



PUC
RIO

MEC

Departamento de Engenharia Mecânica

Vitor Farina de Souza de Botton

**Desenvolvimento e otimização de trançadeira para fabricação de
filamentos híbridos para materiais compósitos**

Projeto Final

Trabalho apresentado ao Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, em cumprimento parcial às exigências para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Coorientador: Natalia Victoria dos Santos

Rio de Janeiro

Junho 2026

Agradecimentos

Tenho muito orgulho em poder dizer que ninguém chega longe sozinho, e comigo não poderia ter sido diferente. Ao longo da minha trajetória acadêmica e durante o desenvolvimento deste trabalho, tive a felicidade de ser acompanhado por pessoas que contribuíram de maneira fundamental para que eu pudesse chegar até aqui. A cada uma delas, deixo meu sincero agradecimento.

À minha coorientadora, Natália Victoria dos Santos, agradeço pela confiança depositada em mim ao longo de uma trajetória extensa, pela disponibilidade constante, pela prontidão em ajudar em todos os momentos e, principalmente, pela enorme paciência. Sua orientação foi muito além do apoio técnico e acadêmico; você se tornou uma das grandes inspirações da minha vida acadêmica. Foi também uma das pessoas que ajudou a cultivar muitos dos meus sonhos e, ao mesmo tempo, colocou meus pés no chão para que eu pudesse enxergar caminhos reais para alcançá-los.

Ao meu orientador, Daniel Carlos Taissum Cardoso, agradeço por toda a orientação, paciência e confiança depositada em mim durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua condução foi essencial para que o projeto pudesse evoluir com consistência, permitindo que as ideias fossem amadurecidas e transformadas em contribuições concretas dentro da finalização do presente documento.

Ao meu irmão, Leonardo Farina, agradeço pelo apoio no desenvolvimento de ideias para o projeto e pelas contribuições na parte técnica. Sua ajuda foi muito importante para a evolução das soluções propostas, para a organização do raciocínio de projeto e para a superação de dificuldades encontradas ao longo do trabalho.

À minha mãe, Monica Farina, e ao meu pai, Felipe de Botton, agradeço pelo amor incondicional, pelo apoio constante e por sempre acreditarem em mim. Obrigado por me incentivarem a ser ambicioso, a buscar meus objetivos com coragem e dedicação, mas sem nunca perder os valores essenciais de uma pessoa boa. Muito do que sou e do que conquistei é reflexo direto do cuidado, dos ensinamentos e da confiança que sempre recebi de vocês.

Agradeço também a todas as pessoas do laboratório LEM-DEC da PUC-Rio que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com apoio técnico, disponibilidade, troca de conhecimento ou auxílio durante as etapas experimentais. Em especial, agradeço a Renan Felinto, pela ajuda fundamental na realização dos ensaios de tração, etapa essencial para a validação experimental deste projeto.

A todos que estiveram presentes nessa caminhada, direta ou indiretamente, deixo minha profunda gratidão.

Resumo

Botton, Vitor Farina de Souza; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Orientador); Santos, Natália Victoria (Coorientadora). Desenvolvimento e otimização de trançadeira para fabricação de filamentos híbridos para materiais compósitos. Rio de Janeiro, 2026. Projeto Final – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e otimizar uma máquina trançadeira de bancada para a fabricação de filamentos trançados de fibras naturais destinados à aplicação em materiais compósitos. O estudo partiu do projeto e da construção de um modelo inicial, utilizado para validar o princípio básico de funcionamento da trançadeira, mas que apresentou limitações associadas à instabilidade estrutural e de funcionamento em geral. A partir dessa análise, foi desenvolvido um modelo final com melhorias no sistema de transmissão, na geometria estrutural, no acabamento das superfícies de contato e na implementação de um sistema de tensionamento dos carretéis. O sistema de transmissão foi redimensionado com uma engrenagem motora de menor diâmetro, buscando reduzir a velocidade angular e aumentar o torque disponível para movimentação dos carretéis. Foram realizados ensaios de tração em corpos de prova de fibra única e de trança de rami, com o objetivo de avaliar a influência da arquitetura trançada no comportamento mecânico do material. Os resultados indicaram que os fios únicos apresentaram maior tensão média de ruptura e maior rigidez axial, enquanto as tranças apresentaram maior deformabilidade e menor módulo aparente, comportamento associado ao rearranjo geométrico dos filamentos durante o carregamento. Embora o modelo final tenha representado avanço em relação ao modelo inicial, principalmente pela maior robustez estrutural e melhor regularidade visual das tranças, o sistema de tensionamento ainda requer reformulação geométrica para atuar de forma mais eficiente. Assim, conclui-se que a trançadeira desenvolvida apresenta potencial para a produção laboratorial de reforços fibrosos trançados, mas ainda demanda melhorias no controle de tensão, na redução de atrito e na repetibilidade do processo.

Palavras-chave: Trançadeira; fibras naturais; rami; materiais compósitos; sistema de tensionamento; ensaio de tração.

Abstract

Botton, Vitor Farina de Souza; Cardoso, Daniel Carlos Taisum (Advisor); Santos, Natália Victoria (Co-advisor). Development and Optimization of a Braiding Machine for the Fabrication of Hybrid Filaments for Composite Materials. Rio de Janeiro, 2026. Undergraduate Final Project – Department of Mechanical Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

This work aimed to develop and optimize a bench-scale braiding machine for the fabrication of braided natural fiber filaments intended for application in composite materials. The study started with the design and construction of an initial model, which was used to validate the basic operating principle of the braiding machine but presented limitations associated with structural and general operational instability. Based on this analysis, a final model was developed with improvements in the transmission system, structural geometry, surface finishing of contact regions, and implementation of a spool tensioning system. The transmission system was redesigned using a smaller driving gear, aiming to reduce angular velocity and increase the torque available for spool movement. Tensile tests were performed on single ramie fiber specimens and ramie braided specimens to evaluate the influence of the braided architecture on the mechanical behavior of the material. The results indicated that the single fibers presented higher average tensile strength and greater axial stiffness, while the braids showed greater deformability and lower apparent modulus, a behavior associated with the geometric rearrangement of the filaments during loading. Although the final model represented an improvement over the initial model, mainly due to greater structural robustness and better visual regularity of the braids, the tensioning system still requires geometric redesign to operate more efficiently. Therefore, the developed braiding machine shows potential for laboratory-scale production of braided fibrous reinforcements, but still requires improvements in tension control, friction reduction, and process repeatability.

Keywords: Braiding machine; natural fibers; ramie; composite materials; tensioning system; tensile test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fio Único de Rami.....	21
Figura 2 - Componentes do Modelo Inicial	25
Figura 3 – Modelo 3D do Modelo Inicial: (A); Trançadeira na Sua Versão Inicial: (B) ..	28
Figura 4 - Conjunto Eletrônica Arduino Nano Drivers	29
Figura 5 - Engrenagem dos Carreais com Canaletas	30
Figura 6 - Engrenagem dos Carreais com Canaletas	31
Figura 7 – Esquema Geral do Percurso: (A); Placa Guia: (B); Guia Central: (C); Guia Carretel: (D).....	32
Figura 8 - Carretel Desacoplável	33
Figura 9 - Corpos de Prova Modelo Inicial	35
Figura 10 - Modelo 3D do Modelo Final: (A); Trançadeira na Sua Versão Final: (B)	37
Figura 11 – Modelo Final Carregado Vista Isométrica: (A); Modelo Final Carregado Vista Frontal: (B).....	39
Figura 12 – Sistema de Transmissão	40
Figura 13 – Padronização das Engrenagens.....	43
Figura 14 – Engrenagem Padronizada com Canaleta	44
Figura 15 – Componentes Estruturais Modelo Final	45
Figura 16 – Modelo 3D Sistema de Tensionamento: (A); Versão Final do Sistema de Tensionamento: (B).....	46
Figura 17 – Tensionador Carregado Vista Direita: (A); Tensionador Carregado Vista Esquerda: (B)	48
Figura 18 – Máquina Universal de Ensaios EMIC Utilizada nos Ensaios de Tração.....	53
Figura 19 – Detalhe da Fixação da Trança na Garra Inferior da Máquina de Ensaios.	54
Figura 20 – Corpo de Prova Posicionado Entre as Garras Durante o Ensaio de Tração. ...	55
Figura 21 – Tranças de Rami Produzidas Pelo Modelo Final da Trançadeira: (A); Ampliação Visual das Tranças de Rami: (B), (C)	60
Figura 22 – Variação Local de Compactação da Trança: (A); Abertura Excessiva Entre Filamentos: (B); Irregularidade no Passo e na Distribuição dos Filamentos: (C)	62
Figura 23 - Curvas Tensão-Deformação dos Corpos de Prova de Fio Único de Rami.	68
Figura 24 – Curvas Tensão-Deformação dos Corpos de Prova Trançados de Rami.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas típicas de fibras naturais selecionadas.....	13
Tabela 2 - Propriedades mecânicas de fios e cordões de fibras naturais.	14
Tabela 3 - Componentes da Versão Inicial da Trançadeira	25
Tabela 4 - Dados Dimensionais dos Corpos de Prova de Fibra Única	64
Tabela 5 - Resultados Mecânicos dos Corpos de Prova de Fibra Única	65
Tabela 6 - Dados Dimensionais dos Corpos de Prova de Trança	66
Tabela 7 - Resultados Mecânicos dos Corpos de Prova de Trança	67
Tabela 8 - Comparação Dimensional Entre Fios Únicos e Tranças de Rami.....	69
Tabela 9 - Comparação Mecânica Entre Fios Únicos e Tranças de Rami.....	70

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	10
1.1 Contextualização	10
1.2 Revisão da literatura	12
1.2.1 Fibra natural	12
1.2.2 Comportamento mecânico das fibras naturais trançadas	14
1.2.3 Comportamento de cordões com fibras naturais	16
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivos secundários	19
2.0 MATERIAIS E MÉTODOS	20
2.1 Materiais	20
2.2 Métodos	23
2.3 Modelo inicial	24
2.3.1 Detalhamento do modelo inicial	24
2.3.2 Funcionamento mecânico dos principais componentes do modelo inicial ...	28
2.3.2.1 Subsistema de acionamento e controle.	29
2.3.2.2 Subsistema de transmissão e guiamento	30
2.3.2.3 Subsistema de alimentação de fibra	32
2.4 Análise do desempenho do modelo inicial	34
2.5 Modelo final	37
2.5.1 Melhorias implementadas no modelo final	38
2.5.1.1 Redimensionamento do sistema de transmissão	40
2.5.1.2 Padronização e otimização das engrenagens	43
2.5.1.3 Melhorias estruturais e geométricas	44
2.5.1.4 Sistema de tensionamento dos carretéis	46
2.5.1.5 Redução de atrito e acabamento das superfícies	49
2.5.2 Limitações de projeto	50
2.6 Ensaios mecânicos	52

2.6.1	Preparação dos corpos de prova.....	53
2.6.2	Ensaio de tração das tranças	56
2.6.3	Parâmetros analisados.....	56
3.0	ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
3.1	Avaliação da morfologia das tranças produzidas.....	59
3.2	Resultados dos ensaios de tração	63
3.3	Comparação entre fios únicos e tranças de rami.....	69
3.4	Discussão dos resultados.....	71
4.0	CONCLUSÕES	73
4.1	Conclusões do Trabalho.....	73
4.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	75
	REFERÊNCIAS.....	77
	APÊNDICES.....	81
	Apêndice A - Desenho Técnico Geral da Trançadeira	81
	Apêndice B - Desenhos Técnico Geral do Sistema de Transmissão	82
	Apêndice C - Desenho Técnico Geral do Sistema de Tensionamento	83
	Apêndice D - Código de Controle do Arduino Nano	84

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A busca por materiais mais leves, resistentes e eficientes continua a impulsionar a inovação em engenharia, sobretudo em aplicações que exigem alto desempenho estrutural aliado à redução de custos e de impactos ambientais. Nesse cenário, as fibras naturais vêm se consolidando como alternativa promissora às fibras sintéticas por combinarem boa relação resistência-peso, ampla disponibilidade e menor pegada ambiental. Estudos recentes destacam o potencial de fibras como sisal, rami, juta, bambu e bucha em matrizes poliméricas ou cimentícias, com ganhos de desempenho mecânico e de sustentabilidade ao longo do ciclo de vida do material. [1-3]

Além do apelo ambiental, há uma questão socioeconômica: setores como a construção civil buscam soluções que conciliem desempenho, custo e responsabilidade ambiental. Isso é particularmente relevante quando se consideram materiais convencionais, como o concreto e o aço, que estão dentre os maiores contribuintes para emissões de CO₂ e consumo de recursos, questão que vem motivando estratégias de mitigação e a adoção de compósitos verdes. [2-4] Nesse contexto, a literatura aponta iniciativas voltadas à caracterização e padronização de compósitos sustentáveis para habitações sociais, ressaltando a importância de metodologias reprodutíveis de ensaio e de fabricação. [5]

Do ponto de vista microestrutural, o arranjo das fibras no compósito exerce influência direta sobre o desempenho final. Entre os arranjos possíveis, as configurações trançadas se destacam por permitir a confecção de elementos de reforço com maior diâmetro e por favorecer a acomodação de defeitos, descontinuidades e variações geométricas presentes nas fibras naturais. [6,7] A literatura também registra aplicações consolidadas de fibras naturais como elementos de reforço em sistemas estruturais; um exemplo clássico é o emprego de sisal na alma de cabos de aço, evidenciando robustez, disponibilidade e custo competitivo dessas fibras em ambientes de engenharia. [8]

Ainda que apresentem vantagens relevantes, as fibras naturais impõem desafios técnicos.[3,9] Dentre eles, a variabilidade de propriedades, a sensibilidade à umidade e a necessidade de controle rigoroso do alinhamento e da tensão durante o processamento[9]. O desempenho do compósito depende criticamente da qualidade geométrica das mechas e tranças (uniformidade de passo, compacidade, estabilidade dimensional) e da integridade do contato fibra-matriz; assim, o controle do trançamento e da tensão aplicada às fibras é um fator de primeira ordem para reduzir defeitos e dispersão de resultados mecânicos. [2,3,9]

Com isso, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos capazes de melhorar a regularidade geométrica das tranças e controlar as condições de processamento dos filamentos, especialmente no que se refere ao alinhamento e à tensão aplicada às fibras[6,7]. A partir desse ponto que se insere a proposta deste trabalho: desenvolver e otimizar uma trançadeira para a fabricação de filamentos híbridos destinados a compósitos, com ênfase na implementação de um sistema de tensionamento capaz de assegurar tranças mais homogêneas e reproduzíveis. A hipótese subjacente é que o controle ativo de tensão e a melhoria do projeto mecânico da trançadeira (componentes, cinemática e estabilidade operacional) resultam em tranças com menor variação morfológica e, por consequência, em compósitos com propriedades mais consistentes. [6,7]

Do ponto de vista de sustentabilidade, a abordagem proposta dialoga com a substituição (ou redução) do uso de reforços e matrizes de alta pegada de carbono por combinações que incorporem fibras naturais [2,3] e, quando pertinente, hibridização com outras fibras para atender requisitos específicos de desempenho, sempre com atenção aos impactos de fabricação e descarte (por exemplo, emissões associadas à produção de fibras sintéticas e à geração de microplásticos). [2,3,9]

Com a implementação desse sistema na trançadeira espera-se demonstrar que o controle de tensão no processo de trançamento reduz variabilidades geométricas e melhora a uniformidade do reforço, refletindo-se em ganhos de desempenho mecânico e de confiabilidade dos compósitos resultantes [6,7]. Ao articular projeto mecânico da trançadeira, controle de processo e avaliação experimental, o trabalho pretende fornecer diretrizes práticas para a fabricação de tranças naturais e híbridas orientadas a aplicações estruturais sustentáveis. [3,6,7,9]

1.2 Revisão da literatura

A revisão da literatura foi estruturada com o objetivo de apresentar os principais conceitos e trabalhos relacionados ao uso de fibras naturais como reforço em materiais compósitos, ao comportamento mecânico dessas fibras e à influência da arquitetura trançada no desempenho de cordões e fios naturais. Essa abordagem é necessária porque o desempenho final de um reforço fibroso não depende apenas da fibra utilizada, mas também da forma como ela é organizada, processada e tensionada durante a fabricação. Nesse contexto, são discutidos estudos sobre fibras naturais, propriedades mecânicas de fios vegetais e aplicações de cordões trançados em sistemas compósitos, servindo como base para o desenvolvimento da trançadeira proposta neste trabalho e avaliação dos corpos de prova trançados fabricados pela mesma.

1.2.1 Fibra natural

As fibras naturais vêm sendo estudadas como alternativa às fibras sintéticas em aplicações de engenharia devido à sua baixa densidade, disponibilidade, menor custo e menor impacto ambiental. *Santos* [5], em sua dissertação sobre compósitos verdes para habitações sociais, destaca que fibras vegetais como juta, sisal e rami apresentam caráter renovável e biodegradável, podendo ser utilizadas como reforço em matrizes poliméricas para melhorar o desempenho mecânico de componentes com menor impacto ambiental. A autora também ressalta que essas fibras são atrativas para aplicações em construção civil e habitações sociais, especialmente por permitirem o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e economicamente viáveis. [20,21]

Entre as fibras vegetais de interesse, juta, sisal e rami apresentam propriedades distintas e grande variabilidade, tanto em composição quanto em desempenho mecânico. Segundo *Santos* [5], a fibra de rami possui elevado teor de celulose, entre 68,6% e 91%, e baixo teor de lignina, entre 0,6% e 0,7%, enquanto a juta e o sisal apresentam teores de celulose de 41% a 48% e 47% a 78%, respectivamente. Essas diferenças de composição influenciam diretamente propriedades como rigidez, resistência, absorção de umidade e estabilidade dimensional das fibras.

As fibras naturais utilizadas como reforço em compósitos são geralmente fibras lignocelulósicas, extraídas de diferentes partes da planta, como caule, folhas, sementes ou frutos. No caso de fibras de caule, como o rami e a juta, a obtenção do material envolve etapas de extração, separação, limpeza e preparação dos feixes fibrosos, de modo a permitir sua utilização na forma de fibras, fios ou reforços contínuos [5,21]. A morfologia dessas fibras é caracterizada por uma estrutura interna heterogênea, composta principalmente por microfibrilas de celulose associadas à hemicelulose, lignina e outros constituintes, o que contribui para a variabilidade de propriedades mecânicas observada na literatura [5,21].

Apesar das vantagens ambientais e mecânicas, as fibras naturais apresentam limitações importantes associadas à sua origem vegetal. Suas propriedades dependem de fatores como espécie, local de cultivo, idade da planta, método de extração e processamento. Essa variabilidade pode afetar o diâmetro, a rugosidade superficial, a resistência mecânica e o comportamento durante a fabricação de compósitos ou cordões trançados. Dessa forma, a utilização de fibras naturais exige controle adequado do processamento e caracterização experimental das amostras utilizadas.[5]

Tabela 1 - Propriedades mecânicas típicas de fibras naturais selecionadas.

Fibra natural	Resistência à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]
Rami	400–938	61,4–128
Juta	400–800	10–30
Sisal	347–378	15,2

1.2.2 Comportamento mecânico das fibras naturais trançadas

O comportamento mecânico das fibras naturais é influenciado por sua composição, orientação, continuidade e forma de processamento. *Santos* [5] apresenta valores de referência para fibras vegetais, indicando que o rami pode apresentar resistência à tração entre 400 e 938 MPa e módulo de elasticidade entre 61,4 e 128 GPa, enquanto a juta apresenta resistência entre 400 e 800 MPa e módulo entre 10 e 30 GPa, e o sisal apresenta resistência entre 347 e 378 MPa e módulo de aproximadamente 15,2 GPa. Esses valores mostram o potencial mecânico das fibras naturais, mas também evidenciam a grande variabilidade encontrada na literatura. [20]

Wambua. [20] compararam compósitos de polipropileno reforçados com fibras naturais, como sisal, kenaf, cânhamo, juta e coco, com compósitos reforçados com fibra de vidro. Os autores observaram que, embora as fibras naturais possam apresentar propriedades absolutas inferiores às fibras sintéticas em algumas condições, suas propriedades específicas podem ser competitivas devido à menor densidade. Esse aspecto reforça o interesse no uso de fibras naturais em aplicações nas quais a redução de massa, o menor impacto ambiental e o custo do reforço são fatores relevantes.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas de fios e cordões de fibras naturais.

Material / arquitetura	Resistência à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Referência
Fio de rami	$57,2 \pm 12,9$	$8,4 \pm 1,3$	<i>Santos e Cardoso</i> [10]
Fio de juta	$71,0 \pm 8,9$	$5,7 \pm 1,2$	<i>Santos e Cardoso</i> [10]
Fio de sisal	$112,8 \pm 9,2$	$5,4 \pm 0,3$	<i>Santos e Cardoso</i> [10]
Fio comercial de sisal	$199,19 \pm 31,75$	$7,54 \pm 0,82$	<i>Joy et al.</i> [11]
Cordão trançado de sisal	$140,61 \pm 23,8$	$5,4 \pm 1,13$	<i>Joy et al.</i> [11]

A comparação entre fibras individuais, fios comerciais e cordões trançados mostra que a arquitetura do reforço influencia diretamente os valores mecânicos obtidos. Fios e tranças podem apresentar resistência e módulo inferiores aos valores reportados para fibras isoladas, pois incorporam efeitos de descontinuidade, defeitos, ondulação,

Entretanto, quando as fibras são utilizadas na forma de fios ou cordões comerciais, os valores mecânicos podem ser inferiores aos valores esperados para fibras isoladas. *Santos e Cardoso* [10] observaram, em estudo sobre impressão 3D de componentes poliméricos reforçados com fios vegetais, que os fios de rami, juta e sisal apresentaram resistência à tração de $57,2 \pm 12,9$ MPa, $71,0 \pm 8,9$ MPa e $112,8 \pm 9,2$ MPa, respectivamente. Os módulos de elasticidade obtidos foram de $8,4 \pm 1,3$ GPa para rami, $5,7 \pm 1,2$ GPa para juta e $5,4 \pm 0,3$ GPa para sisal. Esses valores são menores do que aqueles reportados para fibras individuais, o que foi atribuído à presença de defeitos, descontinuidade, ondulação, variabilidade de diâmetro e características próprias da fabricação dos fios.

Além disso, no caso das tranças, a redução da tensão de ruptura aparente também pode estar associada à orientação dos filamentos em relação ao eixo de carregamento. Diferentemente da fibra única, que tende a ser solicitada predominantemente na direção axial, os filamentos em uma configuração trançada apresentam uma leve inclinação em relação à direção de tração. Dessa forma, parte da carga aplicada não atua diretamente no eixo longitudinal de cada fibra, sendo parcialmente consumida em rearranjos geométricos, fechamento da estrutura trançada e redistribuição de esforços entre os filamentos. Esse efeito contribui para a redução da rigidez e da tensão aparente de ruptura das tranças em comparação com fibras solicitadas de forma mais alinhada.

Esse comportamento é relevante para o presente trabalho, pois os corpos de prova utilizados não correspondem a fibras individuais ideais, mas sim a fibras naturais em condição prática de uso, sujeitas a irregularidades geométricas, variações de diâmetro e possíveis defeitos ao longo do comprimento[5,10]. Assim, a caracterização mecânica experimental torna-se necessária para avaliar o desempenho real das fibras e das tranças produzidas pela trançadeira, especialmente no caso do rami, que foi utilizado nos ensaios de tração deste trabalho. [5,10]

1.2.3 Comportamento de cordões com fibras naturais

Além das propriedades individuais das fibras, a arquitetura do cordão influencia diretamente o comportamento mecânico do reforço. Joy. [11,22] investigaram cordões trançados de fibras naturais de sisal e linho, incluindo configurações puras e híbridas em arranjo de três filamentos. Os autores destacam que o trançamento pode ser utilizado como alternativa ao processo convencional de fiação, especialmente para fibras naturais com maior rigidez e maior diâmetro, como o sisal, cuja fiação industrial pode ser limitada para baixos valores de tex. Nesse contexto, o tex é uma unidade de densidade linear utilizada para caracterizar fios e cordões, correspondendo à massa, em gramas, de 1000 metros de material; portanto, menores valores de tex indicam fios mais finos e leves. [22]

No estudo de Joy. [11], os cordões trançados foram fabricados em uma trançadeira tipo maypole impressa em 3D e ensaiados à tração de acordo com a ASTM D2256 [19], utilizando comprimento entre garras de 250 mm e velocidade nominal de 18 mm/min. Esses parâmetros são particularmente relevantes para o presente trabalho, pois se aproximam da metodologia experimental adotada nos ensaios de tração dos fios únicos e tranças de rami produzidas pela trançadeira desenvolvida.

Equipamentos do tipo maypole são comumente utilizados para a fabricação de cordões e estruturas trançadas, pois permitem que múltiplos carretéis se desloquem em trajetórias alternadas ao redor do eixo de formação da trança. Esse tipo de configuração possibilita a produção de cordões contínuos com geometria controlada, sendo relevante para avaliar o efeito do passo, da compactação e da orientação dos filamentos no desempenho mecânico do reforço [11,22].

Charlebois. [22] destacam que a arquitetura trançada influencia parâmetros importantes para compósitos, como fração volumétrica de fibras, permeabilidade e resposta mecânica. A variação do ângulo de trançamento altera a organização dos filamentos e pode modificar tanto o comportamento durante a impregnação da matriz quanto as propriedades finais do compósito. Assim, além do tipo de fibra utilizada, a geometria da trança e o controle do processo de fabricação são fatores determinantes para o uso de cordões trançados como reforços estruturais.

Os resultados apresentados por Joy. [11] indicaram que os cordões trançados podem apresentar resistência e rigidez inferiores aos fios comerciais em determinadas configurações, mas oferecem vantagens relacionadas à organização estrutural, à distribuição de carga e à interação com a matriz. No caso do sisal, por exemplo, o fio comercial apresentou resistência de $199,19 \pm 31,75$ MPa, enquanto o cordão trançado de sisal apresentou $140,61 \pm 23,8$ MPa. Em relação ao módulo de elasticidade, o fio de sisal apresentou $7,54 \pm 0,82$ GPa, enquanto o cordão trançado de sisal apresentou $5,4 \pm 1,13$ GPa. Os autores associam a menor rigidez dos trançados à maior capacidade de rearranjo e deformação da estrutura antes de sua restrição pela geometria da trança.

Esse comportamento é coerente com a resposta observada em cordões trançados, nos quais parte da deformação medida durante o ensaio está associada não apenas ao alongamento axial das fibras, mas também à acomodação da estrutura, ao fechamento dos espaços entre filamentos e à redistribuição de esforços entre os fios. Assim, o módulo obtido para uma trança pode ser interpretado como módulo aparente, uma vez que representa simultaneamente a resposta do material e da arquitetura geométrica do cordão.

Outro ponto relevante apresentado por Joy. [11] é que, embora os trançados possam apresentar menores propriedades à tração em comparação a fios comerciais, eles podem favorecer a interação interfacial em compósitos. Os autores observaram, por meio de ensaios de arrancamento, que cordões trançados de sisal apresentaram maior resistência interfacial ao cisalhamento do que fios torcidos, devido à maior exposição das fibras à matriz e à melhor participação dos filamentos na transferência de carga. Esse resultado reforça o potencial de cordões trançados como reforços para compósitos, ainda que sua fabricação exija controle de geometria, passo, compactação e tensionamento.

Dessa forma, a literatura indica que o uso de cordões trançados de fibras naturais apresenta potencial para aplicações em materiais compósitos, mas seu desempenho depende fortemente da regularidade geométrica e do controle do processo de fabricação. Folgas locais, variações de passo, abertura entre filamentos e diferenças de tensão entre os fios podem alterar a distribuição de carga e aumentar a dispersão dos resultados mecânicos. Essa relação justifica o desenvolvimento de uma trançadeira voltada à produção controlada de tranças naturais, com foco em transmissão mecânica, redução de atrito e controle do tensionamento dos carretéis.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é projetar e otimizar uma máquina trançadeira para a produção de filamentos trançados, com implementação e validação de um sistema de tensionamento capaz de melhorar a qualidade geométrica e a estabilidade dimensional das tranças destinadas à aplicação em materiais compósitos.

1.3.1 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

1. Otimizar a estrutura mecânica da trançadeira, visando maior estabilidade operacional, redução de travamentos e melhor controle do tensionamento dos fios.
2. Realizar a análise mecânica dos fios de fibras naturais e das tranças produzidas, comparando corpos de prova de fio único e de trança de rami por meio de ensaios de tração.
3. Avaliar possíveis futuras aplicações das tranças como reforços fibrosos em materiais compósitos, considerando seu comportamento mecânico, sua regularidade geométrica e as limitações do processo de fabricação.

2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A fabricação dos componentes da trançadeira foi conduzida predominantemente por manufatura aditiva, em razão da necessidade de obtenção de geometrias específicas, rápida iteração de projeto e redução do tempo de fabricação de componentes não comerciais [14,15]. No contexto da modelagem por deposição de material fundido (FDM/FFF), a seleção do material polimérico exerce influência direta sobre a estabilidade dimensional, a qualidade superficial e o desempenho mecânico das peças produzidas, tornando-se um parâmetro relevante no desenvolvimento do equipamento. [14-16]

Entre os materiais termoplásticos comumente empregados em impressão 3D do tipo FDM/FFF, destacam-se o PLA (ácido polilático), o ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e o PETG (polietileno tereftalato modificado com glicol). O PLA apresenta ampla utilização em prototipagem devido à facilidade de processamento, à baixa tendência ao empenamento e à boa estabilidade dimensional [15]. O ABS, por sua vez, apresenta maior resistência térmica e maior tenacidade em determinadas aplicações, porém demanda maior controle das condições de impressão [14-16]. O PETG situa-se como alternativa intermediária, combinando boa processabilidade com desempenho mecânico e resistência ao impacto superiores ao PLA em algumas configurações de fabricação. [14-16]

Para a fabricação dos componentes impressos da trançadeira, optou-se pelo uso do PLA. Essa escolha foi motivada, nesta etapa do projeto, pela facilidade de impressão, pela repetibilidade geométrica das peças obtidas, pelo baixo custo relativo do material e pela sua ampla disponibilidade comercial, características adequadas ao desenvolvimento e à validação inicial do equipamento. Complementarmente, a base estrutural da trançadeira foi confeccionada em madeira compensada e MDF (Medium-Density Fiberboard), materiais selecionados em função do baixo custo, da facilidade de usinagem e da rigidez suficiente para a montagem e o suporte dos subconjuntos mecânicos.

Em relação ao material utilizado na produção dos corpos de prova, foi adotada a fibra natural de rami. O rami é uma fibra natural de origem vegetal extraída do caule da planta *Boehmeria nivea*, pertencente ao grupo das fibras lignocelulósicas. Essa fibra se destaca pelo elevado teor de celulose e pelas boas propriedades mecânicas específicas, sendo frequentemente citada como uma das fibras vegetais com maior potencial para aplicação como reforço em materiais compósitos.



Figura 1 – Fio Único de Rami

Para a produção dos corpos de prova trançados e realização dos ensaios mecânicos, foi selecionada a fibra natural de rami. Embora o projeto tenha considerado inicialmente a possibilidade de utilização de diferentes fibras naturais, como juta, sisal e rami, optou-se por concentrar a etapa experimental no rami em função de sua disponibilidade, de seu potencial de aplicação como reforço em materiais compósitos e das limitações de tempo para a realização dos ensaios. Além disso, durante os testes preliminares de operação da trançadeira, observou-se que os fiapos presentes na fibra de sisal interferiam no deslocamento dos carretéis, aumentando a ocorrência de embaraçamentos e travamentos no sistema. Dessa forma, a escolha do rami permitiu maior continuidade na fabricação dos corpos de prova e maior controle durante a etapa de validação experimental.

A fibra de rami também apresenta interesse técnico por se destacar entre as fibras naturais em termos de resistência e rigidez específicas [5], sendo considerada uma alternativa promissora para aplicações em compósitos estruturais leves [5,18]. Assim, ainda que a validação experimental tenha sido limitada a uma única fibra natural, a escolha do rami foi compatível com os objetivos do trabalho, permitindo avaliar o funcionamento da trançadeira e o comportamento mecânico de tranças produzidas a partir de uma fibra de elevado potencial estrutural [5,17,18].

Além da seleção do tipo de fibra, considerou-se também a variabilidade dimensional dos filamentos naturais utilizados. Por se tratarem de fibras de origem vegetal, juta, sisal e rami podem apresentar variações de diâmetro, textura superficial e regularidade ao longo do comprimento, fatores que influenciam diretamente o tensionamento, a formação da trança e a dispersão dos resultados mecânicos.

As propriedades mecânicas de referência da fibra de rami foram obtidas a partir da literatura especializada e utilizadas como base para a interpretação dos resultados experimentais. Além disso, foram realizados ensaios de tração em fios únicos de rami, permitindo a obtenção de uma referência experimental própria para comparação com os corpos de prova trançados. Dessa forma, foi possível avaliar não apenas o comportamento mecânico da fibra em sua condição individual, mas também a influência da arquitetura trançada sobre a rigidez, a deformabilidade e a tensão de ruptura aparente dos corpos de prova produzidos.

2.2 Métodos

O projeto consiste em uma trançadeira de bancada destinada à produção de filamentos trançados de fibras naturais, composta por um sistema de acionamento por motores de passo, transmissão por engrenagens, guiamento dos carretéis e recolhimento da trança formada. A metodologia adotada envolveu o desenvolvimento mecânico do equipamento, a fabricação dos componentes por impressão 3D, a montagem dos subconjuntos, a avaliação operacional dos modelos desenvolvidos e a realização de ensaios de tração em fios únicos e tranças de rami para análise do comportamento mecânico dos corpos de prova produzidos.

O desenvolvimento da trançadeira foi conduzido de forma iterativa, partindo da concepção e modelagem de um modelo inicial destinado à validação do princípio básico de funcionamento do equipamento. A partir da avaliação desse primeiro arranjo, foram identificadas limitações mecânicas, geométricas e operacionais que comprometeram a estabilidade do sistema e a uniformidade do processo de trançamento, tornando necessária a reformulação do projeto e a fabricação de uma versão aprimorada.

Para a modelagem tridimensional dos componentes e subconjuntos mecânicos, utilizou-se a plataforma CAD Onshape [13] e um CAM como fatiador para configuração e integração peça-impressora chamado Creality Print, empregada tanto na definição geométrica das peças quanto na revisão e atualização do projeto ao longo do desenvolvimento.

A fabricação dos componentes poliméricos foi realizada por manufatura aditiva em impressora 3D do tipo FDM, modelo Creality Ender 3 V3 SE, permitindo a prototipagem rápida e a implementação sucessiva das modificações necessárias ao refinamento da trançadeira. As subseções seguintes apresentam, de forma sequencial, o modelo inicial, a análise de seu desempenho e, por fim, a versão implementada com as melhorias de projeto adotadas.

A validação do modelo foi conduzida por meio de ensaios comparativos de tração em tracionadora hidráulica, utilizando corpos de prova produzidos a partir das tranças fabricadas pela máquina e de fios únicos de rami. Esses ensaios permitiram comparar parâmetros mecânicos como carga máxima, resistência à tração, alongamento e modo de ruptura, de forma a avaliar a influência das modificações implementadas no projeto sobre a homogeneidade e o desempenho mecânico das tranças obtidas.

2.3 Modelo inicial

O modelo inicial da trançadeira foi concebido com foco na validação do princípio básico de trançamento dos materiais, sem ainda contemplar critérios mais rigorosos relacionados à qualidade geométrica, à homogeneidade das tranças produzidas ou ao controle de tensão dos filamentos.

2.3.1 Detalhamento do modelo inicial

A Figura 1 apresenta a vista detalhada da estrutura em condição desmontada, ao passo que a Tabela 1 relaciona os componentes individuais com suas devidas explicações de funcionalidades assumidas no sistema.

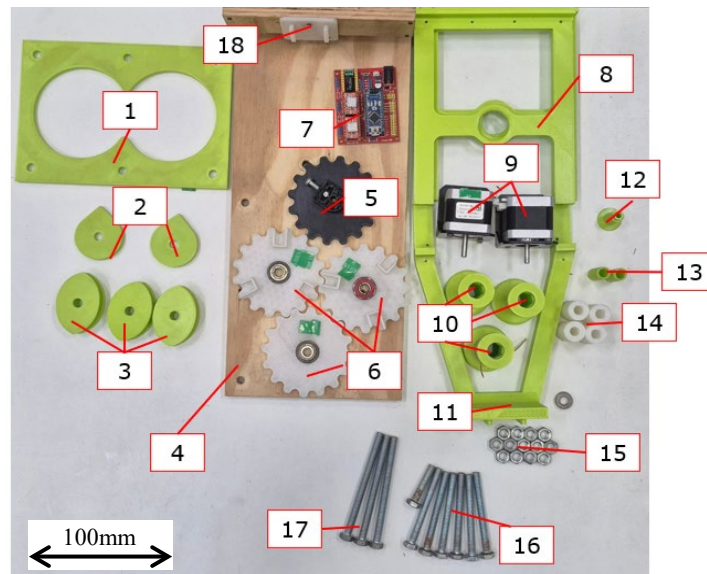


Figura 2 - Componentes do Modelo Inicial

A tabela abaixo nomeia e detalha os componentes ilustrados na figura acima:

Tabela 3 - Componentes da Versão Inicial da Trançadeira

Placa Guia	Atua como elemento de suporte e guia os carretéis ao longo de uma trajetória cíclica em formato de oito.
Guia Central	Atua em conjunto com a placa guia dos carretéis na definição da trajetória percorrida pelos carretéis. Enquanto a placa guia estabelece os limites externos do percurso, o guia central define seus limites internos.
Guia do Carretel	Componente acoplado aos parafusos dos carretéis, responsável por conduzi-los ao longo da placa guia e dos guias centrais.
Base de Madeira	Para a base do equipamento, utilizou-se uma placa de madeira na qual foram realizados furos para a fixação da estrutura por meio de parafusos.

Engrenagem do Motor	Engrenagem acoplada e fixada ao eixo do motor de passo principal, responsável por transmitir o movimento de base necessário ao processo de trançamento.
Engrenagem de movimento	Responsáveis pela transmissão do torque da engrenagem motora para os parafusos.
Placa de Circuito	O circuito do sistema foi montado com o emprego de dois drivers e uma placa Arduino Nano, de modo a permitir o controle da velocidade de ambos os motores de passo.
Base motor de Cima	Componente que constitui a estrutura de suporte do motor responsável pelo enrolamento das tranças.
Motor de Passo	Principal elemento de acionamento do sistema, responsável por movimentar as engrenagens de transmissão para a formação da trança e pelo enrolamento do filamento trançado.
Carretel Intercambiável	Componente feito para enrolar o fio da fibra, sendo intercambiável projetado para facilitar o carregamento e o descarregamento de fibras naturais destinadas ao processo de trançamento
Suporte Motor de Cima	Suporte para o motor de enrolamento, permitindo espaço adequado para o acúmulo dinâmico das fibras trançadas durante a operação.

Carretel da Trança	Componente sobre o qual as fibras trançadas são enroladas, montado diretamente no eixo superior
Espaçador Guia Central	Componente de ajuste de altura dos guias centrais.
Espaçador Placa Guia	Componente de ajuste de altura da placa guia dos carretéis.
Porcas	Porcas utilizadas para a fixação dos componentes impressos em 3D aos parafusos e à estrutura de suporte, conferindo rigidez mecânica ao conjunto.
Parafusos Estruturais	Parafusos utilizados para a fixação dos componentes impressos em 3D à base de madeira.
Parafusos dos Carretéis	Parafusos utilizados como eixo principal para a fixação dos guias dos carretéis e dos carretéis removíveis, atuando também como suporte estrutural para a transmissão do movimento das engrenagens de transmissão para os carretéis.
Encaixe Motor de Baixo	Na posterior da base, foi fixado um suporte de madeira destinado à montagem do motor principal, utilizando-se um suporte impresso em 3D na cor branca.

A imagem abaixo mostra a estrutura inicial da trançadeira montada e a comparação com o modelo 3D feito

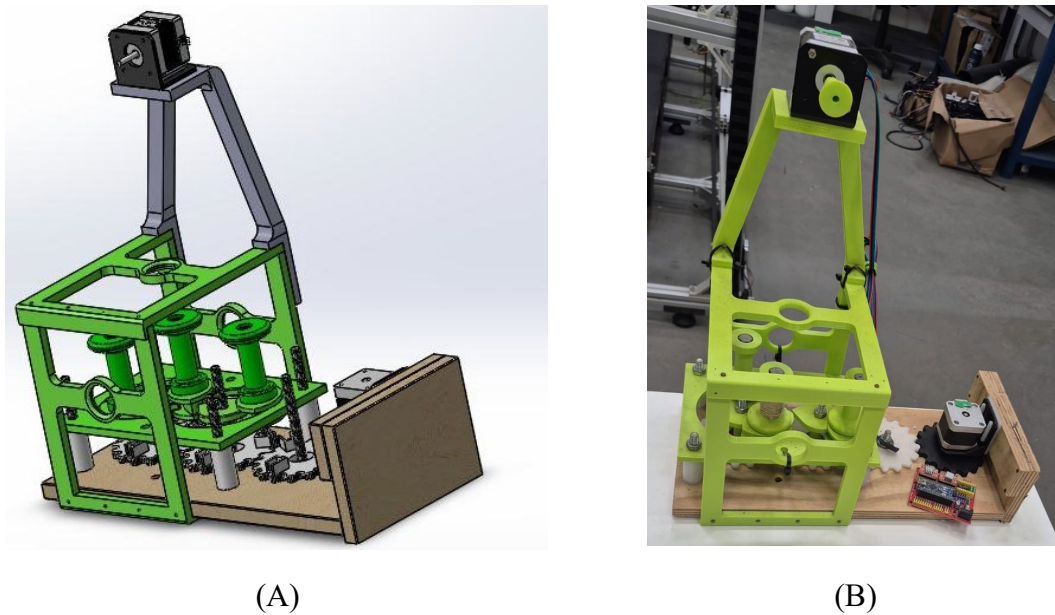


Figura 3 – Modelo 3D do Modelo Inicial: (A); Trançadeira na Sua Versão Inicial: (B)

2.3.2 Funcionamento mecânico dos principais componentes do modelo inicial

A partir da configuração montada do modelo inicial, observa-se que o funcionamento mecânico da trançadeira depende da interação entre os subsistemas de acionamento, transmissão, guiamento dos carretéis e recolhimento da trança. De forma geral, o movimento é fornecido pelos motores de passo, transmitido às engrenagens e, posteriormente, aos carretéis, que percorrem uma trajetória cíclica em formato de oito, definida geometricamente pela placa guia e pelo guia central. À medida que os carretéis se deslocam ao longo desse percurso, os filamentos são entrelaçados até convergirem para a região de formação da trança, sendo posteriormente recolhidos no carretel superior.

2.3.2.1 Subsistema de acionamento e controle.

No subsistema de acionamento, foram empregados dois motores de passo do tipo NEMA 17, da marca Busheng, ambos com a mesma especificação nominal, sendo um responsável pela movimentação principal do sistema de trançamento e o outro pelo enrolamento da trança produzida. O controle desses motores foi realizado por meio de uma placa eletrônica baseada em Arduino Nano associada a uma placa controladora com dois drivers de modelo A4988 para motores de passo.

Este conjunto eletrônico está explicitamente representado na Figura 3. Apesar de no modelo inicial só terem sido usados 2 drivers, um para cada motor, ele constitui parte fundamental do sistema, uma vez que permite o acionamento independente dos motores e o ajuste da velocidade de operação de cada um deles, possibilitando a sincronização entre o movimento de trançamento e o recolhimento do filamento formado.

A alimentação elétrica do sistema foi realizada por meio de fonte externa de 12V compatível com os requisitos dos motores de passo e dos drivers utilizados, enquanto a comunicação e programação do Arduino Nano foram realizadas via conexão USB utilizando o programa padrão para programação de arduino, o Arduino IDE. Os cabos de ligação entre drivers e motores foram organizados de modo a permitir o acionamento independente de cada motor, reduzindo interferências mecânicas com os componentes móveis da trançadeira.

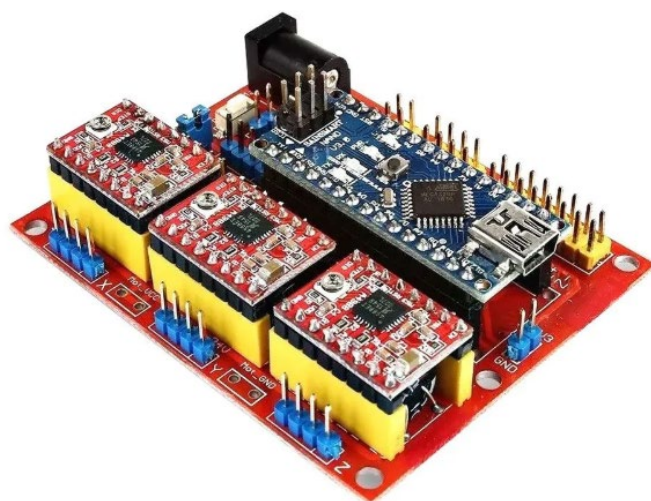


Figura 4 - Conjunto Eletrônica Arduino Nano Drivers

2.3.2.2 Subsistema de transmissão e guiamento

O subsistema de transmissão mecânica foi concebido para transferir o movimento rotacional do motor principal aos carretéis por meio de um conjunto de engrenagens coplanares. No modelo inicial, as engrenagens principais apresentavam, em sua maior parte, dimensões equivalentes, diferenciando-se apenas a engrenagem fixada ao eixo do motor, a qual possuía um alojamento específico para porca e parafuso na horizontal, com o objetivo de assegurar sua fixação ao eixo.

Entre a engrenagem motora e a engrenagem associada ao carretel foi inserida uma engrenagem de transição, cuja função principal consistia em promover o espaçamento necessário entre o motor de passo e o restante do sistema. Essa solução foi necessária porque a transmissão direta entre a engrenagem do motor e a engrenagem do carretel não forneceria espaço geométrico suficiente para a acomodação dos componentes e para a livre movimentação do conjunto.

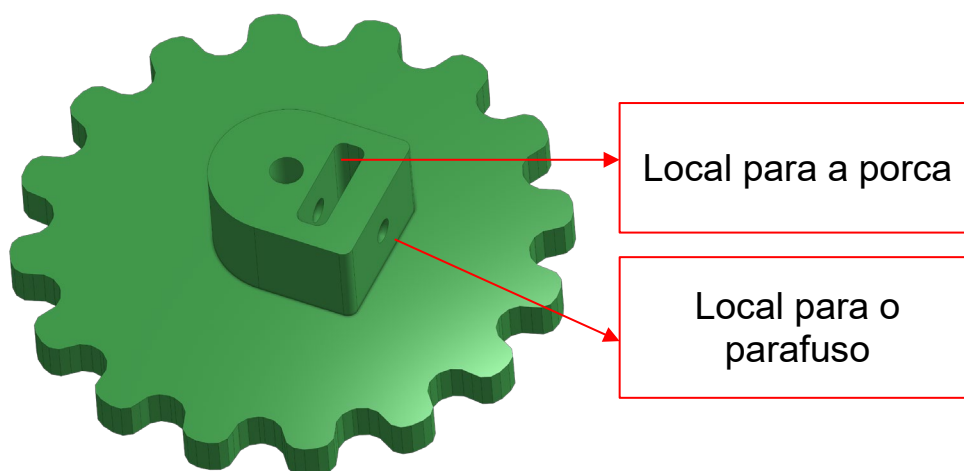


Figura 5 - Engrenagem dos Carretéis com Canaletas

A engrenagem de movimento, por sua vez, desempenha papel duplo no sistema, uma vez que atua simultaneamente como elemento de transmissão de movimento e como componente de guiamento. Para isso, foram incorporadas canaletas em sua superfície, posicionadas ao longo de uma linha central correspondente à região de passagem permitida aos carretéis no interior do percurso.

Essas canaletas, que podem ser vistas com mais clareza na Figura 5, foram projetadas para acomodar a extremidade do parafuso responsável por sustentar o carretel, permitindo que esse elemento acompanhe o deslocamento entre engrenagens adjacentes com continuidade geométrica. A concatenação dessas canaletas ao longo do conjunto é o que possibilita a formação do movimento cíclico em formato de oito, essencial para o entrelaçamento das fibras durante o processo de trançamento.

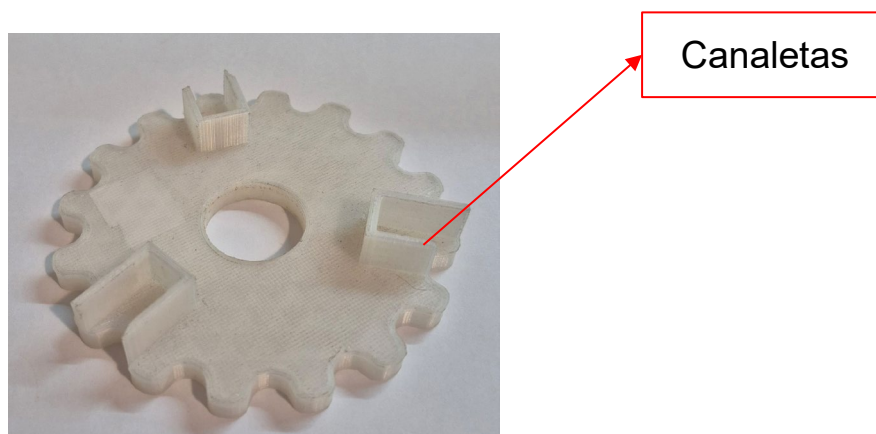


Figura 6 - Engrenagem dos Carreais com Canaletas

O sistema de guiamento é constituído principalmente pela placa guia, pelo guia central e pelos guias dos carreais. A placa guia foi modelada com o objetivo de acomodar e restringir o caminho imposto pelas engrenagens, sendo sua geometria definida a partir da sobreposição parcial das circunferências externas das engrenagens adjacentes. Essa configuração permite o engrenamento entre os dentes e, simultaneamente, assegura a continuidade do trajeto percorrido pelos carreais.

Para reduzir barreiras físicas durante a transição entre regiões consecutivas do percurso, foi adicionado um filete na extremidade da região central da placa guia, aumentando a folga local e facilitando a passagem dos carreais entre uma engrenagem e outra. Em conjunto com a placa guia, o guia central delimita internamente a trajetória, enquanto os guias dos carreais, acoplados aos respectivos parafusos de suporte, conduzem mecanicamente o movimento ao longo do percurso estabelecido. O percurso pode ser visto na Figura 6.

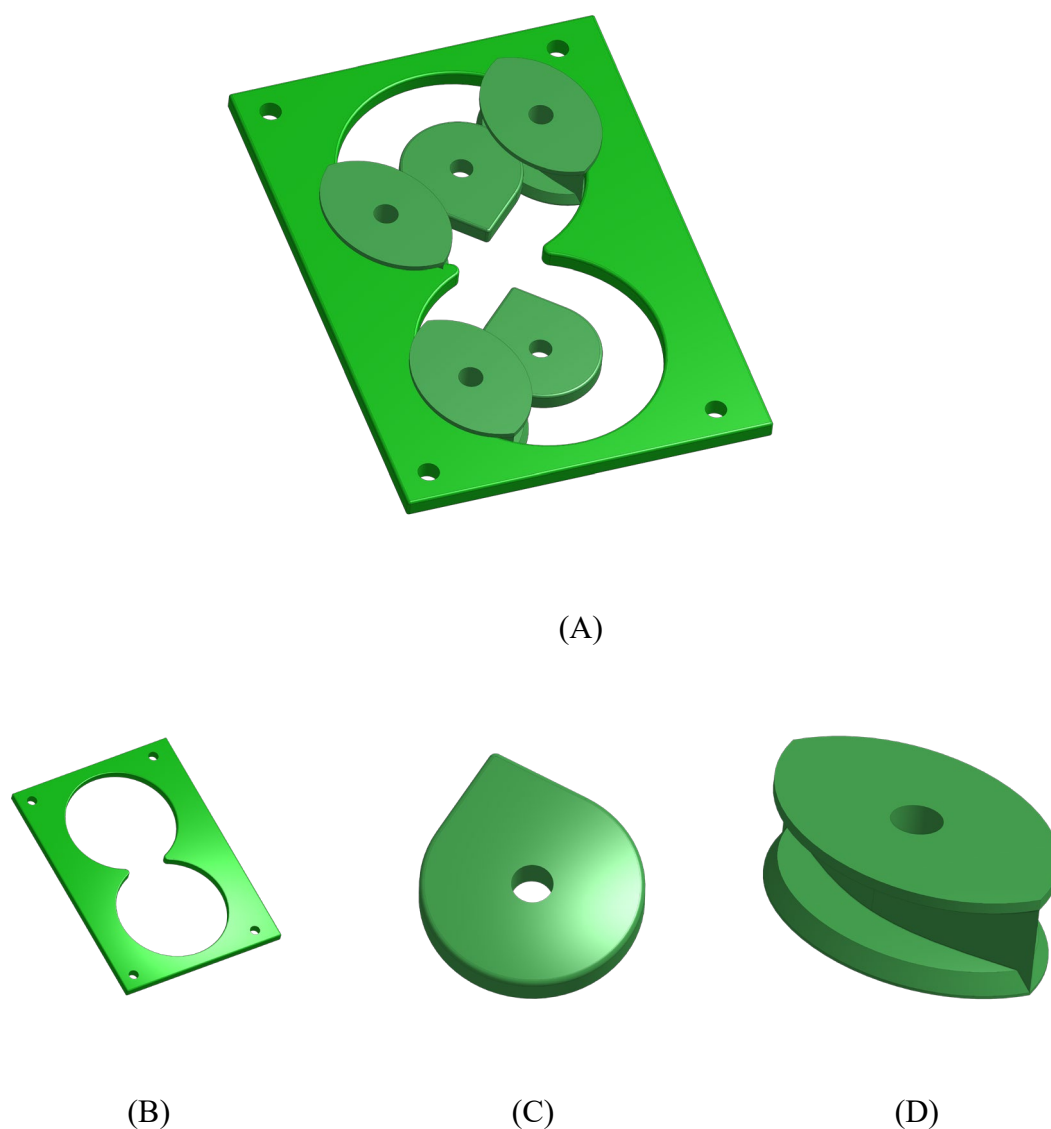


Figura 7 – Esquema Geral do Percurso: (A); Placa Guia: (B); Guia Central: (C); Guia Carretel: (D)

2.3.2.3 Subsistema de alimentação de fibra

O subsistema de suporte dos carretéis foi projetado de forma a permitir a fixação e a substituição dos carretéis removíveis, possibilitando o carregamento de diferentes fibras naturais para o processo de trançamento. Os parafusos dos carretéis atuam como eixos principais desses componentes, servindo simultaneamente como elemento estrutural de suporte e como interface mecânica entre o sistema de engrenagens e o deslocamento dos carretéis.

Essa configuração permitiu integrar, em um mesmo componente, a sustentação física do carretel e a transmissão do movimento necessário para sua circulação ao longo da trajetória definida no equipamento. A mesma pode ser observada na Figura 7.



Figura 8 - Carretel Desacoplável

Por fim, buscando reduzir perdas por atrito e minimizar o esforço mecânico exigido para a rotação das engrenagens e o deslocamento dos carretéis, todas as peças submetidas a contato relativo mais intenso, em especial os guias dos carretéis, a placa guia e o guia central, foram submetidas a lixamento superficial e lubrificação a base de pó de grafite. Esse procedimento teve como finalidade reduzir irregularidades oriundas do processo de fabricação, melhorar o acabamento de contato entre superfícies e favorecer o movimento contínuo dos componentes móveis ao longo do percurso.

2.4 Análise do desempenho do modelo inicial

A operação do modelo inicial permitiu avaliar o comportamento global da trançadeira e identificar limitações mecânicas, geométricas e construtivas que comprometeram a estabilidade operacional do sistema e a uniformidade das tranças produzidas. Embora o protótipo tenha sido suficiente para validar o princípio básico de funcionamento do equipamento, seu desempenho mostrou-se insuficiente em aspectos fundamentais para a obtenção de um processo mais estável, reprodutível e mecanicamente robusto.

Uma das principais limitações observadas no modelo inicial foi a instabilidade estrutural do conjunto. Em razão da geometria adotada e da distribuição dos componentes na estrutura, principalmente com alturas diferentes, o sistema apresentou sensibilidade a vibrações e deslocamentos indesejados durante a operação, especialmente em regiões submetidas à transmissão contínua de movimento, como no caminho em formato de 8. Tal comportamento comprometeu a precisão do guiamento dos carretéis e dificultou a manutenção de uma movimentação uniforme ao longo do percurso estabelecido.

No subsistema de transmissão, como o diâmetro de todas as engrenagens adotadas era igual, verificou-se que a configuração adotada não fornecia condições ideais de operação no que se refere à relação entre velocidade e torque disponíveis. A ausência de uma estratégia de redução mecânica mais adequada tornava o sistema mais suscetível a travamentos e perdas de continuidade no movimento, principalmente diante de pequenas imperfeições de fabricação, desalinhamentos entre componentes e resistências adicionais causadas pelo atrito entre superfícies móveis. Em consequência, o conjunto apresentou baixa tolerância a variações construtivas e limitada robustez operacional.

Outro aspecto relevante foi a falta de padronização geométrica entre as engrenagens utilizadas no modelo inicial. Essa condição dificultou tanto a modelagem, impactando a fabricação e modificação do projeto, quanto a montagem e a substituição dos componentes, além de tornar o projeto menos previsível do ponto de vista mecânico. A ausência de uniformidade dimensional também impunha restrições ao ajuste fino do sistema, dificultando intervenções voltadas à melhoria da transmissão do movimento e da confiabilidade do conjunto.

Do ponto de vista da formação da trança, verificou-se que o modelo inicial não era capaz de assegurar homogeneidade geométrica satisfatória ao longo do produto gerado. Durante a operação, os filamentos apresentavam variações significativas de tensão, o que resultava em regiões alternadas de maior compactação e de maior folga. Essa oscilação comprometeu a regularidade do trançamento, afetando diretamente a repetibilidade do processo e a qualidade final das tranças produzidas. Essa irregularidade pode ser observada na figura abaixo, onde foram feitos 3 corpos de prova de mesmo material para serem comparados entre si.

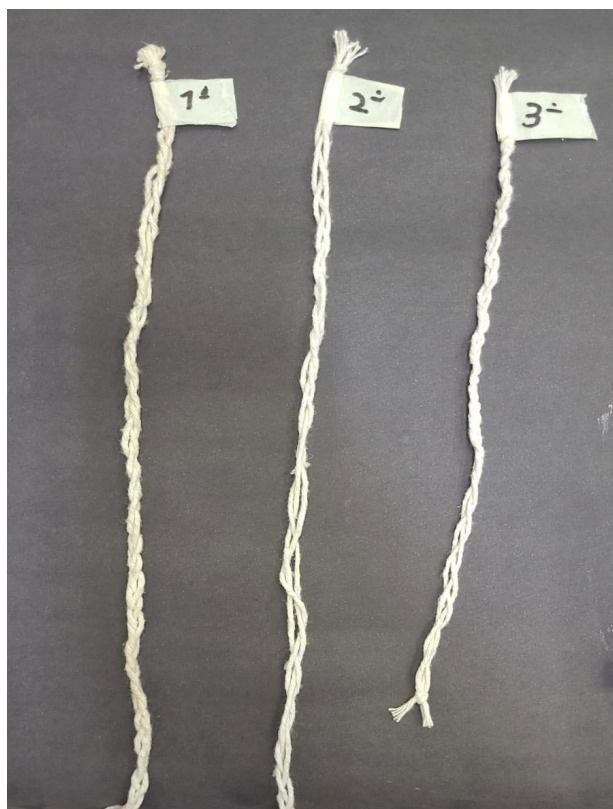


Figura 9 - Corpos de Prova Modelo Inicial

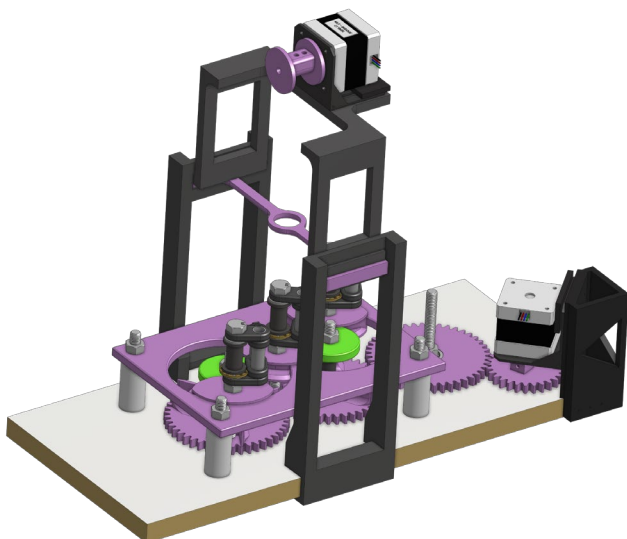
A configuração estrutural da torre superior também se mostrou desfavorável ao desempenho global da máquina. A altura excessiva do conjunto aumentava sua esbeltez e, conseqüentemente, sua suscetibilidade a vibrações e oscilações durante a operação. Esse comportamento reduziu a estabilidade do sistema superior de recolhimento e introduziu maior sensibilidade a desalinhamentos mecânicos, tornando a operação mais crítica do ponto de vista estrutural.

Além disso, observou-se que, em determinados instantes do percurso, os filamentos fibrosos apresentavam simultaneamente trechos frouxos e trechos excessivamente tensionados. Esse comportamento estava associado à variação do comprimento livre dos fios ao longo da trajetória em formato de oito e à inexistência, no modelo inicial, de um mecanismo específico para compensação de folga e controle de tensão. Como resultado, o processo de entrelaçamento das fibras ocorria com baixa uniformidade, comprometendo a qualidade geométrica das tranças formadas.

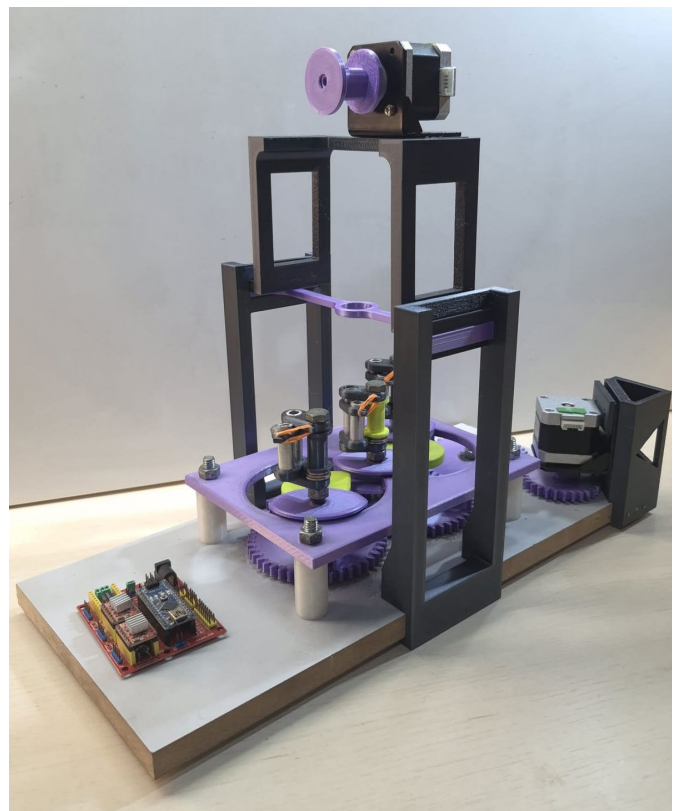
A análise do desempenho do modelo inicial evidenciou que, embora o protótipo tenha sido suficiente para validar o princípio básico de funcionamento da trançadeira, sua configuração ainda apresentou limitações importantes do ponto de vista estrutural, cinemático e operacional. Tais observações forneceram a base técnica para a reformulação do projeto, orientando a adoção de modificações voltadas à melhoria da estabilidade do sistema, ao aumento da confiabilidade mecânica e ao aperfeiçoamento do controle de tensão dos filamentos. A seção seguinte apresenta, portanto, a nova versão da trançadeira e as principais soluções implementadas em resposta às limitações anteriormente identificadas.

2.5 Modelo final

Com base nas limitações identificadas no modelo inicial, foi desenvolvida uma nova versão da trançadeira, concebida com foco no aumento da robustez mecânica, na melhoria da estabilidade estrutural e na maior uniformidade do processo de trançamento. As modificações implementadas concentraram-se principalmente no redimensionamento do sistema de transmissão, na reformulação do sistema de tensionamento e na revisão de aspectos geométricos e construtivos do equipamento, com o objetivo de reduzir a suscetibilidade a travamentos, minimizar oscilações de tensão nos filamentos e tornar a operação mais estável e reprodutível.



(A)



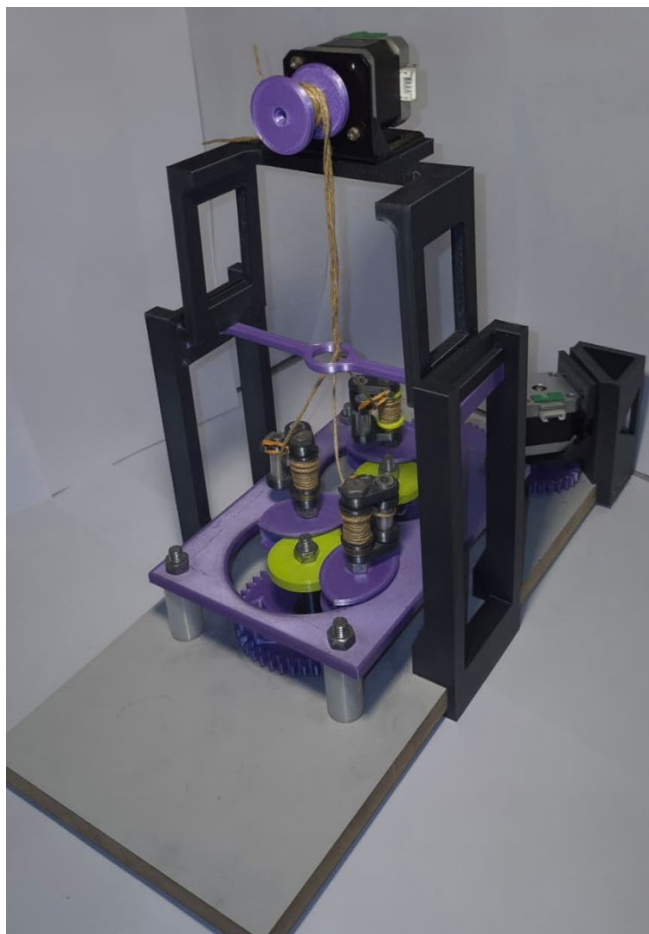
(B)

Figura 10 - Modelo 3D do Modelo Final: (A); Trançadeira na Sua Versão Final: (B)

2.5.1 Melhorias implementadas no modelo final

As melhorias implementadas no novo modelo da trançadeira foram definidas a partir da análise crítica do desempenho do modelo inicial, cujas limitações estavam associadas principalmente à instabilidade estrutural, à baixa robustez do sistema de transmissão, à variação de tensão nos filamentos e à ocorrência de travamentos durante a operação.

Nesse sentido, o projeto foi reformulado com foco no aumento da confiabilidade mecânica e na obtenção de um processo de trançamento mais uniforme e reprodutível. Entre as principais alterações, destacam-se a adoção de uma relação de redução na engrenagem motora, visando à diminuição da velocidade angular e ao aumento do torque disponível; a melhoria do design dos componentes impressos em 3D para aumentar a rigidez e a robustez do conjunto; a utilização de engrenagens com padrão métrico padronizado; a redução da altura da torre e a otimização do espaço ocupado pela estrutura; a aplicação de lubrificante à base de pó de grafite nas superfícies de contato; e a implementação de um sistema de tensionamento destinado a controlar a tensão dos fios provenientes dos carretéis.



(A)



(B)

Figura 11 – Modelo Final Carregado Vista Isométrica: (A); Modelo Final Carregado Vista Frontal: (B)

A Figura acima apresenta o modelo final da trançadeira em condição montada e carregada para operação. Observa-se que os fios de rami são armazenados nos carretéis inferiores, os quais percorrem a trajetória definida pelo sistema de engrenagens e guias. Durante o funcionamento, os fios passam pelos tensionadores acoplados aos carretéis e são direcionados para a região central de formação da trança, onde ocorre o entrelaçamento gerado pelo movimento coordenado das engrenagens. Após a formação do filamento trançado, o material é conduzido ao sistema superior de recolhimento, sendo enrolado pelo motor posicionado na parte superior da estrutura. Essa configuração integra os subsistemas de alimentação, tensionamento, trançamento e recolhimento em um único conjunto operacional.

2.5.1.1 Redimensionamento do sistema de transmissão

Uma das principais modificações implementadas no novo modelo da trançadeira foi o redimensionamento do sistema de transmissão por engrenagens, com o objetivo de aumentar a robustez mecânica do conjunto e reduzir a ocorrência de travamentos durante a operação. O sistema foi concebido com quatro engrenagens principais: duas engrenagens responsáveis pela movimentação dos carretéis ao longo da trajetória em formato de oito, uma engrenagem intermediária destinada ao espaçamento entre o motor e o conjunto de transmissão, e uma engrenagem motora acoplada diretamente ao eixo do motor de passo.

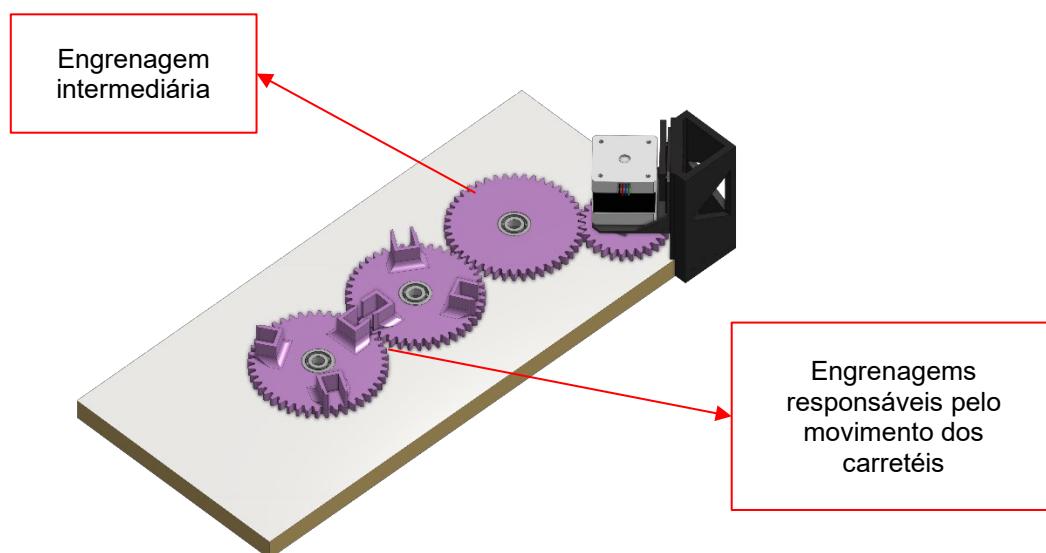


Figura 12 – Sistema de Transmissão

As engrenagens responsáveis pelo deslocamento dos carretéis foram padronizadas com diâmetro de 92 mm e mantiveram o sistema de canaletas utilizado no modelo inicial. Essas canaletas foram incorporadas ao corpo das engrenagens com a finalidade de acomodar a extremidade dos parafusos que sustentam os carretéis, permitindo a continuidade do movimento entre engrenagens adjacentes e possibilitando a formação da trajetória cíclica em formato de oito. Dessa forma, essas engrenagens atuam simultaneamente como elementos de transmissão de movimento e como componentes auxiliares do guiamento mecânico dos carretéis.

Entre a engrenagem acoplada ao motor e as engrenagens responsáveis pelo movimento dos carretéis, foi mantida uma engrenagem intermediária também com diâmetro de 92 mm, porém sem canaletas. A função dessa engrenagem não é alterar a relação final de transmissão, mas sim garantir o espaçamento físico necessário entre o motor de passo e o conjunto de engrenagens principais, evitando interferências geométricas entre o motor, a estrutura e os elementos móveis da trançadeira. Além disso, a utilização de engrenagens com padrão métrico padronizado contribui para maior previsibilidade no engrenamento, facilita a modelagem paramétrica e melhora a reprodutibilidade da fabricação dos componentes.

Para a engrenagem motora, optou-se pela utilização de uma engrenagem de menor diâmetro, com 60 mm, correspondente a aproximadamente dois terços do diâmetro das engrenagens acionadas. Essa alteração foi adotada com o objetivo de estabelecer uma relação de redução entre o motor e o sistema movido. Considerando, de forma aproximada, os diâmetros das engrenagens como proporcionais aos seus diâmetros primitivos, a relação de transmissão pode ser estimada por:

$$i = \frac{D_{\text{movida}}}{D_{\text{mot}}}$$

Substituindo-se os valores adotados no projeto:

$$i = \frac{92}{60} \approx 1,53$$

Assim, a velocidade angular transmitida às engrenagens movidas é reduzida em relação à velocidade angular do motor, enquanto o torque disponível na saída é aumentado na mesma proporção, desconsiderando perdas por atrito e ineficiências do sistema. De forma aproximada, pode-se escrever:

$$\omega_{\text{saida}} = \frac{\omega_{\text{motor}}}{i}$$

e

$$T_{\text{saida}} \approx i \cdot T_{\text{motor}}$$

Dessa forma, a relação de transmissão adotada resulta em uma redução de velocidade de aproximadamente 35% e em um aumento teórico de torque de aproximadamente 53%, desconsiderando perdas. Essa configuração foi escolhida para tornar o sistema menos suscetível a travamentos ocasionados por imperfeições de fabricação, desalinhamentos entre componentes, atrito nas superfícies de contato e variações geométricas inerentes ao processo de impressão 3D, mas principalmente menos suscetível a travamentos por tensão excessiva no carretel.

No novo arranjo, as três engrenagens de 92 mm foram posicionadas de forma alinhada na região central da chapa de madeira, enquanto a engrenagem motora de 60 mm foi posicionada em direção a uma das bordas da estrutura. Essa configuração permitiu otimizar o espaço ocupado pelo sistema de transmissão, reduzir interferências entre o motor e os demais componentes e tornar o conjunto mais compacto em comparação ao modelo inicial. Além disso, a reorganização geométrica das engrenagens contribuiu para melhorar a distribuição dos componentes sobre a base e facilitar a integração com os demais subsistemas da trançadeira.

No centro de cada engrenagem, foi mantido o uso de rolamentos de esferas com diâmetro externo de 12 mm e diâmetro interno de 8 mm, permitindo a passagem de parafusos sextavados de 8 mm utilizados como eixos de sustentação e rotação. A utilização desses rolamentos tem como objetivo reduzir o atrito entre os elementos rotativos e seus respectivos eixos, melhorar a suavidade do movimento e diminuir o esforço mecânico necessário para o acionamento do sistema. Dessa forma, o redimensionamento da transmissão não se limitou à alteração da relação entre engrenagens, mas também envolveu a padronização dos componentes, a reorganização espacial do conjunto e a melhoria das condições de rotação e suporte mecânico.

2.5.1.2 Padronização e otimização das engrenagens

A padronização das engrenagens foi uma das melhorias implementadas no modelo final com o objetivo de aumentar a previsibilidade mecânica, facilitar a montagem e melhorar a reprodutibilidade do projeto. No modelo inicial, a ausência de um padrão geométrico bem definido entre as engrenagens dificultava a modelagem, a fabricação e eventuais ajustes no sistema de transmissão. Além disso, pequenas diferenças dimensionais entre componentes impressos contribuíam para folgas excessivas, desalinhamentos e maior suscetibilidade a travamentos durante a operação.

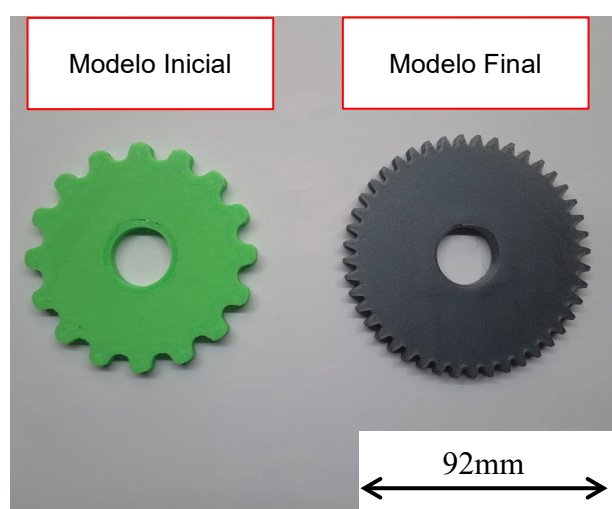


Figura 13 – Padronização das Engrenagens

No modelo final, optou-se pela utilização de engrenagens com padrão métrico padronizado, permitindo maior controle sobre o engrenamento, o espaçamento entre eixos e a compatibilidade entre os componentes. As engrenagens responsáveis pelo movimento dos carretéis foram mantidas com diâmetro de 92 mm e receberam canaletas para permitir a passagem dos parafusos dos carretéis ao longo da trajetória em formato de oito. Já a engrenagem intermediária foi mantida com o mesmo diâmetro, porém sem canaletas, atuando apenas como elemento de transmissão e espaçamento entre o motor e o conjunto principal.

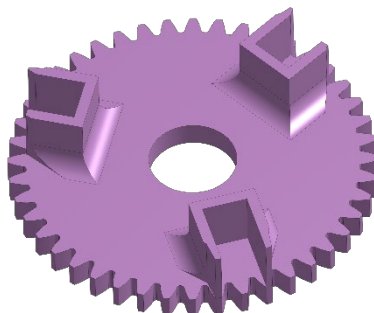


Figura 14 – Engrenagem Padronizada com Canaleta

A adoção de um padrão único para as engrenagens principais também facilitou o alinhamento do conjunto sobre a base de madeira, reduzindo interferências geométricas e simplificando a montagem. Essa padronização contribuiu para tornar o sistema mais adequado a futuras modificações ou substituições de componentes. Dessa forma, a otimização das engrenagens não esteve associada apenas ao desempenho da transmissão, mas também à melhoria da fabricação, manutenção e repetibilidade do equipamento.

2.5.1.3 Melhorias estruturais e geométricas

As melhorias estruturais e geométricas implementadas no modelo final tiveram como objetivo aumentar a rigidez do conjunto, reduzir vibrações durante a operação e tornar a montagem da trançadeira mais compacta e estável. No modelo inicial, a distribuição dos componentes e a elevada altura da estrutura superior contribuíam para maior suscetibilidade a oscilações, principalmente durante o acionamento dos motores e a movimentação dos carretéis ao longo da trajetória em formato de oito.

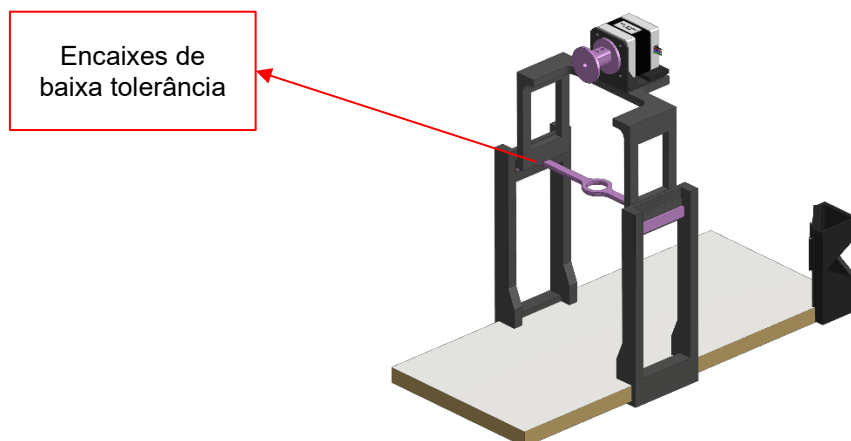


Figura 15 – Componentes Estruturais Modelo Final

No modelo final, a geometria da estrutura foi reformulada para reduzir a altura da torre responsável pelo suporte do motor de enrolamento da trança, diminuindo a esbeltez do conjunto e aumentando sua estabilidade durante o funcionamento. Além disso, os componentes impressos em 3D foram redesenhados com maior robustez local, incluindo regiões de apoio e fixação mais rígidas, de modo a reduzir deformações indesejadas e desalinhamentos entre os subconjuntos mecânicos.

Também foram incorporados mais pontos de encaixe e fixação entre os componentes, facilitando a montagem, a manutenção e o posicionamento relativo das peças. Essa estratégia contribuiu para tornar o equipamento mais previsível do ponto de vista construtivo. A reorganização espacial dos subconjuntos também permitiu melhor aproveitamento da área disponível na base, tornando a trançadeira mais compacta e facilitando a realimentação das fibras na máquina.

Dessa forma, as alterações estruturais e geométricas do modelo final buscaram não apenas aumentar a resistência mecânica dos componentes, mas também melhorar a montagem da máquina como um todo, a fim de integrar os sistemas e facilitar o manuseio dela.

2.5.1.4 Sistema de tensionamento dos carretéis

A implementação do sistema de tensionamento dos carretéis foi uma das principais modificações propostas para o modelo final da trançadeira. A necessidade desse sistema surgiu a partir da análise do modelo inicial, no qual foram observadas variações significativas de tensão nos filamentos ao longo do percurso em formato de oito. Em determinados instantes, alguns fios apresentavam folga excessiva, enquanto outros permaneciam mais tensionados, comprometendo a regularidade geométrica da trança e a repetibilidade do processo de fabricação.

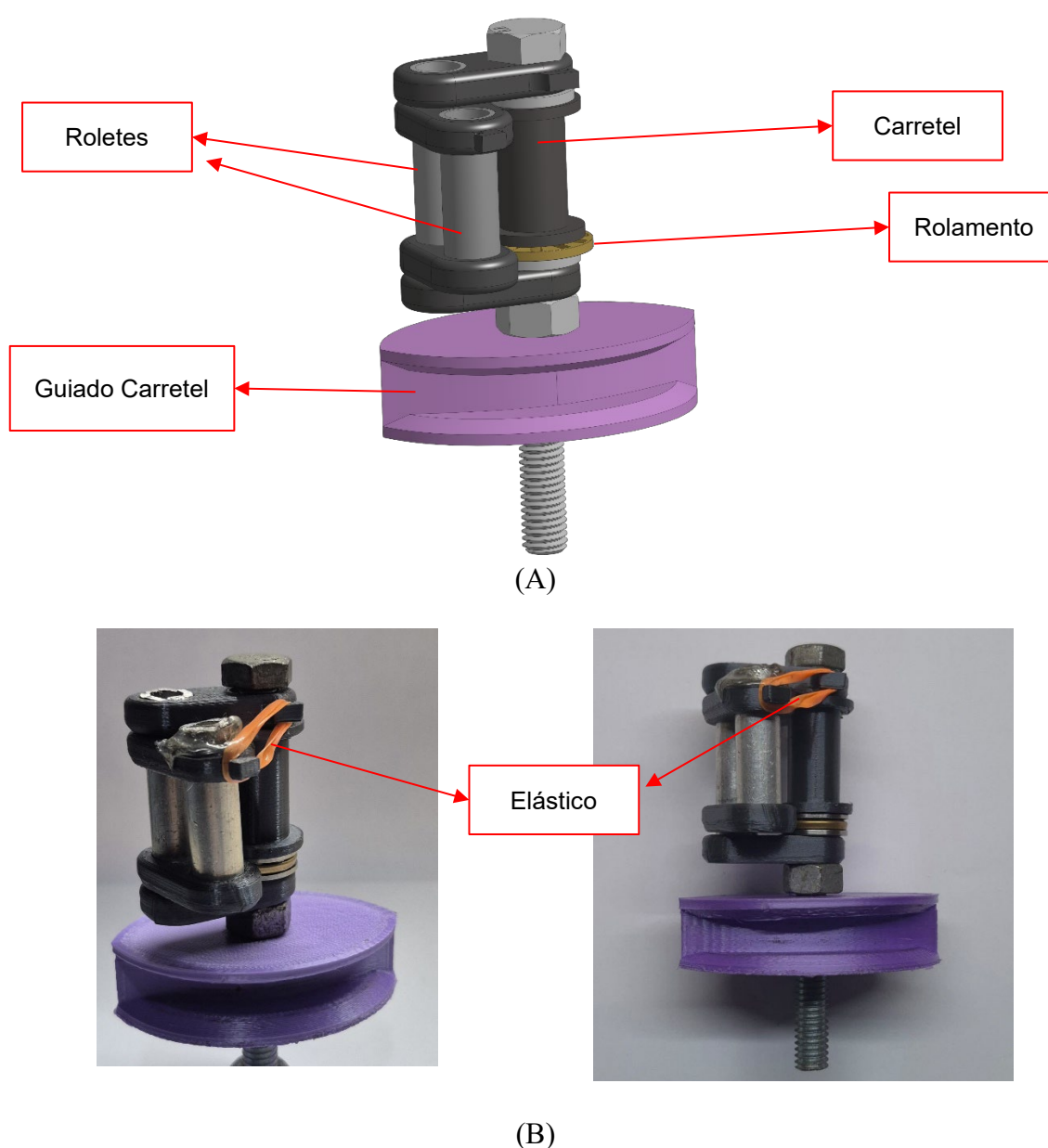
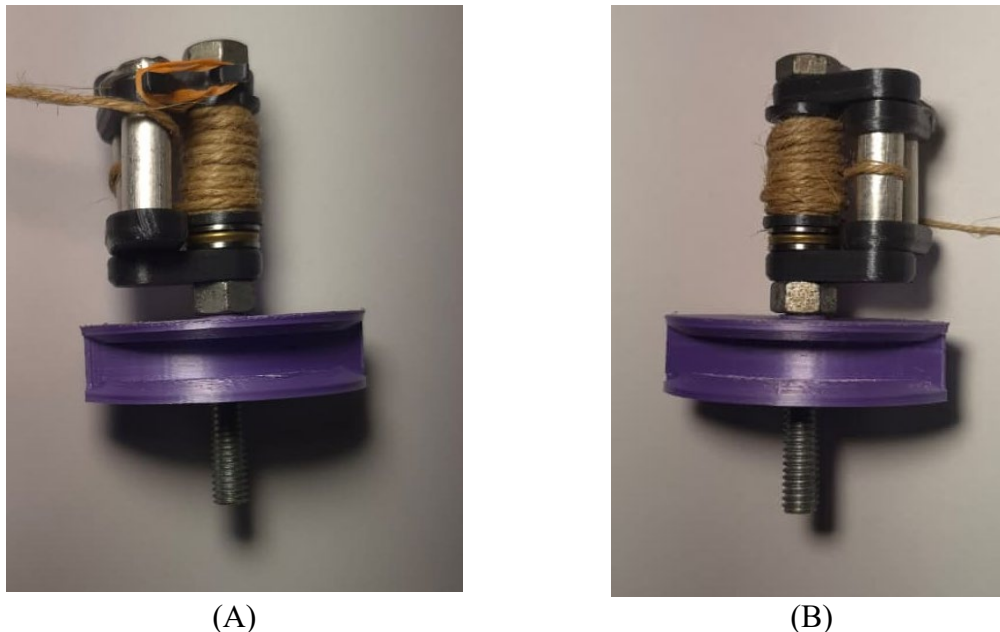


Figura 16 – Modelo 3D Sistema de Tensionamento: (A); Versão Final do Sistema de Tensionamento: (B)

O sistema foi concebido com o objetivo de atuar como mecanismo de compensação de folga, e não como fonte principal de tração do fio. Para isso, foi desenvolvido um conjunto composto por braço móvel, rolete e um elástico, responsável por permitir pequenos deslocamentos do fio durante o processo de trançamento. A proposta era que, quando houvesse variação no comprimento livre do filamento, o braço tensionador se deslocasse, absorvendo parte dessa folga ou compensando a tensão excessiva e contribuindo para manter a tensão mais uniforme ao longo do percurso dos carretéis.

A escolha por elementos elastoméricos, em vez de molas metálicas, foi motivada pela necessidade de aplicação de forças restauradoras moderadas. Como o mecanismo deveria ser acionado por esforços relativamente baixos, resultantes do atrito no carretel e da própria tensão desenvolvida durante o trançamento, optou-se por uma solução mais flexível, de menor custo e de fácil ajuste experimental.

Idealmente, o funcionamento do sistema dependeria da passagem adequada do fio pelo rolete, gerando uma componente de força capaz de deslocar o braço móvel e deformar o elemento elastomérico. Esse deslocamento permitiria ao mecanismo acompanhar variações locais de tensão e reduzir a formação de trechos frouxos na trança. Assim, o sistema de tensionamento foi projetado para melhorar a estabilidade do processo e contribuir para a produção de tranças mais homogêneas.



(A) (B)
Figura 17 – Tensionador Carregado Vista Direita: (A); Tensionador Carregado Vista Esquerda: (B)

Entretanto, durante a avaliação prática do modelo final, verificou-se que a configuração geométrica implementada não permitiu o acionamento adequado do tensionador. Como a fibra exercia força predominantemente no sentido vertical, a orientação adotada para os roletes não gerava a angulação necessária para deslocar o braço móvel de forma eficiente. Em vez de acionar o mecanismo conforme previsto, o fio tendia a interferir com o elástico, ocasionando embaraçamento e travamentos locais. Portanto, embora o princípio de compensação de folga seja mecanicamente válido, a implementação geométrica do sistema precisa ser reformulada, especialmente no que se refere à orientação dos roletes e ao caminho percorrido pelo filamento.

2.5.1.5 Redução de atrito e acabamento das superfícies

A redução de atrito entre os componentes móveis foi uma das medidas adotadas no modelo final para melhorar a continuidade do movimento dos carretéis e diminuir a ocorrência de travamentos durante a operação. Como grande parte dos componentes foi fabricada por impressão 3D, as superfícies resultantes apresentavam rugosidade característica do processo de deposição por camadas, o que poderia aumentar a resistência ao deslizamento em regiões de contato relativo, como por exemplo entre a placa guia e o guia dos carretéis, aumentando a possibilidade de travamento uma vez que demanda mais esforço do motor.

As principais regiões críticas de atrito estavam associadas ao contato entre os guias dos carretéis, a placa guia, os guias centrais e as canaletas das engrenagens. Nessas regiões, pequenas irregularidades superficiais ou desalinhamentos poderiam elevar o esforço necessário para movimentar os carretéis ao longo da trajetória em formato de oito. Esse aumento de resistência ao movimento contribui para maior solicitação do sistema de transmissão, podendo gerar perdas de continuidade, travamentos localizados e variações indesejadas na tensão dos fios.

Para minimizar esses efeitos, as superfícies de contato mais relevantes foram submetidas a lixamento superficial, com o objetivo de reduzir rebarbas, irregularidades geométricas e marcas do processo de fabricação. Além disso, foi aplicado lubrificante à base de pó de grafite nas regiões sujeitas a deslizamento, visando diminuir o atrito entre os componentes, sem a necessidade de utilização de lubrificantes líquidos. A escolha do grafite em pó foi motivada pela sua facilidade de aplicação, baixo custo e, apesar da falta de precisão em relação a sua aplicação, apresentou uma boa aderência nas superfícies da trançadeira.

Apesar dessas melhorias, a redução de atrito permaneceu como um ponto sensível do projeto. O excesso de atrito pode dificultar a movimentação dos carretéis e aumentar a probabilidade de travamentos, enquanto atrito insuficiente em determinadas regiões pode prejudicar o controle passivo da tensão dos fios. Dessa forma, o acabamento superficial e a lubrificação dos componentes devem ser considerados parâmetros importantes para a estabilidade operacional da trançadeira e para a reprodutibilidade do processo de trançamento.

2.5.2 Limitações de projeto

Embora o modelo final tenha apresentado avanços em relação ao modelo inicial, algumas limitações de projeto ainda foram observadas durante a fabricação, montagem e operação da trançadeira. Essas limitações estão associadas às tolerâncias de fabricação das peças impressas, ao atrito entre componentes móveis e à configuração geométrica do mecanismo de tensionamento.

Uma das principais limitações observadas foi a sensibilidade do sistema às tolerâncias dimensionais dos componentes fabricados por impressão 3D. Pequenas variações geométricas nas engrenagens, canaletas, guias e regiões de encaixe influenciaram diretamente a suavidade do movimento dos carretéis. Como o sistema depende da continuidade do movimento ao longo de uma trajetória em formato de Oito, desalinhamentos locais, folgas excessivas ou interferências entre superfícies podem gerar travamentos pontuais e exigir maior torque do motor, ou impedir com que o traçament seja feito.

O sistema de tensionamento também apresentou limitações práticas. Apesar de o conceito de compensação de folga ser adequado para reduzir variações de tensão nos fios, a configuração implementada não permitiu o acionamento ideal do braço móvel. A orientação dos roletes não ficou plenamente compatível com a direção predominante da força aplicada pela fibra, que ocorre no sentido vertical durante o processo. Com isso, o fio não gerou a angulação necessária para deslocar o rolete de forma eficiente, podendo interferir com o elemento elastomérico, ocasionar embaraçamento e comprometer o funcionamento contínuo do mecanismo.

Além disso, o desempenho do tensionador mostrou-se sensível ao nível de atrito no carretel e nos demais pontos de contato do fio. Atrito excessivo pode impedir a movimentação suave dos carretéis e aumentar a chance de travamentos, enquanto atrito insuficiente pode reduzir a capacidade do sistema de manter tensão adequada nos filamentos e afrouxar a fibra. Essa condição evidencia que o controle de atrito é um parâmetro crítico para o funcionamento da trançadeira, especialmente em um sistema de tensionamento passivo e dependente da interação entre fio, carretel, rolete e elemento elastomérico.

A capacidade de produção da trançadeira também permaneceu limitada pelo volume disponível para enrolamento da trança e pelas dimensões físicas dos carretéis, tendo um comprimento máximo de filamento por carretel de aproximadamente 1,6 metro. O comprimento total de trança produzido em cada operação depende da quantidade de fibra disponível nos carretéis, da estabilidade do enrolamento no carretel superior e do espaço livre para acúmulo do material trançado. Assim, embora o modelo final seja adequado para produção de corpos de prova em escala laboratorial, sua aplicação em produção contínua exigiria aumento da capacidade dos carretéis e revisão do sistema de recolhimento.

Por fim, a utilização de lubrificante à base de pó de grafite contribuiu para a redução do atrito em regiões críticas, porém introduziu uma limitação adicional relacionada à limpeza do processo. Como as fibras naturais apresentam superfície rugosa e tendência à retenção de partículas, parte do grafite pode se depositar sobre os filamentos durante a operação, gerando contaminação superficial das tranças. Embora essa condição não tenha inviabilizado os ensaios realizados, ela deve ser considerada em etapas futuras, especialmente caso as tranças sejam utilizadas como reforço em compósitos, nos quais a interface fibra-matriz pode ser influenciada pela presença de contaminantes.

2.6 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento à tração das fibras naturais utilizadas no trabalho e das tranças produzidas pela trançadeira desenvolvida. A etapa experimental foi conduzida de forma comparativa, buscando verificar a influência do processo de trançamento sobre o desempenho mecânico do material fibroso. Para isso, foram ensaiados corpos de prova constituídos por fios únicos e corpos de prova constituídos por tranças, permitindo comparar a resposta mecânica das fibras antes e após o processo de trançamento.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC, equipada com célula de carga de 25 kN. A velocidade de deslocamento adotada durante os ensaios foi de 18 mm/min. Os corpos de prova foram fixados entre as garras paralelas da máquina, com comprimento livre entre garras de 250 mm. O comprimento médio total dos corpos de prova preparados foi de aproximadamente 500 mm, permitindo margem suficiente para fixação nas garras e para a região útil submetida ao carregamento.

Foram realizados 10 ensaios de tração em corpos de prova de fios únicos e 10 ensaios de tração em corpos de prova de tranças. A realização de múltiplos ensaios teve como objetivo obter uma base comparativa mais representativa, considerando a variabilidade natural das fibras vegetais e possíveis diferenças associadas ao processo de preparação, fixação e trançamento dos corpos de prova. Os dados obtidos durante os ensaios foram utilizados para a construção de curvas força-deslocamento e, posteriormente, convertidos em curvas tensão-deformação a partir das dimensões médias de cada corpo de prova.



Figura 18 – Máquina Universal de Ensaio EMIC Utilizada nos Ensaio de Tração.

2.6.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados a partir das fibras naturais de rami selecionadas para o estudo, sendo divididos em dois grupos principais: fios únicos e fibras trançadas. Os corpos de prova de fios únicos foram utilizados como referência comparativa, enquanto os corpos de prova trançados foram empregados para avaliar a influência do entrelaçamento das fibras sobre o comportamento mecânico em tração.

Cada corpo de prova de rami foi preparado com comprimento médio total de aproximadamente 500 mm. Durante a montagem no equipamento de ensaio, foi adotado comprimento livre entre garras de 250 mm, correspondente à região efetivamente submetida ao carregamento de tração. Essa configuração permitiu garantir comprimento suficiente para a fixação nas garras e reduzir a possibilidade de escorregamento durante o ensaio.

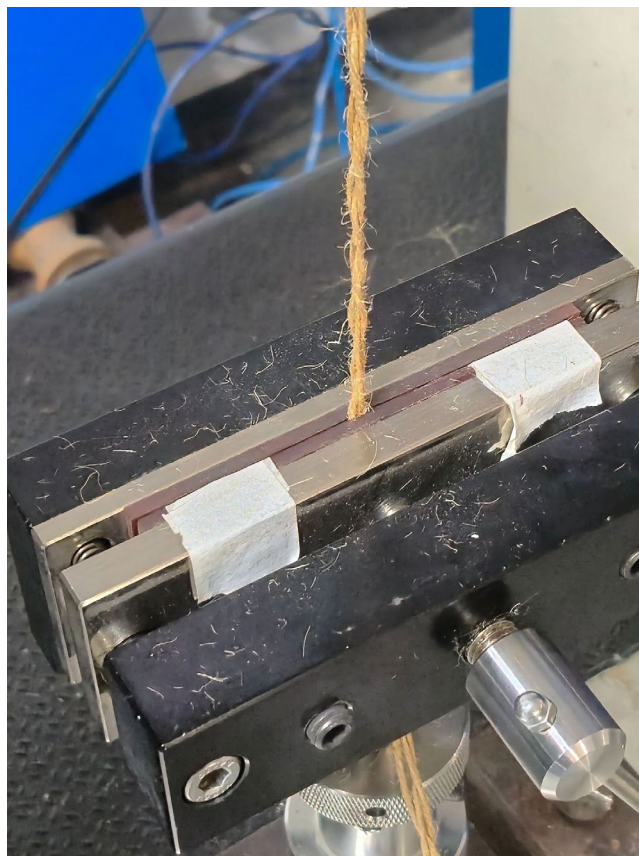


Figura 19 – Detalhe da Fixação da Trança na Garra Inferior da Máquina de Ensaio.

Antes da realização dos ensaios, foram realizadas medições dimensionais dos corpos de prova, com o objetivo de estimar a área média da seção transversal utilizada no cálculo da tensão de engenharia. Para cada corpo de prova, foram realizadas cinco medições do diâmetro em diferentes posições ao longo do comprimento da amostra. A partir desses valores, determinou-se um diâmetro médio e, assumindo-se uma seção circular equivalente, calculou-se a área média da seção transversal. Essa área foi considerada constante ao longo do ensaio e utilizada para converter os valores de força em tensão.



Figura 20 – Corpo de Prova Posicionado Entre as Garras Durante o Ensaio de Tração.

2.6.2 Ensaio de tração das tranças

Inicialmente, foram ensaiados os corpos de prova de fios únicos, utilizados como referência para comparação com as tranças. Em seguida, foram ensaiados os corpos de prova trançados, obtidos a partir do processo de fabricação realizado na trançadeira. Para cada configuração, foram realizados 10 ensaios, totalizando 20 ensaios de tração. A comparação entre esses dois grupos permitiu avaliar se o processo de trançamento alterou o comportamento mecânico das fibras, especialmente em relação à carga máxima suportada, à deformação até a ruptura e à forma de falha observada.

Durante os ensaios, foram registrados os valores de força e deslocamento ao longo do tempo. Como os corpos de prova apresentaram tempos distintos até a ruptura, a análise comparativa foi conduzida em função da deformação e da tensão, e não diretamente em função do tempo. Dessa forma, os dados experimentais foram tratados para obtenção das curvas tensão-deformação de cada corpo de prova, permitindo a comparação do comportamento mecânico dos fios únicos e das tranças.

2.6.3 Parâmetros analisados

Para cada corpo de prova, os valores de força registrados pela máquina foram convertidos em tensão de engenharia dividindo-se a força pela área média da seção transversal da amostra. Essa área foi obtida a partir de cinco medições de diâmetro realizadas ao longo de cada corpo de prova, assumindo-se uma seção circular equivalente. A área calculada para cada amostra foi mantida constante ao longo do ensaio e utilizada na conversão de todos os pontos da curva força-deslocamento em tensão-deformação.

A tensão de engenharia foi determinada pela equação a seguir:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

em que σ representa a tensão de engenharia, F corresponde à força aplicada durante o ensaio e A representa a área média da seção transversal do corpo de prova. Para o cálculo da área, utilizou-se a equação a seguir:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

em que d corresponde ao diâmetro médio do corpo de prova. Considerando a força em newtons (N) e a área em milímetros quadrados (mm^2), a tensão obtida é expressa em MPa.

A deformação de engenharia foi determinada a partir da razão entre o deslocamento registrado pela máquina e o comprimento inicial entre garras. Como o comprimento livre adotado nos ensaios foi de 250 mm, os valores de deslocamento foram convertidos em deformação pela equação:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

em que ε representa a deformação de engenharia, δ corresponde ao deslocamento medido durante o ensaio e L_0 representa o comprimento inicial entre garras, adotado como 250 mm. Como δ e L_0 são expressos em milímetros, a deformação obtida é adimensional, podendo ser apresentada em mm/mm.

O módulo de elasticidade foi estimado a partir da inclinação da região aproximadamente linear das curvas tensão-deformação. Para isso, foram selecionados trechos lineares representativos das curvas experimentais, antes da ruptura dos corpos de prova. O módulo foi calculado pela razão entre a variação de tensão e a variação de deformação nesse intervalo:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

em que E representa o módulo de elasticidade, $\Delta\sigma$ corresponde à variação de tensão no trecho analisado e $\Delta\varepsilon$ corresponde à variação de deformação no mesmo intervalo. Para as tranças, o valor obtido foi tratado como módulo aparente, pois inclui não apenas a deformação axial das fibras, mas também efeitos geométricos associados ao rearranjo dos filamentos durante o carregamento.

Os principais parâmetros analisados foram a tensão máxima, a deformação na ruptura, o comportamento das curvas tensão-deformação e o modo de falha dos corpos de prova. Esses parâmetros foram utilizados para comparar o desempenho dos fios únicos e das tranças, bem como para avaliar a dispersão dos resultados entre os corpos de prova de uma mesma configuração.

3.0 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a avaliação visual das tranças produzidas e os resultados dos ensaios de tração em fios únicos e tranças de rami. A análise considerou a regularidade geométrica das tranças, a presença de defeitos e os principais parâmetros mecânicos obtidos experimentalmente.

Com base nos dados de força, deslocamento e diâmetro médio dos corpos de prova, foram calculadas a tensão de ruptura, a deformação de ruptura e o módulo de elasticidade estimado. Esses parâmetros foram utilizados para comparar as fios únicos com as tranças e avaliar a influência do trançamento no comportamento mecânico do rami.

3.1 Avaliação da morfologia das tranças produzidas

A avaliação das tranças produzidas foi realizada de forma qualitativa, considerando regularidade geométrica, continuidade do trançamento, compactação dos filamentos e presença de folgas ou defeitos locais. Essa análise permitiu comparar visualmente a qualidade das tranças obtidas no modelo final com as limitações observadas no modelo inicial.

No modelo inicial, as tranças apresentavam alternância entre regiões frouxas e regiões mais compactadas, resultado da variação de tensão nos filamentos durante o percurso dos carretéis. No modelo final, o redimensionamento da transmissão e a tentativa de implementação do sistema de tensionamento buscaram reduzir essas variações, favorecendo maior continuidade no movimento dos carretéis e melhor regularidade visual das tranças produzidas.



(A)



(B)



(C)

Figura 21 – Tranças de Rami Produzidas Pelo Modelo Final da Trançadeira: (A);
Ampliação Visual das Tranças de Rami: (B), (C)

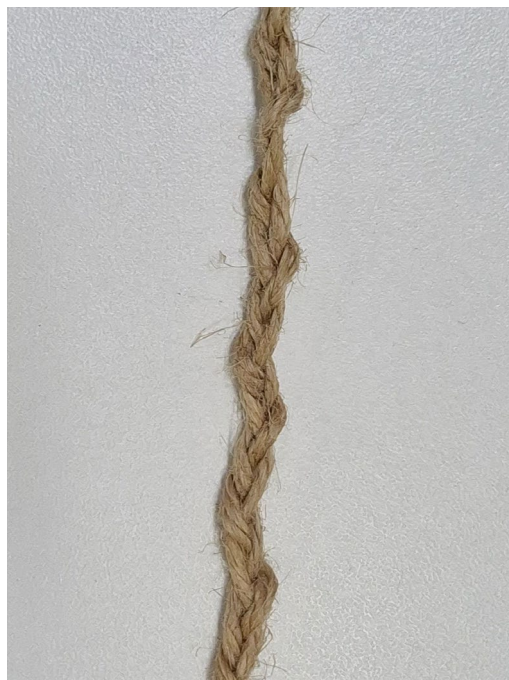
A Figura 18 apresenta exemplos de tranças produzidas pelo modelo final da trançadeira, evidenciando a continuidade do entrelaçamento e a compactação dos filamentos ao longo do comprimento produzido.

Durante a produção dos corpos de prova trançados, verificou-se que o novo modelo apresentou maior regularidade no entrelaçamento dos filamentos, com redução de folgas excessivas e melhor continuidade visual da trança ao longo do comprimento produzido. A presença do mecanismo de compensação de folga auxiliou na manutenção de uma tensão mais uniforme nos fios, reduzindo a ocorrência de trechos excessivamente frouxos ou tensionados. Além disso, a maior disponibilidade de torque no sistema de transmissão contribuiu para uma movimentação mais contínua dos carretéis, diminuindo interrupções e travamentos durante a operação.

Apesar das melhorias observadas, ainda foram identificadas variações inerentes ao processo de trançamento com fibras naturais, principalmente em função da irregularidade dimensional dos filamentos, da rugosidade superficial das fibras e da sensibilidade do sistema ao ajuste manual dos carretéis. Essas características podem influenciar a compactação local da trança e a distribuição de carga entre os filamentos durante os ensaios mecânicos. Dessa forma, embora o modelo final tenha apresentado avanço em relação ao modelo inicial, a qualidade das tranças ainda depende de fatores associados tanto ao equipamento quanto à própria variabilidade do material natural utilizado.

A avaliação qualitativa das tranças produzidas indica, portanto, que as modificações implementadas no novo modelo contribuíram para aumentar a regularidade do processo de fabricação e melhorar a homogeneidade visual dos corpos de prova. Essa análise serviu como etapa preliminar para a interpretação dos ensaios mecânicos, uma vez que a geometria da trança, a distribuição dos filamentos e a presença de irregularidades podem influenciar diretamente os resultados de tração apresentados nas seções seguintes.

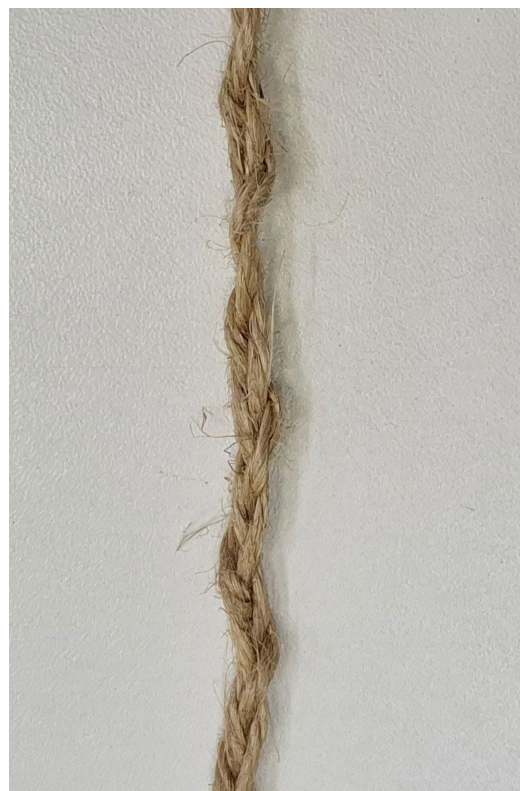
Apesar da melhoria na regularidade do trançamento em relação ao modelo inicial, algumas amostras ainda apresentaram defeitos localizados, principalmente relacionados à variação de tensão entre os filamentos e à irregularidade dimensional das fibras naturais. Entre os defeitos observados, destacam-se regiões com abertura excessiva da trança, perda de compactação, desalinhamento dos filamentos e variações locais no passo do trançamento. Exemplos dessas irregularidades são apresentados na Figura 19



(a)



(b)



(c)

Figura 22 – Variação Local de Compactação da Trança: (A); Abertura Excessiva Entre Filamentos: (B); Irregularidade no Passo e na Distribuição dos Filamentos: (C)

Os defeitos observados indicam que a regularidade da trança permanece sensível à variação de tensão entre os filamentos. Regiões abertas ou pouco compactadas estão associadas à formação de folgas locais, enquanto trechos mais compactados sugerem maior tensionamento relativo dos fios. Assim, o controle da tensão continua sendo um fator determinante para a obtenção de tranças homogêneas e reprodutíveis.

3.2 Resultados dos ensaios de tração

Os ensaios de tração forneceram os dados de força e deslocamento dos fios únicos e das tranças de rami. A partir desses dados, foram calculadas a tensão de ruptura e a deformação de ruptura de cada corpo de prova, utilizando a área média da seção transversal correspondente.

Foram realizados 10 ensaios para fios únicos e mais 10 ensaios para as tranças. Os corpos de prova de fibra única foram utilizados como referência para comparação com as tranças. A Tabela 2 apresenta os dados dimensionais dos fios únicos, enquanto a Tabela 3 apresenta os respectivos resultados mecânicos.

Tabela 4 - Dados Dimensionais dos Corpos de Prova de Fibra Única

Corpos de prova de trança	Diâmetro médio [mm]	Área média [mm ²]
1	1,28	1,28
2	1,38	1,50
3	1,33	1,39
4	1,23	1,19
5	1,46	1,67
6	1,42	1,58
7	1,27	1,27
8	1,34	1,41
9	1,38	1,50
10	1,21	1,15
Média	1,33	1,39
Desvio Padrão	0,08	0,17

Tabela 5 - Resultados Mecânicos dos Corpos de Prova de Fibra Única

Corpos de prova de fibra única	Deformação de ruptura [mm/mm]	Tensão de ruptura [MPa]	Modo de falha
1	0,02	107,27	A fibra rompeu
2	0,02	101,47	A fibra nao rompeu completamente
3	0,02	106,43	A fibra nao rompeu completamente
4	0,02	13,63	A fibra rompeu
5	0,02	89,86	A fibra nao rompeu completamente
6	0,02	103,73	A fibra nao rompeu completamente
7	0,02	129,90	A fibra rompeu
8	0,02	115,49	A fibra nao rompeu completamente
9	0,02	109,27	A fibra nao rompeu completamente
10	0,02	140,68	A fibra nao rompeu completamente
Média	0,02	114,27	
Desvio Padrão	0,00	16,81	

Em seguida, foram analisados os corpos de prova trançados, com o objetivo de avaliar a influência do arranjo geométrico da trança sobre a resposta mecânica do material. De forma análoga, a Tabela 4 apresenta os dados dimensionais dos corpos de prova trançados, enquanto a Tabela 5 apresenta os resultados mecânicos obtidos para esse grupo.

Tabela 6 - Dados Dimensionais dos Corpos de Prova de Trança

Corpos de prova de trança	Diâmetro médio [mm]	Área média [mm ²]
1	2,38	4,45
2	2,60	5,39
3	2,57	5,19
4	2,70	5,73
5	3,31	8,60
6	2,40	4,52
7	2,80	6,16
8	3,41	9,13
9	3,21	8,09
10	2,67	5,60
Média	2,81	6,29
Desvio Padrão	0,37	1,70

Tabela 7 - Resultados Mecânicos dos Corpos de Prova de Trança

Corpos de prova de trança	Deformação de ruptura [mm/mm]	Tensão de ruptura [MPa]	Modo de falha
1	0,03	76,30	Uma das três fibras rompeu
2	0,03	78,19	Duas das três fibras romperam
3	0,03	62,34	Uma das três fibras rompeu
4	0,03	72,25	Uma das três fibras rompeu
5	0,03	46,66	Uma das três fibras rompeu
6	0,04	72,29	Uma das três fibras rompeu
7	0,02	53,04	Uma das três fibras rompeu
8	0,04	28,91	Uma das três fibras rompeu
9	0,04	58,94	Duas das três fibras romperam
10	0,03	65,38	Uma das três fibras rompeu
Média	0,03	61,43	
Desvio Padrão	0,01	15,30	

As Figuras 20 e 21 apresentam as curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração dos corpos de prova de fibra única e de trança de rami, respectivamente. Os dados de deslocamento registrados pela máquina foram convertidos em deformação de engenharia pela razão entre o deslocamento medido e o comprimento inicial entre garras, igual a 250 mm.

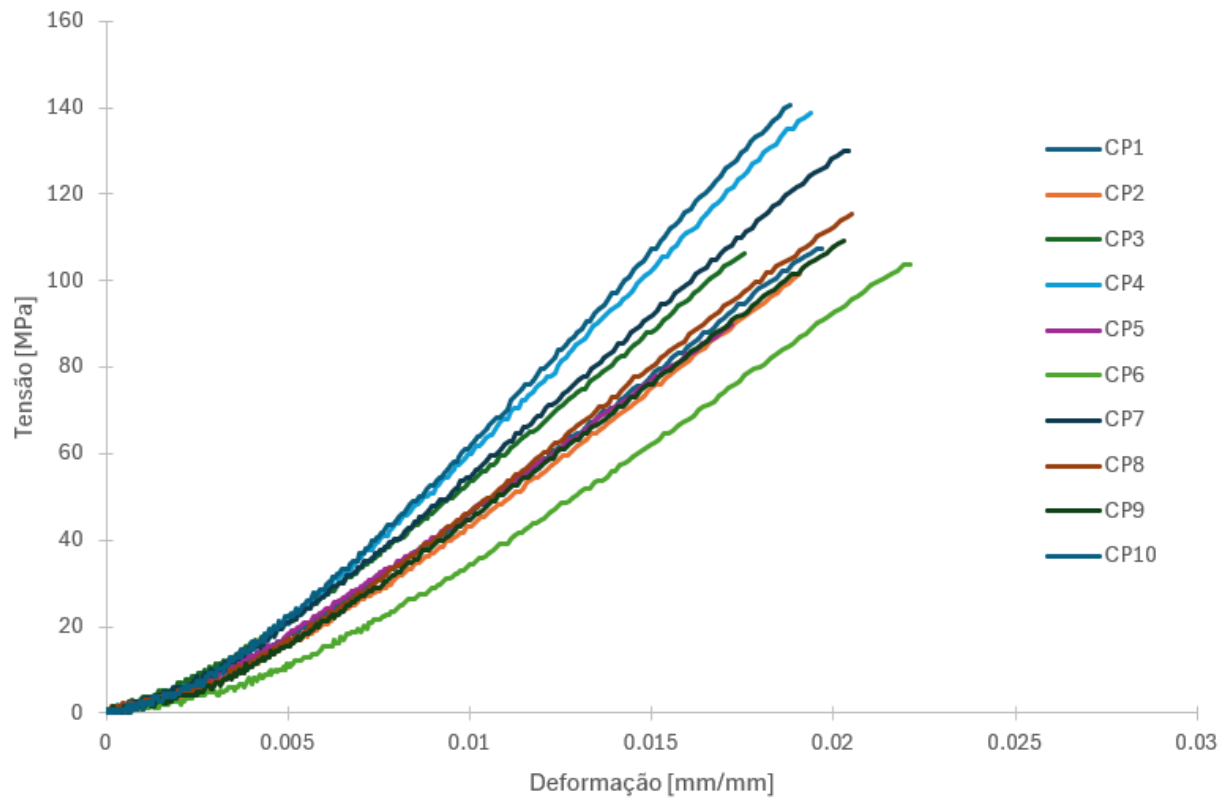


Figura 23 - Curvas Tensão-Deformação dos Corpos de Prova de Fio Único de Rami.

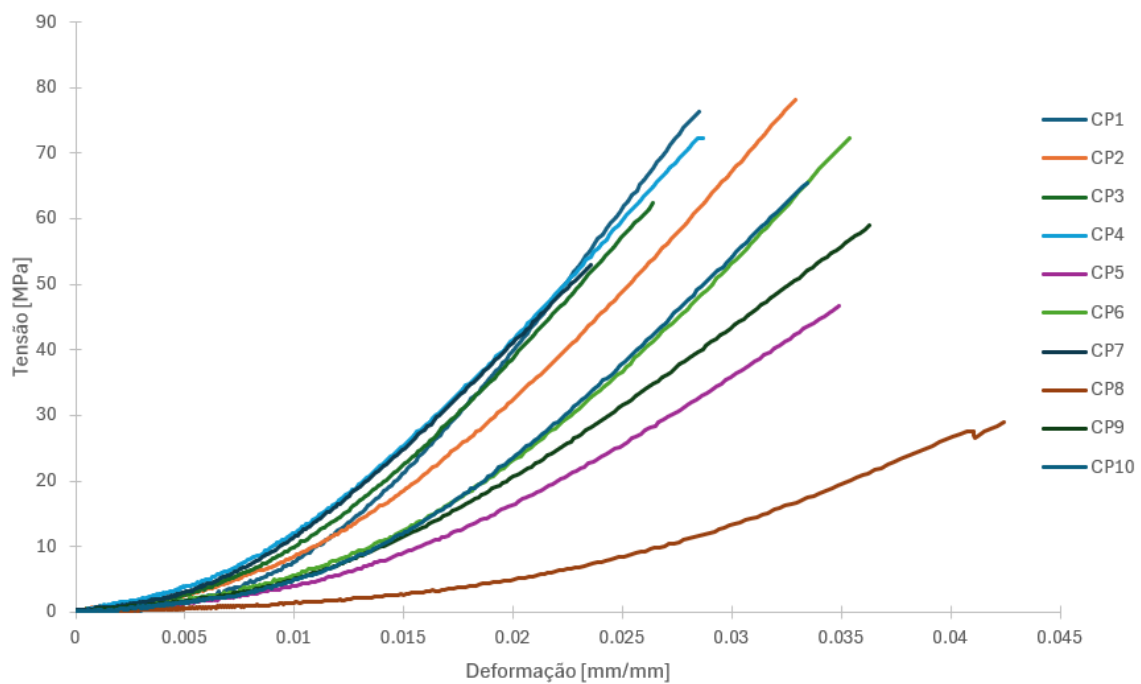


Figura 24 – Curvas Tensão-Deformação dos Corpos de Prova Trançados de Rami.

A partir das curvas tensão-deformação, estimou-se o módulo de elasticidade pela inclinação da região aproximadamente linear das curvas. Para a fibra única, utilizando o intervalo de deformação entre 0,010 e 0,015 mm/mm no corpo de prova CP1, obteve-se módulo de elasticidade de aproximadamente 6,42 GPa. Para a trança, utilizando o intervalo de deformação entre 0,025 e 0,030 mm/mm no corpo de prova CP2, obteve-se módulo aparente de aproximadamente 3,68 GPa.

A diferença entre esses valores indica que a fibra única apresentou maior rigidez axial do que a trança. Esse comportamento é esperado, uma vez que a fibra única está mais alinhada com a direção de carregamento, enquanto a trança apresenta filamentos inclinados e sujeitos a rearranjos geométricos durante o ensaio. Por esse motivo, o valor obtido para a trança deve ser interpretado como módulo aparente, pois inclui efeitos associados à acomodação dos filamentos, fechamento da estrutura trançada e redistribuição de carga.

3.3 Comparação entre fios únicos e tranças de rami

A comparação entre os corpos de prova de fibra única e os corpos de prova trançados foi realizada a partir dos valores médios e dos desvios padrão obtidos nos ensaios. A Tabela 6 apresenta a comparação dimensional entre os dois grupos, enquanto a Tabela 7 apresenta a comparação dos principais parâmetros mecânicos.

Tabela 8 - Comparação Dimensional Entre Fios Únicos e Tranças de Rami

Tipo do corpo de prova	Diâmetro médio [mm]	Desvio padrão diâmetro	Área média [mm²]	Desvio padrão área
Fibra única	1.330	0.0821	1.39	0.171
Trança	2.805	0.3736	6.29	1.699

Tabela 9 - Comparação Mecânica Entre Fios Únicos e Tranças de Rami

Tipo do corpo de prova	Deformação média [mm/mm]	Desvio padrão deformação	Tensão média [MPa]	Desvio padrão tensão
Fibra única	0.020	0.0015	114.27	16.808
Trança	0.032	0.0055	61.43	15.297

Observa-se que os corpos de prova trançados apresentaram aumento significativo nos valores médios de diâmetro e área em comparação aos fios únicos, o que era esperado devido ao agrupamento dos filamentos no arranjo trançado. A fibra única apresentou diâmetro médio de 1,33 mm e área média de 1,39 mm², enquanto a trança apresentou diâmetro médio de 2,81 mm e área média de 6,29 mm².

Em relação ao comportamento mecânico, as tranças apresentaram tensão média de ruptura de 366,02 MPa, valor superior ao obtido para os fios únicos, que apresentaram tensão média de 114,27 MPa. Além disso, os corpos de prova trançados também apresentaram maior deformação média até a ruptura. Entretanto, os maiores valores de desvio padrão observados nas tranças indicam maior dispersão dos resultados, possivelmente associada à variabilidade geométrica do trançamento, à distribuição não uniforme de carga entre os filamentos e às irregularidades naturais das fibras de rami.

Além dos valores de ruptura, a estimativa dos módulos indicou maior rigidez axial para a fibra única em relação à trança, reforçando a influência da arquitetura trançada sobre o comportamento deformacional do material.

3.4 Discussão dos resultados

Os resultados indicam que a arquitetura dos corpos de prova influenciou diretamente o comportamento mecânico do rami. Os fios únicos apresentaram maior rigidez, maior inclinação nas curvas tensão-deformação e maior módulo de elasticidade estimado, pois foram solicitadas de forma mais alinhada ao eixo de carregamento. Já as tranças apresentaram menor rigidez aparente devido à inclinação dos filamentos e aos rearranjos geométricos ocorridos durante o ensaio.

Nas tranças, parte da deformação medida está associada não apenas ao alongamento axial das fibras, mas também à acomodação da estrutura trançada, ao fechamento dos espaços entre filamentos e à redistribuição interna de carga. Por isso, o módulo das tranças deve ser interpretado como módulo aparente, pois combina a resposta do material com os efeitos geométricos do trançamento.

Apesar da menor rigidez, as tranças apresentaram maior deformação antes da ruptura, indicando maior capacidade de acomodação estrutural durante o carregamento. Esse comportamento pode ser vantajoso em aplicações que exijam maior tolerância à deformação e redistribuição progressiva de esforços. No entanto, os maiores desvios padrão observados nas tranças indicam maior variabilidade experimental, associada à complexidade geométrica do trançamento e à distribuição não uniforme de tensão entre os filamentos.

A avaliação visual também mostrou defeitos localizados, como abertura entre filamentos, variação de compactação e irregularidade no passo da trança. Esses defeitos contribuem para a dispersão dos resultados, pois geram regiões com diferentes níveis de tensionamento e possíveis concentrações de carga. Assim, mesmo com as melhorias do modelo final, a regularidade geométrica das tranças ainda se mostrou determinante para a reprodutibilidade dos ensaios.

De modo geral, o trançamento tornou o conjunto mais deformável e mais sensível à geometria do reforço. A comparação entre fios únicos e tranças mostra que o desempenho mecânico depende não apenas das propriedades individuais da fibra, mas também da qualidade do trançamento, da distribuição de tensão entre os filamentos e da estabilidade do processo de fabricação. Portanto, o controle do tensionamento e a redução de irregularidades geométricas continuam sendo pontos centrais para o aprimoramento da trançadeira.

4.0 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas a partir do desenvolvimento e avaliação da trançadeira, considerando as melhorias implementadas no modelo final, o desempenho observado durante a fabricação das tranças e os resultados dos ensaios mecânicos realizados com fios únicos e tranças de rami. As conclusões são organizadas de acordo com os objetivos propostos no trabalho, destacando os avanços obtidos, as limitações ainda existentes e as oportunidades de aprimoramento para trabalhos futuros.

4.1 Conclusões do Trabalho

As modificações implementadas no modelo final melhoraram a estabilidade geral da trançadeira em relação ao modelo inicial. O redimensionamento da transmissão, com uma engrenagem motora menor, reduziu a velocidade angular e aumentou o torque disponível, tornando o movimento dos carretéis mais robusto. Esse efeito era esperado e contribuiu para reduzir parte dos travamentos observados no primeiro modelo.

As melhorias estruturais também tiveram impacto positivo, principalmente pela redução da altura da estrutura superior, pela compactação do conjunto e pela padronização das engrenagens. Ainda assim, o funcionamento permaneceu sensível às tolerâncias das peças impressas em 3D, aos desalinhamentos e ao atrito entre componentes móveis.

O sistema de tensionamento não apresentou o desempenho esperado na configuração construída. Embora o conceito de compensação de folga seja válido, a orientação dos roletes não ficou compatível com o sentido vertical de tração da fibra. Com isso, o fio não acionou corretamente o braço móvel e passou a interferir com o elemento elastomérico, causando embaraçamentos e travamentos. Portanto, a geometria do tensionador precisa ser reformulada.

As tranças produzidas no modelo final apresentaram melhor regularidade visual do que aquelas do modelo inicial, mas ainda exibiram defeitos localizados, como abertura entre filamentos, variação de compactação e irregularidade no passo. Esses defeitos indicam que o controle de tensão ainda não foi plenamente resolvido.

Os ensaios de tração mostraram que os fios únicos de rami apresentaram maior tensão média de ruptura e maior rigidez axial, enquanto as tranças apresentaram maior deformabilidade e menor módulo aparente. Esse comportamento era esperado, pois os filamentos trançados não estão totalmente alinhados ao eixo de carregamento e parte da deformação ocorre devido ao rearranjo geométrico da trança.

De modo geral, o modelo final representou um avanço em relação ao modelo inicial, principalmente pela melhoria da transmissão, maior robustez estrutural e produção de tranças mais regulares. No entanto, a repetibilidade do processo ainda é limitada pelo atrito, pelas tolerâncias de fabricação e pela geometria inadequada do tensionador. Assim, a trançadeira apresenta potencial para produção laboratorial de reforços fibrosos trançados, mas ainda requer refinamentos para melhorar o controle de tensão e a regularidade geométrica das tranças.

4.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se inicialmente a reformulação geométrica do sistema de tensionamento dos carretéis. Embora o conceito de compensação de folga por meio de braço móvel, rolete e elemento elastomérico tenha apresentado potencial, a configuração implementada não permitiu o acionamento adequado do mecanismo devido à orientação dos roletes em relação ao sentido de tração da fibra. Dessa forma, propõe-se o reposicionamento dos roletes em orientação horizontal ou em uma geometria compatível com a direção efetiva da força aplicada pelo fio, de modo que o tensionador possa atuar de forma mais eficiente e reduzir o risco de embaraçamento no elemento elastomérico.

Também se recomenda o aprimoramento do controle de atrito nos componentes móveis da trançadeira. Apesar da aplicação de lubrificante à base de pó de grafite e do lixamento das superfícies de contato, ainda foram observadas limitações associadas a travamentos pontuais e resistência ao movimento. Trabalhos futuros podem avaliar materiais com menor coeficiente de atrito, uso de buchas ou rolamentos adicionais, melhoria no acabamento superficial das peças impressas e ajustes mais rigorosos nas tolerâncias de fabricação.

Outro ponto relevante é a melhoria do sistema eletrônico de acionamento. Recomenda-se investigar de forma mais detalhada a influência dos drivers, da fonte de alimentação e dos parâmetros de controle dos motores de passo sobre a velocidade, o torque disponível e a estabilidade operacional da máquina. A implementação de um controle mais refinado de velocidade, aceleração e sincronização entre os motores pode contribuir para reduzir perdas de passo, vibrações e oscilações durante o trançamento.

Do ponto de vista experimental, sugere-se ampliar a quantidade de ensaios e incluir diferentes tipos de fibras naturais, como juta, sisal e combinações híbridas com rami. Isso permitiria avaliar de forma mais abrangente a influência da composição fibrosa no comportamento mecânico das tranças produzidas. Além disso, recomenda-se a medição direta da tensão nos fios durante o processo de trançamento, por meio de sensores ou dispositivos instrumentados, para correlacionar quantitativamente o tensionamento aplicado com a qualidade geométrica e o desempenho mecânico das tranças.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros avancem para a fabricação e caracterização de compósitos reforçados com as tranças produzidas pela trançadeira. Ensaaios de tração, flexão, impacto ou fadiga em corpos de prova compósitos permitiriam avaliar de forma mais completa o potencial das fibras trançadas como reforço estrutural. Dessa forma, seria possível verificar não apenas o desempenho mecânico das tranças isoladas, mas também sua eficiência quando integradas a uma matriz polimérica ou cimentícia.

REFERÊNCIAS

1. VIEIRA, Daniel Rabaça Panichi. Fabricação de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras naturais. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2016/relatorios_pdf/ctc/DEQM/DEQM-Daniel_Vieira.pdf. Acesso em: 18 nov. 2025.
2. BRANDÃO, Marcos Gustavo de Medeiros; TAUMATURGO, Ana Caroline da Silva; LIMA, Agnaldo Braga. O uso de compósitos de fibra natural na construção civil: caminhos para um desenvolvimento sustentável alinhado com a Agenda 2030 da ONU. *IOSR Journal of Business and Management*, v. 26, n. 7, p. 30–40, 2024. Disponível em: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/papers/Vol26-issue7/Ser-8/F2607083040.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2025.
3. FERREIRA, Celina Lísia da Costa; LIMA, Laura Brito; SIQUEIRA, Ronaldo Alves. Avaliação do desempenho de fibras naturais em compósitos para construção civil no Brasil: sustentabilidade e inovação. *Revista FT*, 2024. DOI: 10.69849/revistaft/cs10202411301032. Disponível em: <https://revistaft.com.br/avaliacao-do-desempenho-de-fibras-naturais-em-compositos-para-construcao-civil-no-brasil-sustentabilidade-e-inovacao/>. Acesso em: 18 nov. 2025.
4. OLIVEIRA, Vanessa Carina Heinrichs Chirico; DAMINELLI, Bruno Luís; VAHANAGOPYAN; JOHN, Vanderley Moacyr. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. *Ambiente Construído*, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/VFQfpB9t5vG7k4gnSKnJq7w/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 18 nov. 2025.
5. SANTOS, Natália Victoria dos. Desenvolvimento e caracterização de compósitos verdes para habitações sociais. 2021. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/54716/54716.PDF>. Acesso em: 21 jun. 2026.

6. MURUGAN, Rajesh; PITCHAIMANI, Jeyaraj. Mechanical properties of natural fiber braided yarn woven composite: comparison with conventional yarn woven composite. *Journal of Bionic Engineering*, v. 14, n. 1, p. 141–150, 2017. DOI: 10.1016/S1672-6529(16)60385-2. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311978212_Mechanical_Properties_of_Natural_Fiber_Braided_Yarn_Woven_Composite_Comparison_with_Conventional_Yarn_Woven_Composite. Acesso em: 18 nov. 2025.
7. MONTEIRO, Sergio N.; AQUINO, Regina Coeli M. P.; LOPES, Felipe P. D.; CARVALHO, Eduardo A. de; D'ALMEIDA, José Roberto M. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 197–203, 2006. DOI: 10.1590/S1517-70762006000300005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/8YHLXFvPgZWrLJsZFPVNBZL/?format=pdf>. Acesso em: 10 mar. 2026.
8. SINDIPESA. Boletim Técnico nº 3: Alma de Fibra vs. Alma de Aço para Equipamentos. Disponível em: https://sindipesa.org.br/docs/boletim_3_fibra_x_aco_rev2.pdf. Acesso em: 8 jan. 2026.
9. MAIA, Sandra Rodrigues; ROMEIRO, Eduardo; MENDONÇA, Rosangela. Da moda para os oceanos. *ModaPalavra*, 2021. Disponível em: <https://periodicos.udesc.br/index.php/modapalavra/article/download/19826/13463/79755>. Acesso em: 18 nov. 2025.
10. SANTOS, Natália V.; CARDOSO, Daniel C. T. 3D printing of vegetable yarn-reinforced polymer components. *Journal of Cleaner Production*, v. 415, p. 137870, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137870. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137870>. Acesso em: 21 jun. 2026.
11. JOY, Jobin; CAVALCANTI, Daniel K. K.; ULLAH, Tehseen; CAMILLERI, Duncan; DE MARCO MUSCAT-FENECH, Claire; ELLUL GRECH, Brian; MUSCAT, Martin; LI, Hongjun. Novel sisal/flax braided hybrid natural fibre yarns for composite applications. In: SENA-CRUZ, José et al. (org.). *Proceedings of the 12th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering – CICE 2025. Lecture Notes in Civil Engineering*, v. 778. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. p. 1559–1570. DOI: 10.1007/978-3-032-09387-5_151. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-09387-5_151. Acesso em: 21 jun. 2026.

12. SANTOS, Natália Victoria; OLIVEIRA, Karoline Sales; BOTTON, Vitor Farina de Souza de; CARDOSO, Daniel; DOCA, Thiago. Evaluation of the mechanical properties of 3D printed composites reinforced with continuous jute fibers at two temperature tests. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/382394465_Evaluation_of_the_mechanical_properties_of_3d_printed_composites_reinforced_with_continuous_jute_fibers_at_two_temperatures_tests. Acesso em: 18 nov. 2025.
13. ONSHAPE. Why do millions of users trust Onshape for their design needs? Disponível em: <https://www.onshape.com/en/why-onshape>. Acesso em: 18 nov. 2025.
14. AGOCS, Csilla; HANON, Muammel M.; ZSIDAI, László. A comprehensive review of fused deposition modeling (FDM) method using PLA, ABS, and PET-G polymers. *Gradus*, v. 11, n. 1, 2024. DOI: 10.47833/2024.1.ENG.007.
15. MENARGUES, Sergi; NAVAS, Javier; ESPINOSA, Isabel et al. Effect of additive manufacturing parameters on PLA, ABS, and PETG strength. *Processes*, v. 13, n. 9, 2025. DOI: 10.3390/pr13092733.
16. KOPAR, Mehmet; YILDIZ, Ali Riza. Experimental investigation of mechanical properties of PLA, ABS, and PETG 3-D printing materials using fused deposition modeling technique. *Materials Testing*, 2023. DOI: 10.1515/mt-2023-0202.
17. EKUNDAYO, Gbenga; ADEJUYIGBE, Sam. Reviewing the development of natural fiber polymer composite: a case study of sisal and jute. *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*, v. 3, n. 1, p. 1–10, 2019. DOI: 10.11648/j.ajmme.20190301.11.
18. SINHA, Agnivesh Kumar; NARANG, Harendra K.; BHATTACHARYA, Somnath. Mechanical properties of natural fibre polymer composites. *Journal of Polymer Engineering*, v. 37, n. 9, 2017. DOI: 10.1515/polyeng-2016-0362.
19. ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2256/D2256M-21: Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method. West Conshohocken: ASTM International, 2021. Disponível em: https://www.astm.org/d2256_d2256m-21.html. Acesso em: 21 jun. 2026.
20. WAMBUA, Paul; IVENS, Jan; VERPOEST, Ignaas. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, v. 63, n. 9, p. 1259–1264, 2003. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00096-4. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jan-Ivens-2/publication/292307073_Composites_Science_and_Technology/links/5c18aa7e299b139c760a25b/Composites-Science-and-Technology.pdf. Acesso em: 26 jun. 2026.

21. RAVI TEJA, Thonangi; VENKATA RAO, D.; LAKSHUMU NAIDU, A.; RAJU BAHUBALENDRUNI, M. V. A. Mechanical and chemical properties of ramie reinforced composites and manufacturing techniques: a review. *International Journal for Research & Development in Technology*, v. 8, n. 5, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Thonangi-Ravi-Teja/publication/324058516_Mechanical_and_chemical_Properties_of_Ramie_reinforced_composites_and_manufacturing_techniquesA_Review/links/5abb69570f7e9b5df39d45ac/Mechanical-and-chemical-Properties-of-Ramie-reinforced-composites-and-manufacturing-techniquesA-Review.pdf. Acesso em: 26 jun. 2026.

22. CHARLEBOIS, Karine M.; BOUKHILI, Rachid; ZEBDI, Oussama; TROCHU, François; GASMI, Ali. Evaluation of the physical and mechanical properties of braided fabrics and their composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 24, n. 14, p. 1539–1554, 2005. DOI: 10.1177/0731684405050391. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Rachid-Boukhili/publication/282858896_2005_-_Mechanical_properties_Braided_Fabrics_and_their_Composites/links/561fa28b08ae70315b550619/2005-Mechanical

APÊNDICES

Apêndice A - Desenho Técnico Geral da Trançadeira

6 5 4 3 2 1

D

D

C

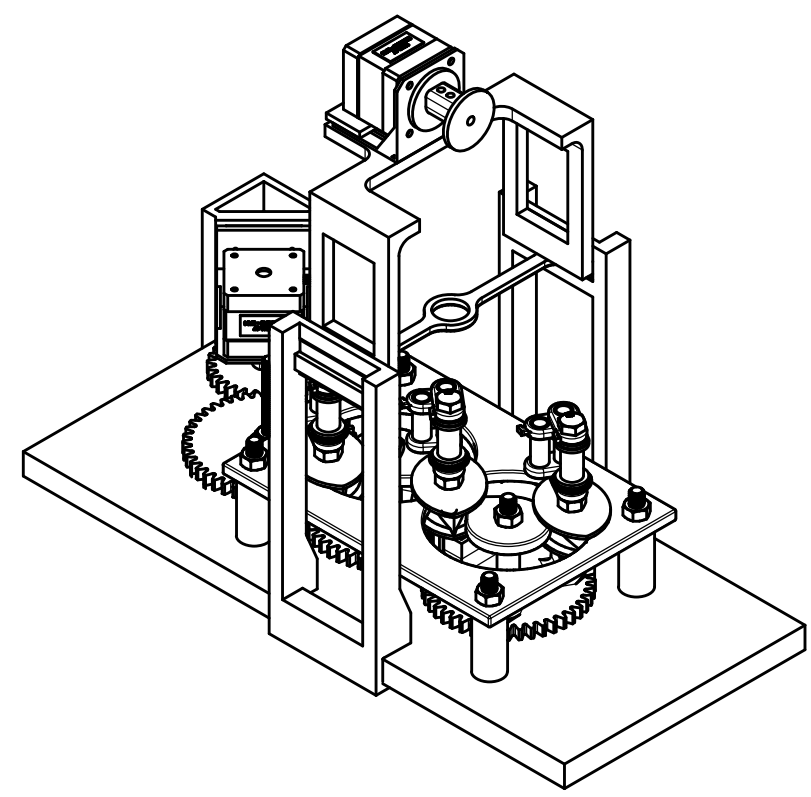
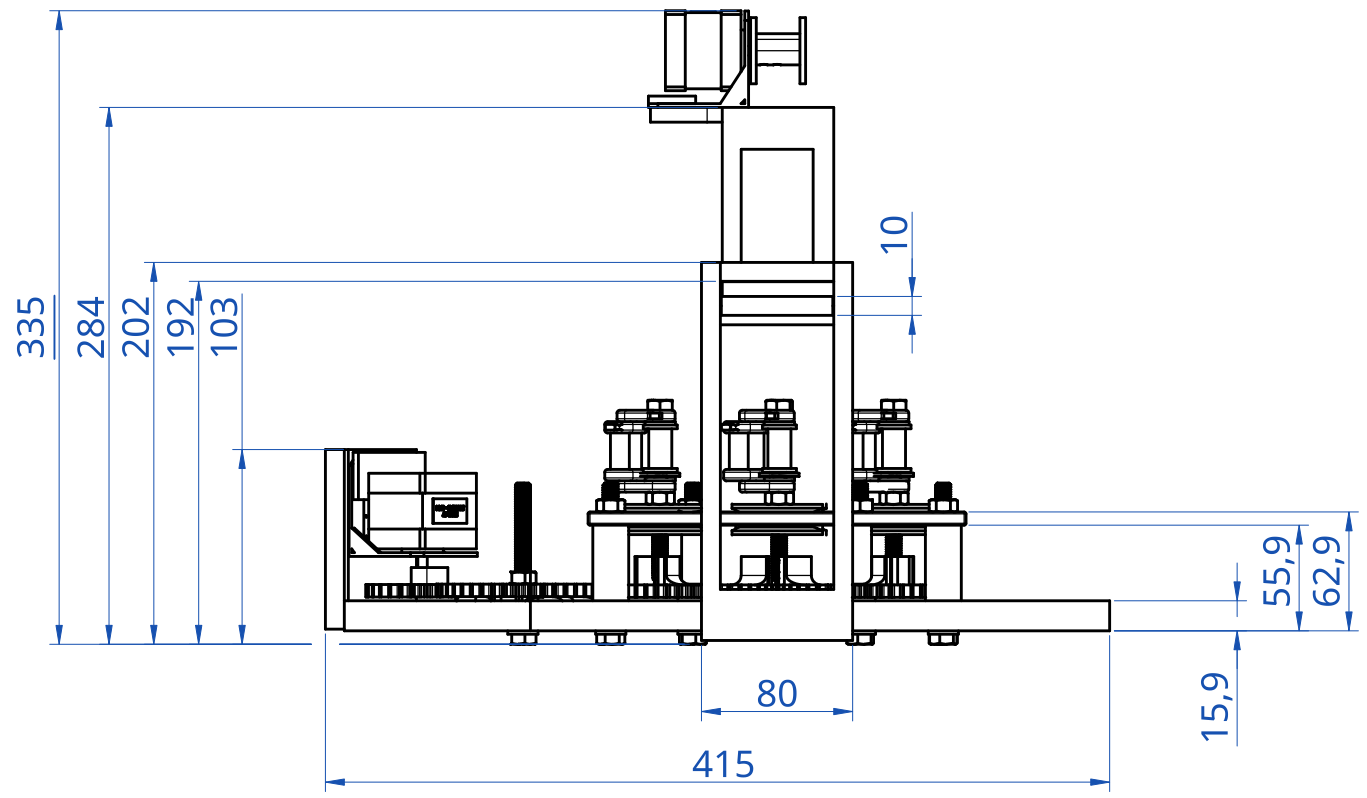
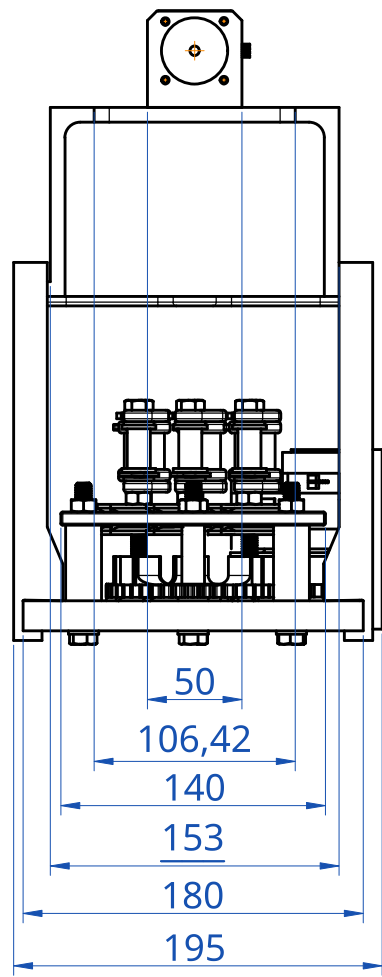
C

B

B

A

A



6 5 4 3 2 1

	NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN	VITORFSB		2026-06-22	TITLE		
CHECKED				Desenho Técnico Geral da Trançadeira		
APPROVED						
				SIZE	DWG NO.	REV.
				A3		1
MATERIAL		FINISH		SCALE	WEIGHT	SHEET
				1:4		1 of 1

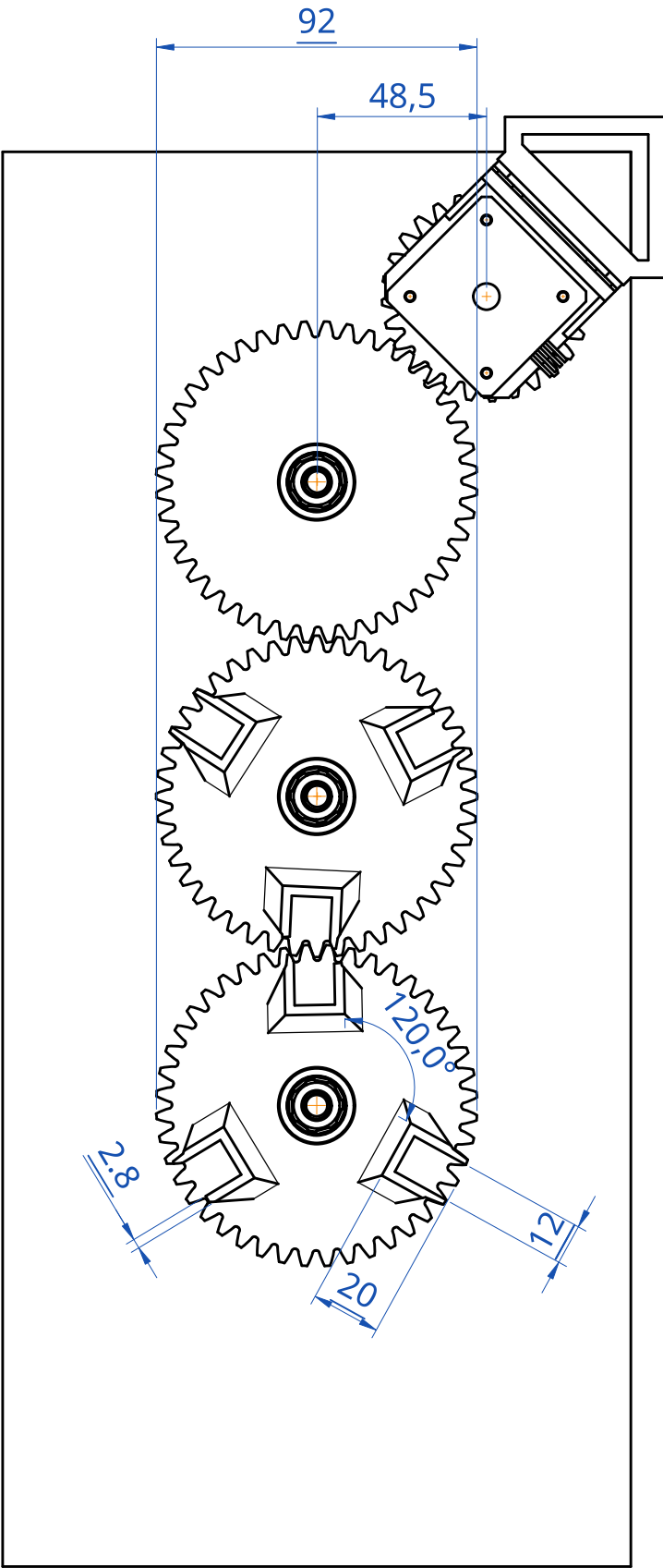
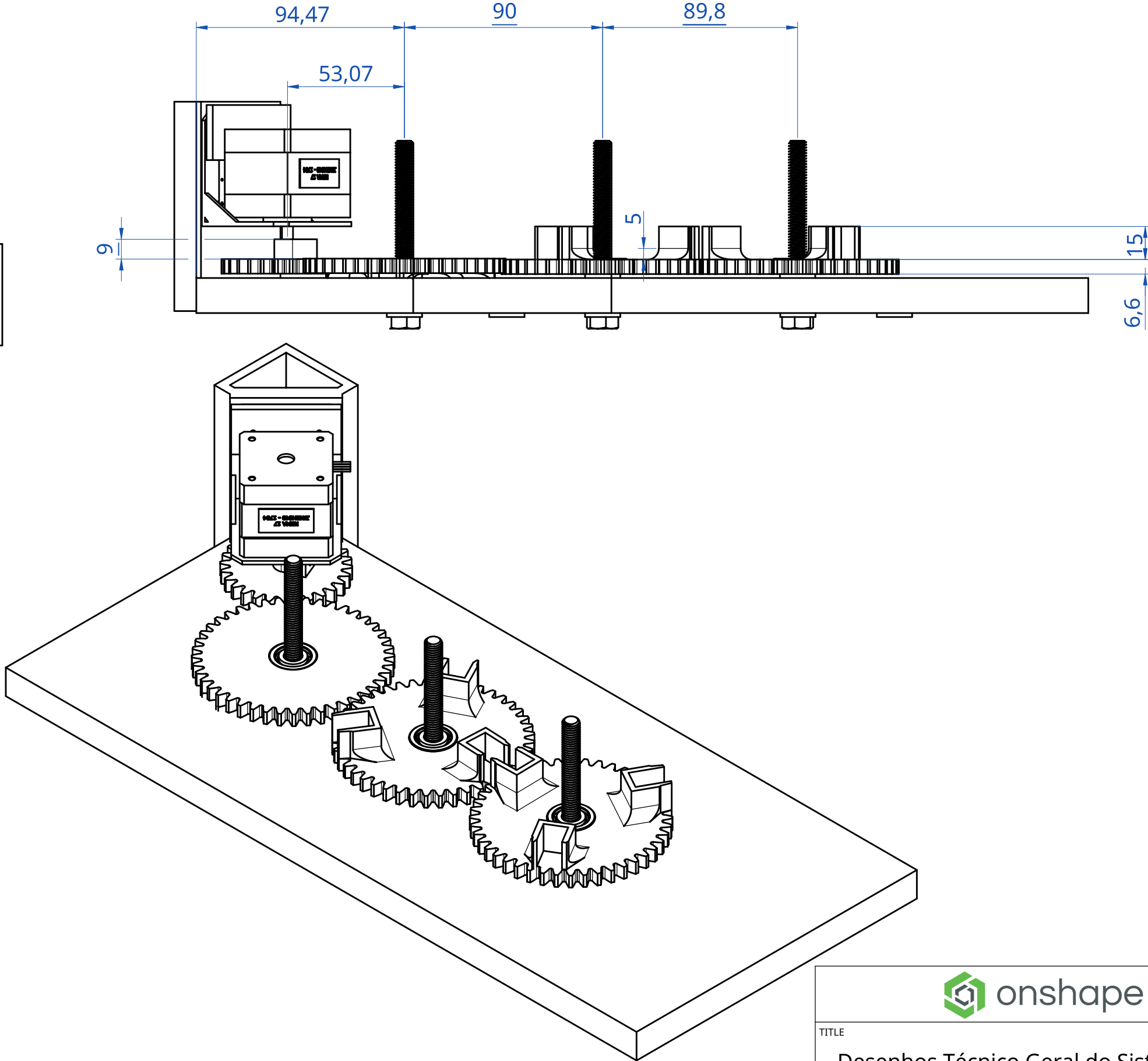
Apêndice B - Desenhos Técnico Geral do Sistema de Transmissão



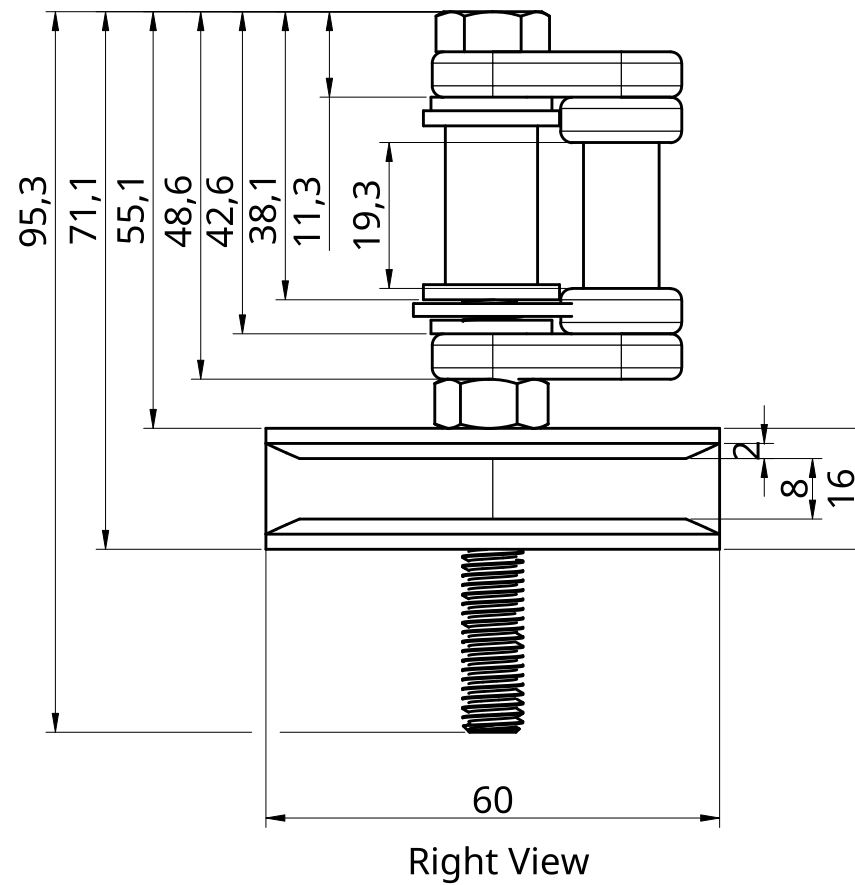
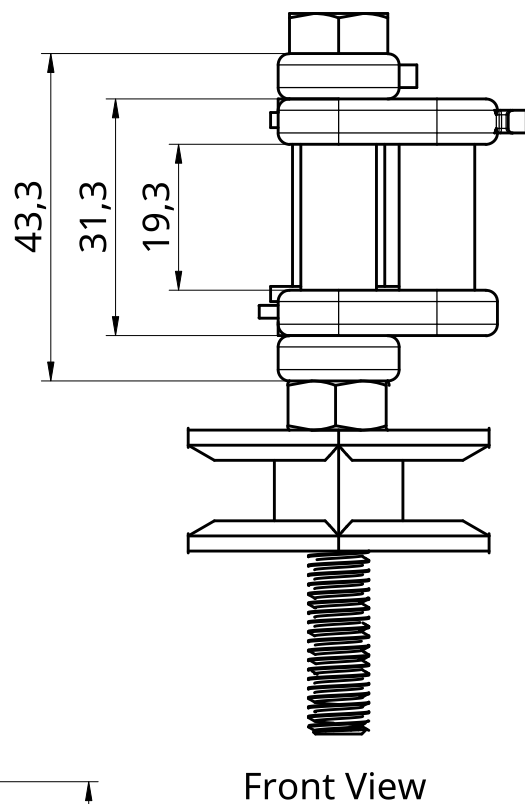
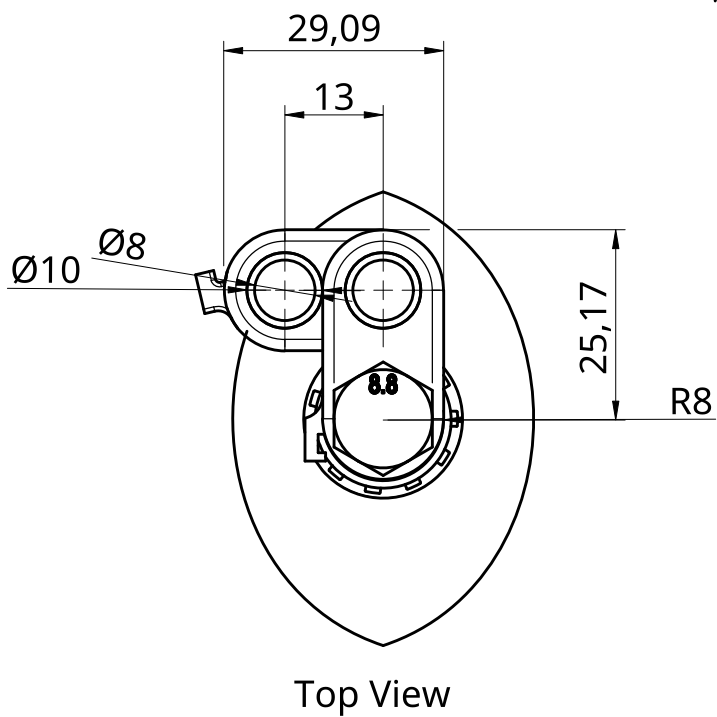
TITLE
Desenhos Técnico Geral do Sistema de Transmissão

SIZE	DWG NO.	REV.
A3		1

SCALE	1:2	WEIGHT		SHEET	1 of 1
-------	-----	--------	--	-------	--------



Apêndice C - Desenho Técnico Geral do Sistema de Tensionamento



	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE Desenho Técnico Geral do Sistema de Tensionamento		
DRAWN	VITORFSB		2026-06-22			
CHECKED						
APPROVED						
				SIZE A4	DWG NO.	REV. 1
MATERIAL	FINISH			SCALE 1:1	WEIGHT	SHEET 1 of 1

Apêndice D - Código de Controle do Arduino Nano

APÊNDICE D – Código de Controle do Arduino Nano

O código apresentado neste apêndice foi utilizado para o acionamento dos dois motores de passo da trançadeira por meio de uma placa Arduino Nano e drivers A4988. O motor inferior é responsável pelo acionamento do sistema de transmissão dos carretéis, enquanto o motor superior atua no recolhimento da trança produzida. A velocidade do motor superior foi definida em função da relação de transmissão adotada no sistema inferior, buscando compatibilizar o avanço do recolhimento com a movimentação dos carretéis.

Código-fonte:

```
#include <AccelStepper.h>

// =====
// Definição dos pinos
// =====

// Motor de baixo - sistema de transmissão da trançadeira
#define STEP_BAIXO 7
#define DIR_BAIXO 4

// Motor de cima - recolhimento/enrolamento da trança
#define STEP_CIMA 6
#define DIR_CIMA 3

// =====
// Criação dos motores
// =====

AccelStepper motorBaixo(AccelStepper::DRIVER, STEP_BAIXO, DIR_BAIXO);
AccelStepper motorCima(AccelStepper::DRIVER, STEP_CIMA, DIR_CIMA);

// =====
// Parâmetros de controle
// =====

// Velocidade do motor de baixo em passos por segundo
float velocidadeBaixo = 300.0;

// Relação de redução do sistema inferior
float relacaoReducao = 1.53;

// Velocidade do motor de cima compensada pela redução
float velocidadeCima = velocidadeBaixo / relacaoReducao;

// Sentido de rotação dos motores
// Use 1 ou -1 para inverter o sentido
int sentidoBaixo = 1;
int sentidoCima = 1;

void setup() {
    // Define velocidades máximas
    motorBaixo.setMaxSpeed(1000);
    motorCima.setMaxSpeed(1000);
}
```

```
// Define aceleração
motorBaixo.setAcceleration(100);
motorCima.setAcceleration(100);

// Define velocidades constantes
motorBaixo.setSpeed(sentidoBaixo * velocidadeBaixo);
motorCima.setSpeed(sentidoCima * velocidadeCima);
}

void loop() {
    // Movimento contínuo dos motores
    motorBaixo.runSpeed();
    motorCima.runSpeed();
}
```