5 kW

Tabela 1 – Especificações Motor Nema 34

4.4.2 Redutor Orbital

Figura 14 – Redutor Nema 34

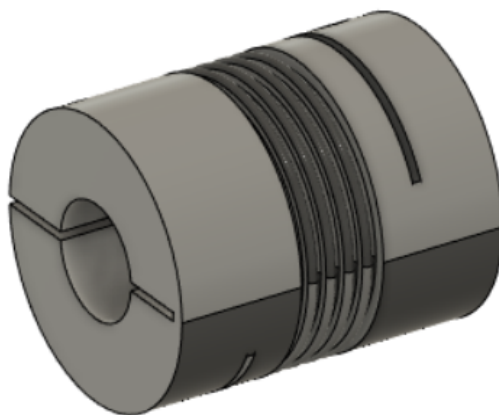


Fonte: Grabcad

- Relação de redução: 10:1
- Torque nominal: 50 N.m
- Torque Máximo: 80 N.m
- Rotação Máxima de entrada: 3000 RPM
- Coeficiente de eficiência: 0,9

4.4.3 Acoplamento

Figura 15 – Acoplamento Flexível

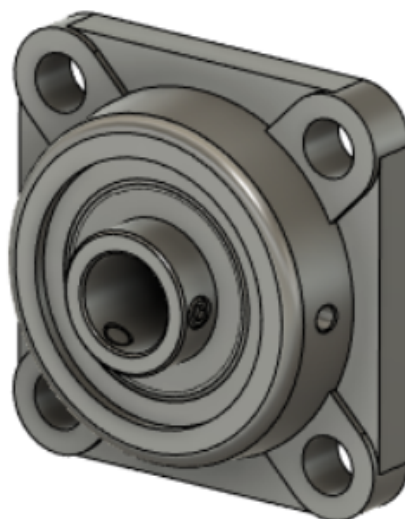


Fonte: Grabcad

O acoplamento flexível de eixo modelo Jaw é composto por dois cubos com dentes em forma de mandíbula que se encaixam em uma capa elástica. Cada cubo é fixado em uma extremidade do eixo e as mandíbulas são pressionadas contra a capa elástica por meio de parafusos que as prendem. Quando o eixo sofre uma carga ou vibração, a capa elástica absorve parte do movimento, evitando que seja transmitido para o outro eixo. Esse tipo de acoplamento é comumente usado em sistemas de transmissão de energia, como motores elétricos, bombas e redutores, por permitir uma conexão flexível e absorver desalinhamentos entre os eixos.

4.4.4 Mancal

Figura 16 – Mancal SKF UCF 204



Fonte: Autor / SKF

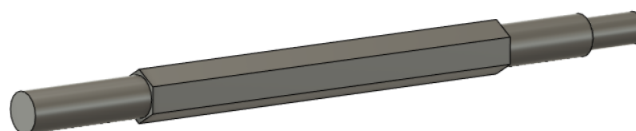
O modelo SKF UCF 204 é uma unidade de caixa de flange com um bloco de apoio feito de ferro fundido, possui um rolamento de esferas de contato angular projetado para suportar cargas radiais e axiais.

Mancal SKF UCF 204	
Diâmetro do Eixo	20mm
Tipo de caixa de mancal	Flangeado
Velocidade	Até 6500 RPM
Material, caixa de mancal	Ferro fundido
Massa da unidade de rolamento	0.53 kg

Tabela 2 – Mancal SKF

4.4.5 Eixo

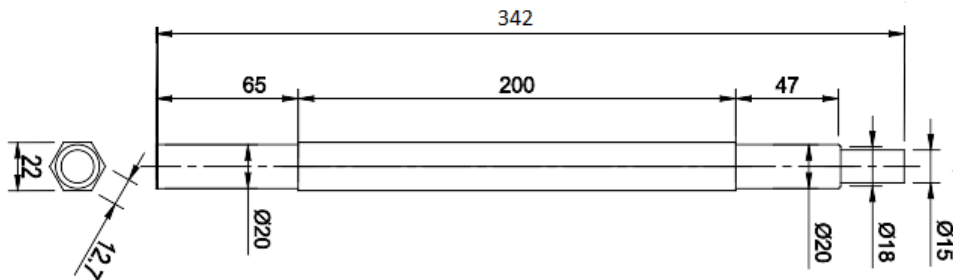
Figura 17 – Eixo



Fonte: Autor

O eixo foi projetado em perfil hexagonal na seção de encaixe das lâminas, esse formato possibilita o travamento na posição correta, as demais partes respeitam dimensões convencionais para o acoplamento a parte motriz e mancais. Disponível no Apêndice A

Figura 18 – Detalhamento Eixo



Fonte: Autor

4.4.6 Torque

Para calcular o torque em um eixo utilizando um motor e redução Nema 34, é necessário conhecer algumas informações sobre o sistema, como a potência do motor, a relação de redução, a velocidade de rotação e o coeficiente de eficiência da transmissão.

Considerando que o motor tem uma potência de 1,5 kW, uma relação de redução de 10:1, uma velocidade de rotação de 1500 RPM e um coeficiente de eficiência de 0,9, podemos calcular o torque no eixo usando a fórmula:

Torque (N.m) = Potencia (kW) x 9550 / Velocidade de rotação (RPM) / Relação de redução x Coeficiente de eficiência

Substituindo os valores, temos:

$$Torque(Nm) = \frac{1,5 \times 9550}{1500 \times 10 \times 0,9} \quad (4)$$

Portanto, o torque no eixo seria de aproximadamente 8,43 Nm.

4.5 Lâminas

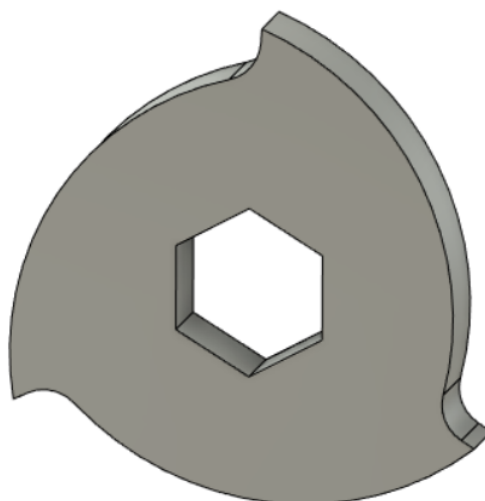
Como citado no Desenvolvimento em 3.2.3 o material escolhido será o aço inoxidável AISI 304 com suas respectivas constantes físicas:

Modulo de Young	210 GPa
Coefficiente de Poisson	0.3
Resistência a Escoamento	207 Mpa
Resistência Máxima a Tração	345 Mpa

Tabela 3 – Especificações Aço INOX AISI 304

A lâmina teve seu dimensionamento considerando o aumento do volume da peça com cantos mais suavizados, fatores que contribuem para o rasgo do material e evitam o travamento da matéria durante o processo.

Figura 19 – Lâmina de Corte



Fonte: Autor

4.5.1 Força de Corte

Com um torque de 8,43 Nm, podemos calcular a força de corte resultante na ferramenta de corte utilizando a seguinte fórmula:

$$F_c = \frac{T}{\frac{d}{2}} \quad (5)$$

Onde:

- F_c = Força de corte (N)
- Torque (Nm)
- d = Diâmetro da ferramenta (m)

Substituindo os valores, temos:

$$F_c = \frac{8,43}{\frac{0,07}{2}} = 241,71 \quad (6)$$

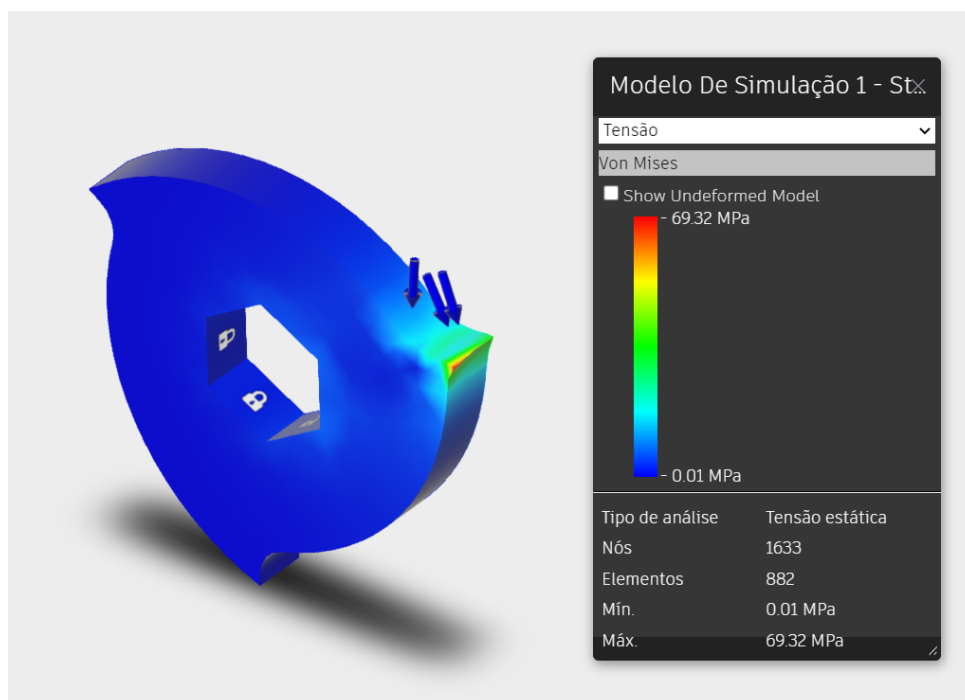
Portanto, com um torque de 8,43 Nm, a força de corte resultante na ferramenta de corte é de aproximadamente 241,71 N.

4.5.2 Simulação Numérica

Devido à complexidade geométrica das lâminas de corte, seu dimensionamento foi realizado numericamente. Ao realizar a simulação numérica da tensão máxima de Von Mises, podemos avaliar se o material utilizado é adequado para a aplicação específica. Comparando esse valor com as propriedades mecânicas do material, como seu limite de resistência à tração, podemos determinar se a estrutura está operando dentro de uma faixa segura.

Caso a tensão máxima de Von Mises seja menor que o limite de resistência à tração do material, isso indica que a estrutura está dentro de uma zona de segurança e não deve sofrer deformações plásticas significativas ou falha estrutural. No entanto, se a tensão máxima ultrapassar o limite de resistência à tração, isso pode indicar um risco de deformação plástica excessiva ou até mesmo falha estrutural. Por meio de simulação, foram obtidos o limite máximo de tensão suportável e o deslocamento resultante da lâmina aplicando uma carga de 241,71 N, que é a força de corte calculada.

Figura 20 – Tensão de Von Mises

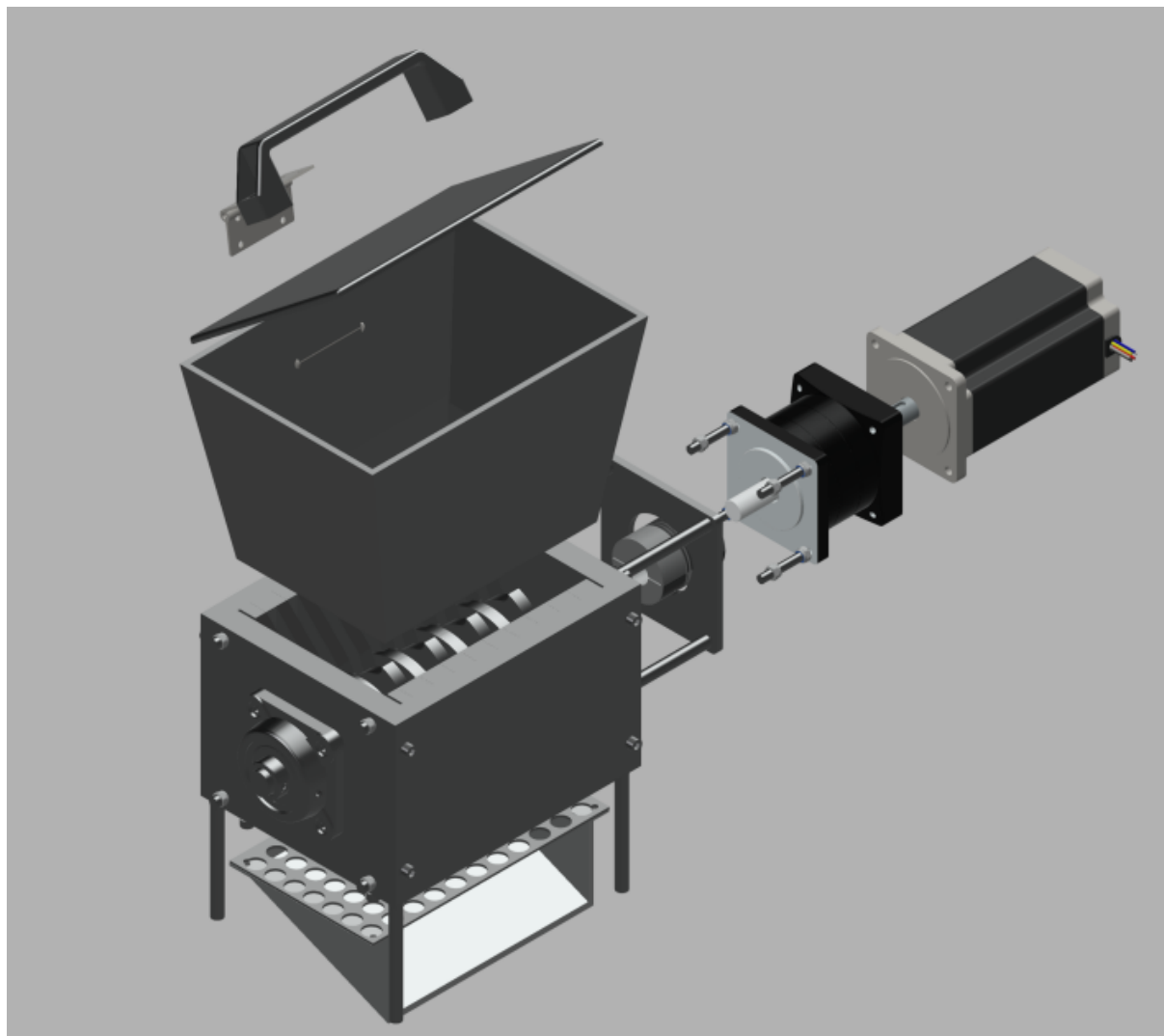


Fonte: Autor

De acordo com a simulação, a tensão mínima de Von Mises foi 0.008293 MPa e a Máxima 69.32 Mpa, sendo possível avaliar que o design não apresentou falha por escoamento na carga de 241,71 N aplicada.

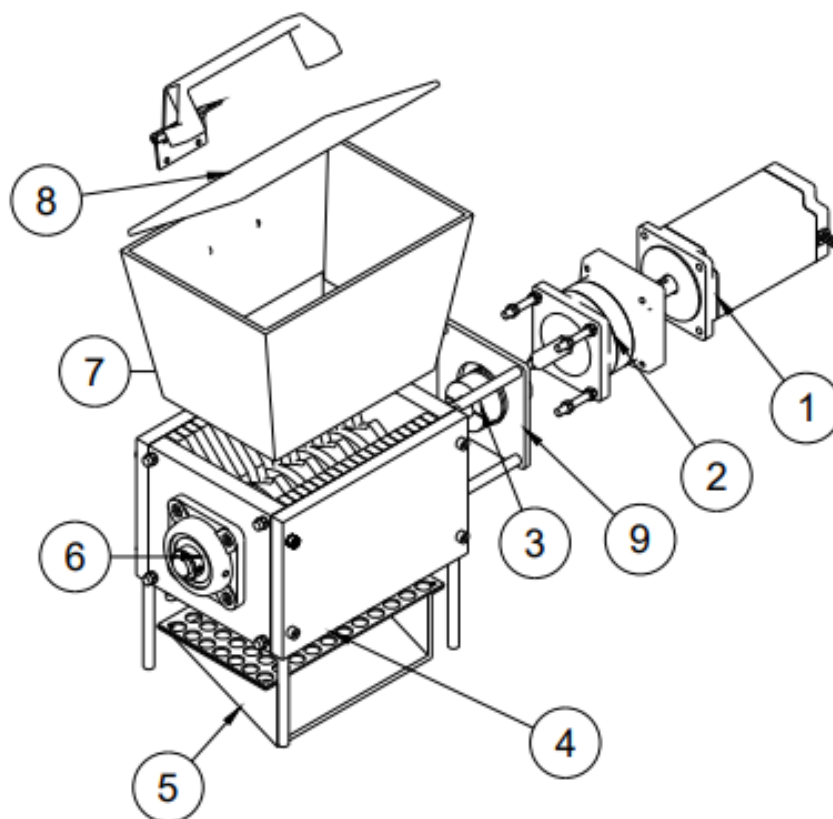
4.6 ESPECIFICAÇÕES FINAIS

Figura 21 – Projeto 3D



Fonte: Autor

Figura 22 – Detalhamento Triturador de Polímeros



1	Motor Nema 34
2	Redutor Orbital Nema
3	Acoplamento
4	Peneira
5	Guia de Saída
6	Mancal Flange
7	Compartimento de Trituração
8	Tampa de Segurança
9	Estrutura de Fixação

Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

1. Projetar conceitualmente e detalhar o triturador de polímeros: Foi desenvolvido o projeto 3D e detalhamento completo do triturador de polímeros bem como os desenhos das partes do equipamento.
2. Levantar e listar peças e componentes: Todas as peças foram listadas pensando em classificações empregadas na indústria metal mecânica com fácil acesso no mercado.
3. Simular numericamente a lâmina de trituração: A simulação numérica valida a geometria proposta da lâmina bem como a integridade estrutural quando submetida aos esforços de corte.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar a análise mecânica completa do Triturador em relação aos mancais, eixos, uniões parafusadas e lâminas de corte.
2. Construção do protótipo e estudo FMEA por análise de falha.
3. Realizar estudo de viabilidade de filamentos recicláveis através de compósitos de polímeros processados em conjunto.

Referências

- ABIPLAST. **P E R F I L A indústria de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil**. 2020. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2021/08/Perfil2020_abiplast.pdf>. Citado na página 14.
- ATHANI, V. **Stepper motors: fundamentals, applications and design**. [S.l.]: New Age International, 1997. Citado na página 24.
- AYO, A. W.; OLUKUNLE, O.; ADELABU, D. Development of a waste plastic shredding machine. **International Journal of Waste Resources**, v. 7, n. 2, p. 1–4, 2017. Citado na página 20.
- CHEN, J.; GAO, X.; XU, D. **Advances in Materials Science and Engineering. 2019**. [S.l.]: V, 2019. Citado na página 22.
- DIYCHEN.XYZ. **Ebay**. 2022. Disponível em: <<https://www.ebay.com/itm/265267866742>>. Citado na página 23.
- EKMAN, R. Development of a plastic shredder. 2018. Citado na página 21.
- FILA, D. F. D. **Impressão 3d**. 2022. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/blog/impresao-3d-com-filamento-petg-guia-de-impresao-completo/>>. Citado na página 22.
- FORD, S.; MINSHALL, T. Invited review article: Where and how 3d printing is used in teaching and education. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 25, p. 131–150, 2019. Citado na página 14.
- JORDAN. **Jordan**. 2022. Disponível em: <<https://www.jordanreductionsolutions.com/machines/shredders/>>. Citado na página 21.
- JR, S. V. C. Ciência dos polímeros. **Artiliber editora, São Paulo**, v. 24, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- JR, W. D. C.; RETHWISCH, D. G. **Callister's materials science and engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- MANO, E. B.; PACHECO, É. B.; BONELLI, C. **Meio ambiente, poluição e reciclagem**. [S.l.]: SciELO Brasil, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. [S.l.]: bookman editora, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.
- PERAZA, C. **Plastic shredder**. 2021. Disponível em: <shorturl.at/mHUW3>. Citado na página 20.
- PLASTIC, P. **Precious Plastic**. 2022. Disponível em: <<https://preciousplastic.com/solutions/machines/basic.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- SATRINDTECH. **plasticshredder**. 2022. Disponível em: <<https://satrindtech.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

SIMPSON, T. W.; WILLIAMS, C. B.; HRIPKO, M. Preparing industry for additive manufacturing and its applications: Summary & recommendations from a national science foundation workshop. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 13, p. 166–178, 2017. Citado na página [14](#).

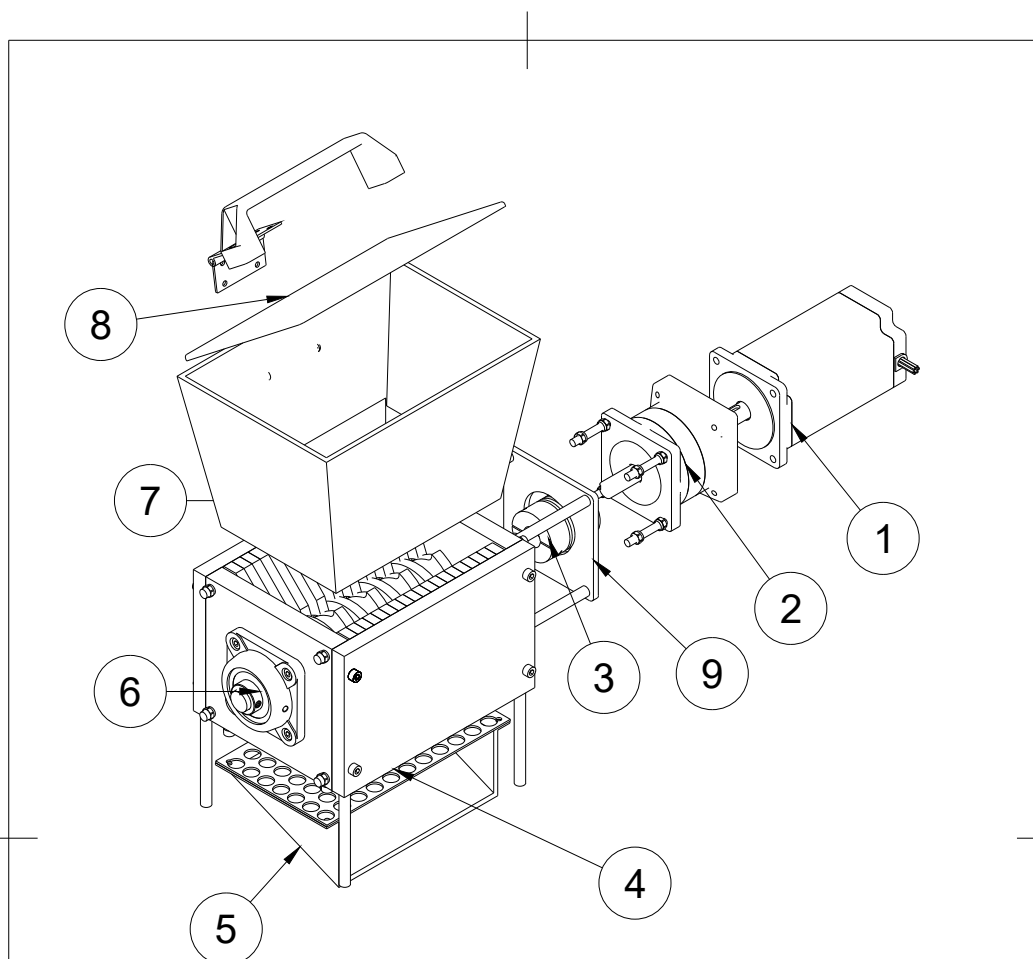
SPINACÉ, M. A. d. S.; PAOLI, M. A. D. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química nova**, SciELO Brasil, v. 28, p. 65–72, 2005. Citado 2 vezes nas páginas [17](#) e [18](#).

WONG, J. H. et al. Wear mechanisms and performance of pet shredder blade with various geometries and orientations. **Machines**, MDPI, v. 10, n. 9, p. 760, 2022. Citado na página [24](#).

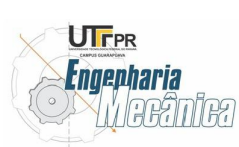
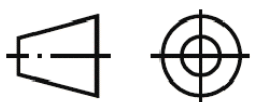
Apêndices

APÊNDICE A – DESENHOS

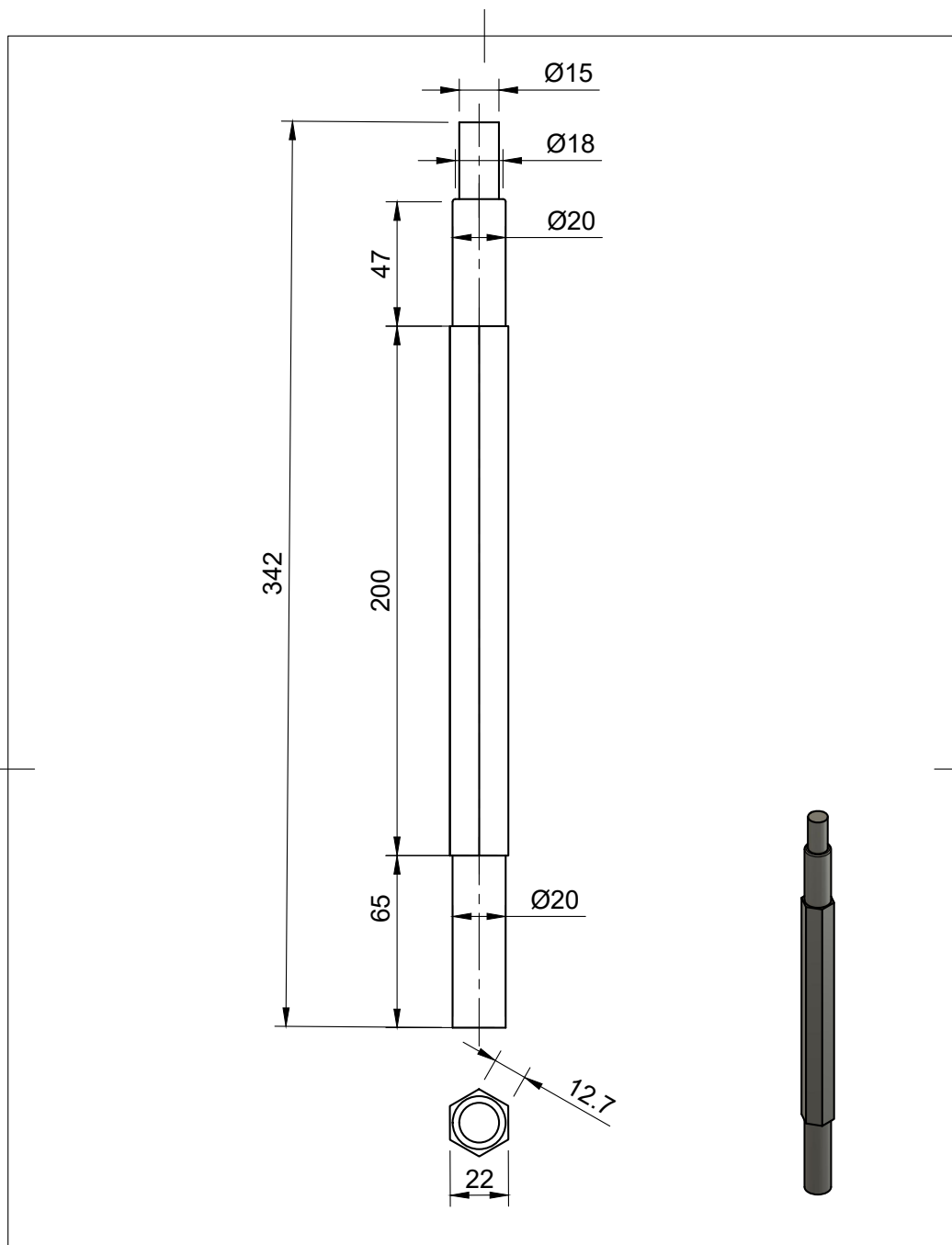
A.1 Vista Explodida

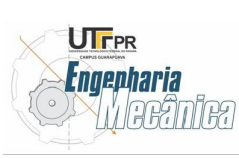
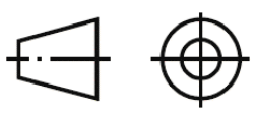


1	Motor Nema 34
2	Redutor Orbital Nema
3	Acoplamento
4	Peneira
5	Guia de Saída
6	Mancal Flange
7	Compartimento de Trituração
8	Tampa de Segurança
9	Estrutura de Fixação

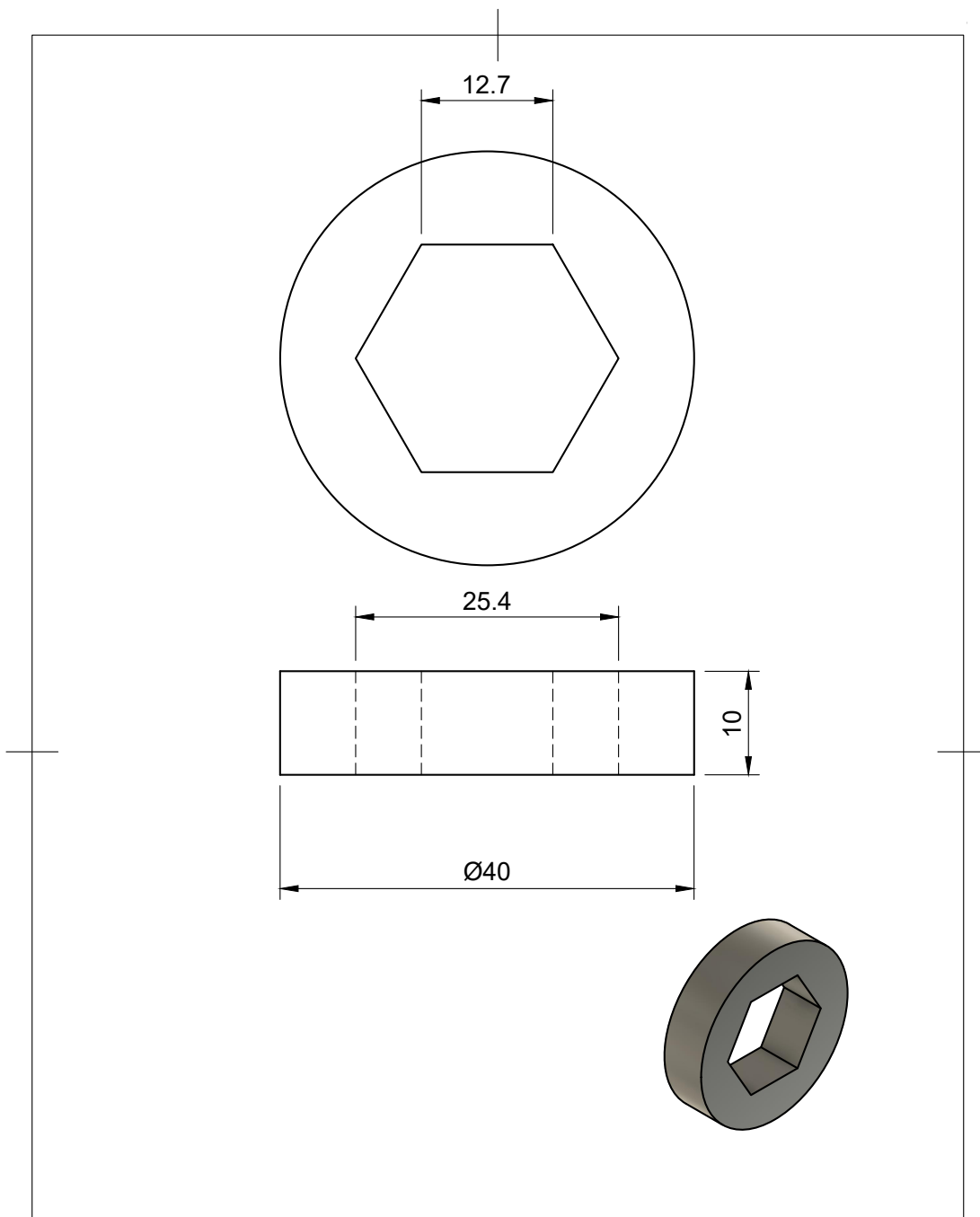
Dept.	Curso Eng. Mecânica	Autor Guilherme H. da Costa	Aprovação Guilherme H. da Costa
	Título Eixo Hexagonal	Document status	DWG No.
		Rev. 0	Date of issue 23/04/2023
		Sheet	


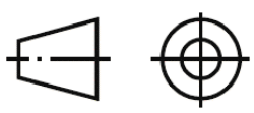
A.2 Eixo Hexagonal



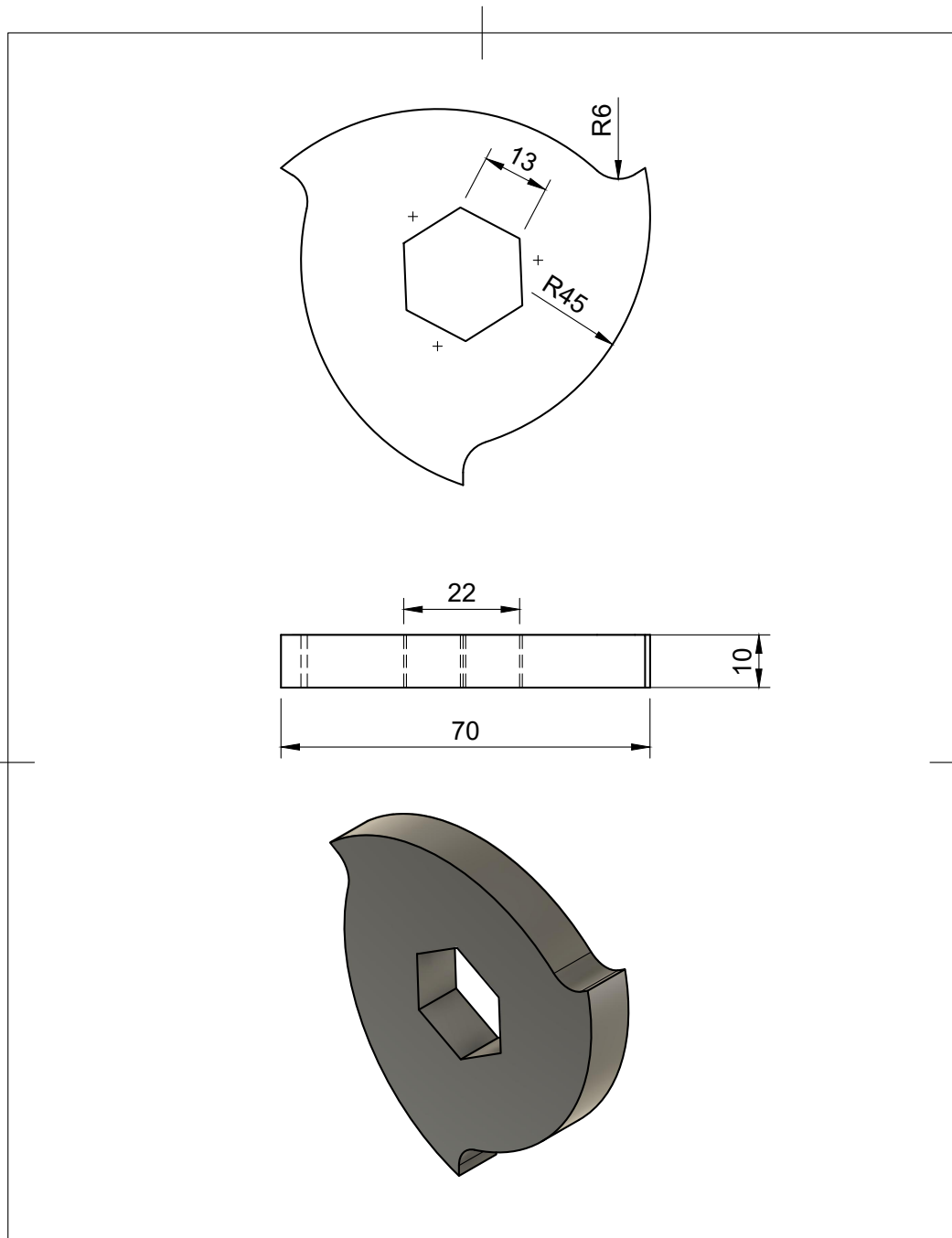
Dept.	Curso Eng. Mecânica	Autor Guilherme H. da Costa	Aprovação Guilherme H. da Costa	
		Título Eixo Hexagonal	Document status	
				DWG No. Escala 1:2
		Rev. 0	Date of issue 23/04/2023	Sheet

A.3 Espaçador



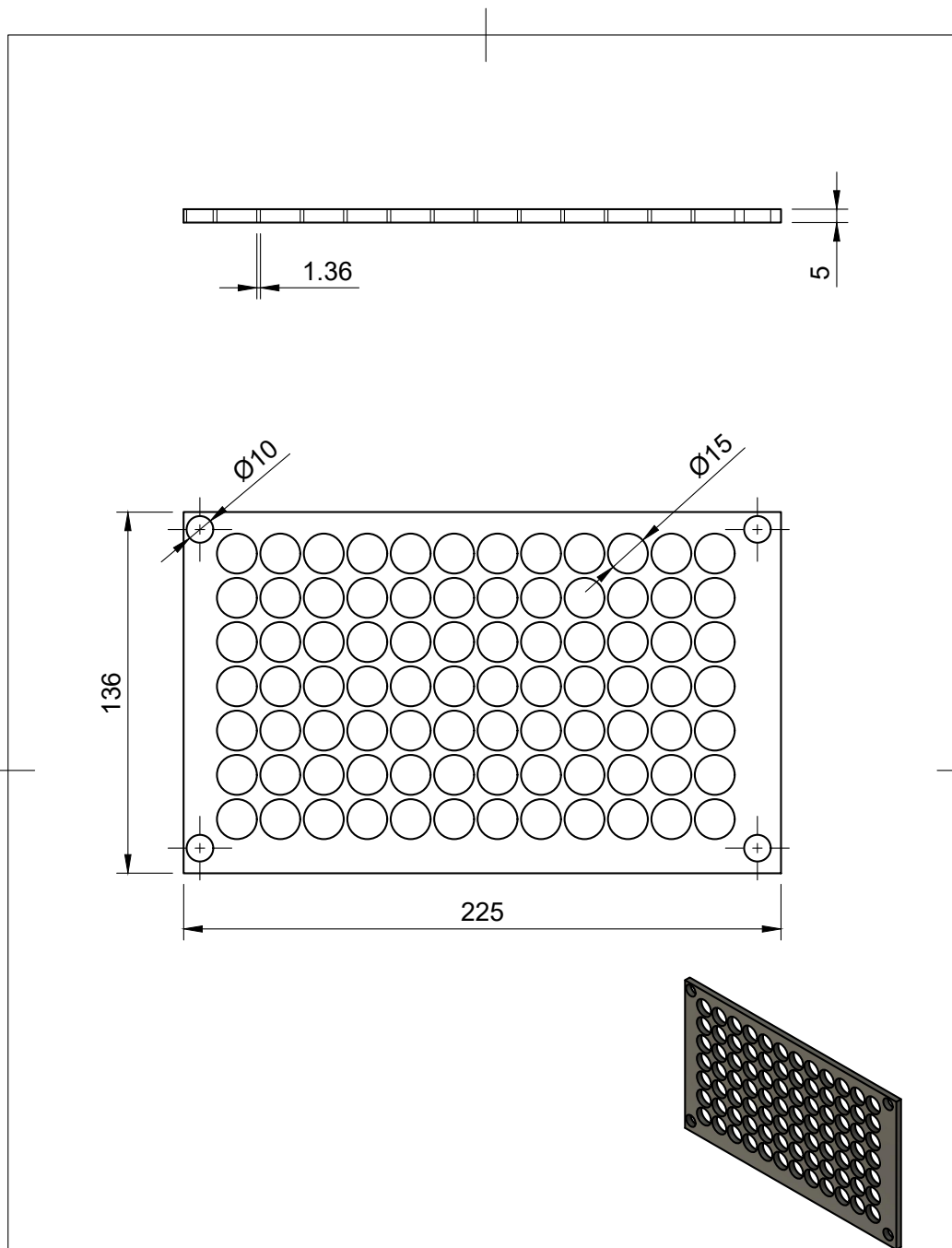
Dept.	Curso Eng. Mecânica	Autor Guilherme H. da Costa	Aprovação Guilherme H. da Costa
		Título Eixo Hexagonal	Document status
			DWG No. Escala: 2:1
		Rev. 0	Date of issue 23/04/2023


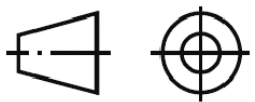
A.4 Lâmina de Corte



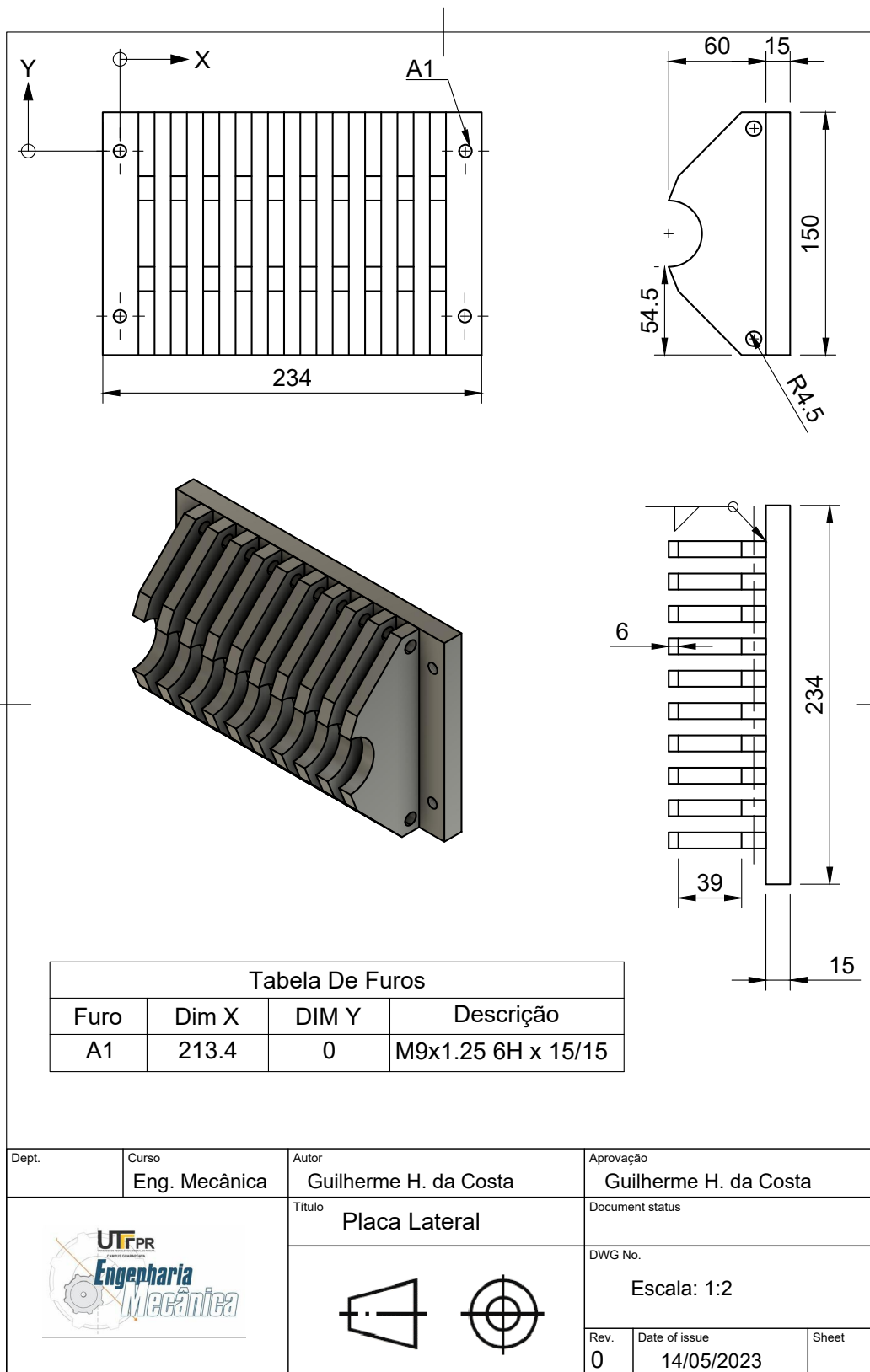
Título: Lâmina de corte	Curso: Engenharia Mecânica	Autor: Guilherme Henrique da Costa			
	TCC - Triturador de Polímeros	Escala: 1:1			
			<table border="1"> <tr> <td data-bbox="1029 1870 1085 1926"> Rev. 1 </td> <td data-bbox="1085 1870 1292 1926"> Date of issue 23/04/2023 </td> <td data-bbox="1292 1870 1372 1926"> Sheet </td> </tr> </table>	Rev. 1	Date of issue 23/04/2023
Rev. 1	Date of issue 23/04/2023	Sheet			


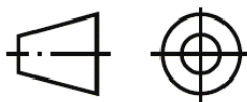
A.5 Peneira



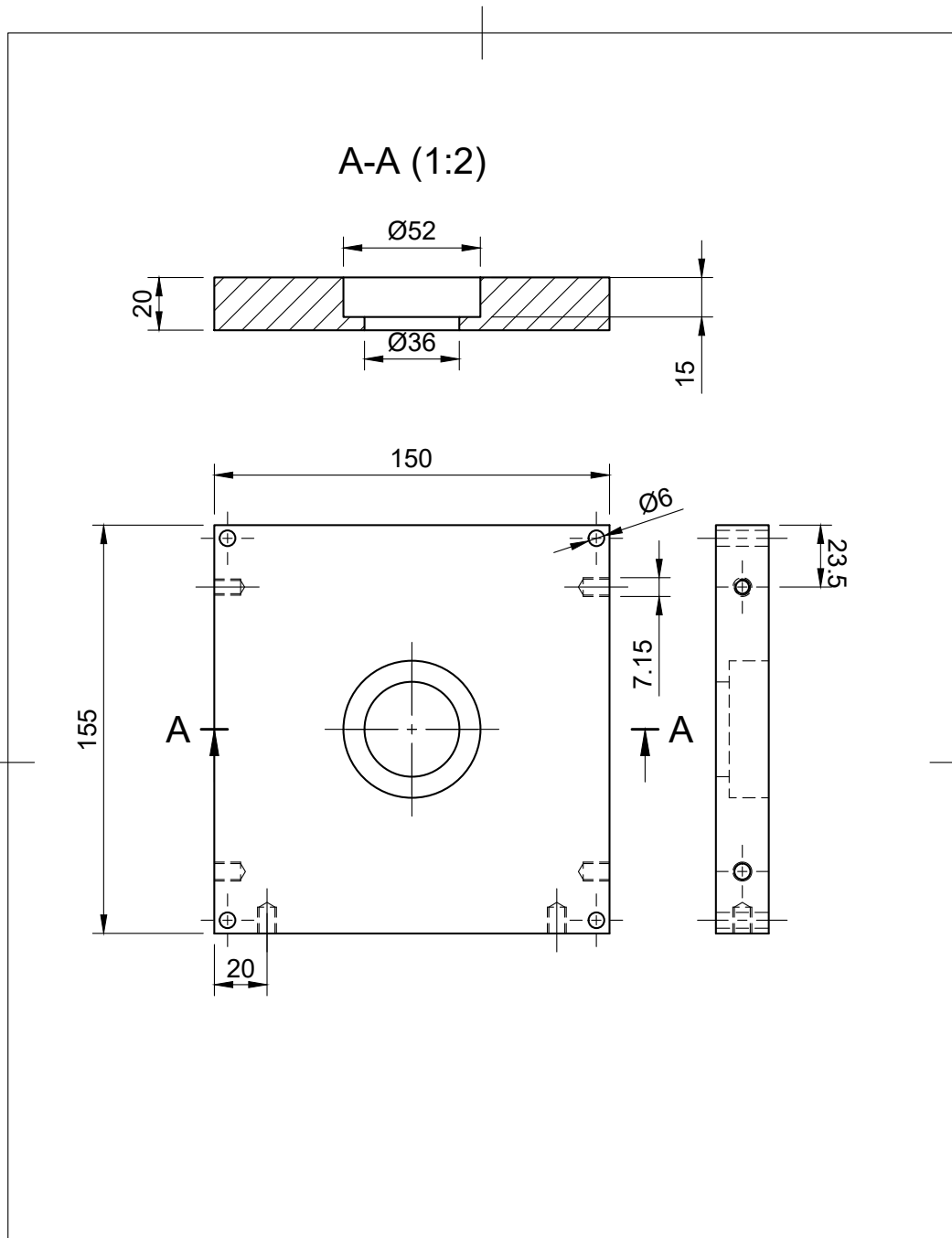
Dept.	Curso Eng. Mecânica	Autor Guilherme H. da Costa	Aprovação Guilherme H. da Costa	
		Título Peneira	Document status	
				DWG No. Escala 1:2
				Rev. 0



A.6 Placa Lateral



Dept.	Curso Eng. Mecânica	Autor Guilherme H. da Costa	Aprovação Guilherme H. da Costa	
		Título Placa Lateral	Document status	
				DWG No. Escala: 1:2
		Rev. 0	Date of issue 14/05/2023	Sheet

A.7 Placa Dianteira e Traseira



Dept.	Curso Eng. Mecânica	Autor Guilherme H. da Costa	Aprovação Guilherme H. da Costa	
		Título Placa Dianteira e Traseira	Document status	
				DWG No. Escala 1:2
				Rev. 0