

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

SERGIO GOMES MACHADO FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE MINI MÁQUINAS BASEADAS EM  
TRANSPORTADORES DE CORREIA APLICADOS EM DOIS  
ESTUDOS DE CASOS: *TAPE CASTING* E ESTEIRA COLETORA DE  
LIVROS**

São Carlos

2021



SERGIO GOMES MACHADO FILHO

DESENVOLVIMENTO DE MINI MÁQUINAS BASEADAS EM  
TRANSPORTADORES DE CORREIA APLICADOS EM DOIS ESTUDOS  
DE CASOS: TAPE CASTING E ESTEIRA COLETORA DE LIVROS

Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo para a obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto, Materiais e  
Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan.

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA VERSÃO  
CORRIGIDA. A VERSÃO ORIGINAL  
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL JUNTO AO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA DA EESC-USP.

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M149d Machado Filho, Sergio Gomes  
Desenvolvimento de mini máquinas baseadas em transportadores de correia aplicados em dois estudos de casos: tape casting e esteira coletora de livros / Sergio Gomes Machado Filho; orientador Carlos Alberto Fortulan. São Carlos, 2021.  
  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto, Materiais e Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.  
  
1. Correia transportadora. 2. Tape casting. 3. Devolução de livro. 4. Doctor blade. 5. Projeto mecânico. 6. Desenvolvimento de produtos. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **SERGIO GOMES MACHADO FILHO**.

Título da dissertação: “Desenvolvimento de mini máquinas baseadas em transportadores de correia aplicados em dois estudos de casos: tape casting e esteira coletora de livros”.

Data da defesa: 17/09/2021.

### **Comissão Julgadora**

### **Resultado**

Prof. Associado **Carlos Alberto Fortulan**  
**(Orientador)**

\_\_\_ **Aprovado** \_\_\_

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Prof. Associado **Cesar Renato Foschini**

\_\_\_ **Aprovado** \_\_\_

(Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/UNESP-Bauru)

Prof. Dr. **Luis Fernando Magnanini de Almeida**

\_\_\_ **Aprovado** \_\_\_

(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Associado **Adriano Almeida Gonçalves Siqueira**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**



## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais e irmãos pela  
compreensão, apoio, carinho e amor  
incansáveis.*





## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, Cacilda, Sérgio, Alexandre, Fernando e Julia, por serem sempre os primeiros e maiores apoiadores dos meus sonhos.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Fortulan, exemplo de pessoa, pesquisador e orientador, pelo incentivo e desafio incessante à evolução do conhecimento e do carácter.

À USP, à EESC e ao PPGEM, pela oportunidade e assistência no desenvolvimento deste mestrado.

Aos professores Dr. César Renato Foschini e Dr. Eduardo Bellini Ferreira, ao Dr. Raúl Júlian Revelo Tobar e à FAPESP, pela provocação e financiamento do desenvolvimento das máquinas de *tape casting* através dos processos FAPESP nº 2013/07793-6 e nº 2016/239/10-0.

À Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes, em especial à Andressa de Carvalho, Eduardo Graziosi Silva e Elenise Maria de Araújo, por todo carinho e apoio no desenvolvimento da coletora de livros. E à EESC pelo seu financiamento e construção.

Aos engenheiros Ademir Gerciano, Alexandre da Silva Machado e Anderson Yamamoto pelo apoio no desenvolvimento dos projetos de automação das máquinas.

Aos professores Dr. Fernando Guimarães Aguiar e Dr. Gherhardt Ribatski, pelo suporte nas discussões de conceito e construção de peças para as máquinas.

Aos professores Dr. César Renato Foschini e Dr. Jonas de Carvalho, pelas discussões e orientações na banca de qualificação.

Aos amigos(as) e parceiros(as) de faculdade, pelo incentivo a perseguir este objetivo e por acompanharem toda a jornada. Extraordinariamente à Anderson Yamamoto, Caroline Scaciotti, Dário Oliveira, Fernando Aguiar, João Lovo, Luis Fernando Magnanini, Paula Sanvezzo, Raúl Revelo e Rodrigo Mendes.

À Déborah Carvalho e Natália Pascholino, pelo suporte na organização e evolução pessoal.

À empresa Tecnomotor, pela flexibilidade em permitir conciliar os afazeres do mestrado com a rotina de trabalho. A todos os colegas de trabalho, pela contribuição a minha evolução profissional, em especial às equipes de engenharia e recursos humanos.

À equipe e colegas do LTC, pelo amparo e troca de conhecimentos.

Ao GADU e todos que contribuíram para a realização deste trabalho, direta ou indiretamente, muito obrigado.



“Você está no oceano”

Soul (2020)



## RESUMO

MACHADO FILHO, S. G. **Desenvolvimento de mini máquinas baseadas em transportadores de correia aplicados em dois estudos de casos: *tape casting* e esteira coletora de livros.** 2021. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Há evidências que transportadores por correia são utilizados desde o século XVIII nas mais diversas configurações, ambientes e comprimentos. Sua flexibilidade, fácil configuração, precisão e confiabilidade permitem o uso em atividades variadas, tanto no transporte de itens como na utilização da correia como superfície de deposição de materiais em técnicas avançadas de recobrimento, fabricação de fitas, etc. Nesse sentido, este trabalho objetiva o estudo, projeto e implementação de transportadores de correia no desenvolvimento de duas mini máquinas de *tape casting* (colagem de fitas cerâmicas) para uso em bancadas de laboratórios universitários e, também, de uma máquina coletora de livros para uso em bibliotecas. As máquinas de *tape casting* foram projetadas com comprimento total de 1800 mm e largura de 550 mm e utilizam filme de poliéster siliconado com até 240 mm de largura e velocidade de arraste de 0,5 a 10 mm/s fazendo da correia transportadora a própria superfície de deposição. O cabeçote (*doctor blade*) foi desenvolvido para a colagem de fitas com 100 mm de largura e de 0,1 a 5 mm de espessura, com resolução de 0,01 mm. As máquinas foram validadas com a colagem de fitas de vidro diopsídio ( $\text{CaO.MgO.2SiO}_2$ ) e de Zircônia-3Y com espessura de 0,85 mm. A demanda da máquina coletora de livros surgiu da necessidade de atualizar a caixa de devolução 24 horas de uma biblioteca com média de 30 livros devolvidos diariamente, de forma que ela seja capaz de receber e armazenar automaticamente o volume de livros devolvidos aos finais de semana, sem danificá-los. Este trabalho propôs a construção de uma máquina modular, com capacidade de armazenamento 3 vezes maior que a média diária de devoluções de livros, e preparada para a segunda fase do projeto, na qual deverá ser implantando um sistema para identificação e registro dos livros devolvidos.

Palavras-chave: Transportadores de correia. *Tape casting*. *Doctor blade*. Devolução de livro. Projeto mecânico. Elementos de máquinas. Desenvolvimento de produtos.



## ABSTRACT

MACHADO FILHO, S. G. **Development of mini machines based on belt conveyors applied in two case studies:** tape casting and book return conveyor belt. 2021. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

There is evidence that belt conveyors have been used since the 18th century in the most diverse configurations, environments and lengths. Its flexibility, easy configuration, precision and reliability allow it to be used in various activities, such as transporting items and using the belt as a material deposition surface in advanced coating techniques, tape manufacturing, etc. In this way, the present work aims at the study, design and implementation of belt conveyors in the development of two tape casting mini machines for use on university laboratory benches and, also, a book return machine. The tape casting machines were designed with a total length of 1800 mm and a width of 550 mm and use silicone polyester film up to 240 mm in width and drag speed from 0.5 to 10 mm/s as a conveyor belt and deposition surface. The doctor blade was developed for casting tapes 100 mm wide and 0.1 to 5 mm thickness, with a resolution of 0.01 mm. The machines were validated by casting diopside glass ( $\text{CaO.MgO.2SiO}_2$ ) and Zirconia-3Y tapes with a thickness of 0.85 mm. The demand of the book return machine came from the need to update the 24 hours return box of a library with a daily average of 30 books returned, so that it is able to receive and store the volume of books returned on weekends, without damaging them. This work proposed the construction of a modular machine, with storage capacity 3 times higher than the daily average book returns, and prepared for the second phase of the project, in which a system for identification and registration of books returned should be implemented.

Keywords: Belt conveyors. Tape casting. Doctor blade. Book return. Mechanic project. Machine elements. Product development.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disposição de roletes de correias abauladas .....	36
Figura 2 – Disposição de roletes de correias planas .....	36
Figura 3 – Elementos básicos de transportadores de correia.....	37
Figura 4 – Composição das correias.....	37
Figura 5 – Componentes do tambor .....	38
Figura 6 – Tipos de esticadores: por gravidade e por parafuso.....	38
Figura 7 – Esquemático do primeiro equipamento de <i>tape casting</i> .....	40
Figura 8 – Esquemático do funil com ajuste de altura .....	40
Figura 9 – Dispositivo de <i>tape casting</i> patenteado por Howatt.....	40
Figura 10 – Configuração do equipamento desenvolvido por Park .....	41
Figura 11 – Configuração de um processo contínuo de <i>tape casting</i> .....	41
Figura 12 – Fluxograma do processo atual de <i>tape casting</i> .....	42
Figura 13 – Esquemático da seção de um <i>doctor blade</i> .....	43
Figura 14 – Formatos do <i>doctor blade</i> .....	43
Figura 15 – Ilustração do efeito da pressão hidrostática na espessura da fita ( $P1 > P2 > P3$ ) .	44
Figura 16 – Esquemático de <i>doctor blade</i> com alimentador de barbotina .....	45
Figura 17 – Esquemático de <i>doctor blade</i> com duas lâminas .....	45
Figura 18 – Enrugamento .....	46
Figura 19 – Esmagamento de camadas internas .....	46
Figura 20 – Encurtamento de camadas internas .....	46
Figura 21 – Imagem da patente WO96/32207.....	47
Figura 22 – Carro de armazenamento da Arfido .....	47
Figura 23 – Esquemático de carro com fundo móvel, posições: (a) retraído; (b) estendido ....	48
Figura 24 – Procedimento geral para desenvolvimento de projeto .....	49
Figura 25 – Diagrama do duplo diamante .....	50
Figura 26 – Fluxograma do <i>design thinking</i> associado diagrama do duplo diamante.....	51
Figura 27 – Quadro de análise morfológica .....	52
Figura 28 – Esboço elaborado para o equipamento de <i>tape casting</i> .....	60
Figura 29 – Esquemático do <i>doctor blade</i> , vistas: (a) explodida; (b) perspectiva .....	62
Figura 30 – Esquemático do escoamento lateral, $W_s$ .....	63
Figura 31 – Esquemático da construção dos tambores e roletes .....	63

Figura 32 – Bucha expansível, vistas: (a) perspectiva; (b) montagem.....	64
Figura 33 – Suporte de eixo, vistas: (a) lateral; (b) frontal; (c) perspectiva.....	64
Figura 34 – Esquemático do conjunto de montagem da estrutura.....	65
Figura 35 – Esquemático do sistema de acionamento: (a) polias; (b) montagem na máquina	65
Figura 36 – Ilustração do equipamento de <i>tape casting</i> , vistas: (a) frontal; (b) superior; (c) perspectiva.....	66
Figura 37 – Fabricação do <i>doctor blade</i> : (a) lapidação; (b) montagem final.....	67
Figura 38 – Peças em ABS fabricadas por impressão 3D.....	67
Figura 39 – Montagem dos suportes de eixo.....	68
Figura 40 – Nivelamento do desempenho.....	68
Figura 41 – Equipamento de <i>tape casting</i> construído para o SIMMaC.....	69
Figura 42 – Primeiro teste do equipamento de <i>tape casting</i> , SIMMaC.....	69
Figura 43 – Esquemático do segundo <i>doctor blade</i> , vistas: (a) explodida; (b) perspectiva.....	72
Figura 44 – Suporte horizontal, vistas: (a) lateral; (b) frontal; (c) perspectiva.....	72
Figura 45 – Suporte vertical, vistas: (a) lateral; (b) frontal; (c) perspectiva.....	73
Figura 46 – Esquemático da segunda estrutura, vista explodida.....	73
Figura 47 – Esquemático do conjunto de montagem da segunda estrutura.....	74
Figura 48 – Esquemático da bucha expansível redesenhada, vistas: (a) perspectiva; (b) montagem.....	74
Figura 49 – Esquemático do sistema de acionamento: (a) polias; (b) montagem.....	75
Figura 50 – Esquemático do freio, vistas: (a) perspectiva; (b) montagem.....	75
Figura 51 – Ilustração do segundo equipamento de <i>tape casting</i> , vistas: (a) frontal; (b) superior; (c) perspectiva.....	76
Figura 52 – <i>Doctor blade</i> : (a) montagem do reservatório; (b) montagem final.....	77
Figura 53 – Etapas de fabricação do molde de silicone: (a) posicionamento dos modelos; (b) imersão em silicone líquido; (c) confinamento para cura do silicone; (d) remoção dos modelos; (e) molde pronto.....	78
Figura 54 – Suportes fabricados em diferentes materiais.....	78
Figura 55 – Impressão 3D de peças em ABS.....	79
Figura 56 – Montagem das castanhas e suporte de eixo.....	79
Figura 57 – Instalação do sistema elétrico.....	80
Figura 58 – Conjunto desbobinador apoiado na estrutura.....	80
Figura 59 – Equipamento de <i>tape casting</i> construído para a FEB.....	81
Figura 60 – Bobinamento da fita de poliéster.....	81

Figura 61 – Teste do segundo equipamento de <i>tape casting</i> : (a) colagem da fita; (b) secagem e fotopolimerização .....	82
Figura 62 – Caixa de devoluções: (a) exterior da biblioteca, (b) interior da biblioteca .....	84
Figura 63 – Interior da caixa de devoluções: (a) vista externa, (b) detalhe do acolchoamento	84
Figura 64 – Mapeamento do processo de devolução de livros atual .....	85
Figura 65 – Mapeamento do processo de devolução com separação automática proposto .....	86
Figura 66 – Mapeamento do processo de devolução implementado.....	87
Figura 67 – Esboço da coletora de livros .....	88
Figura 68 – Desenho esquemático do tambor de acionamento .....	91
Figura 69 – Desenho esquemático do tambor de retorno .....	91
Figura 70 – Desenho esquemático do esticador, posições: (a) retraído; (b) esticado.....	91
Figura 71 – Desenho esquemático da estrutura .....	92
Figura 72 – Desenho esquemático da coletora de livros, vistas em perspectiva: (a) frontal; (b) posterior.....	93
Figura 73 – Desenho esquemático do carro coletor, posição do fundo: (a) superior; (b) inferior .....	94
Figura 74 – Ilustração da máquina coletora de livros, vistas: (a) frontal; (b) superior .....	95
Figura 75 – Ilustração da máquina coletora de livros, vista perspectiva.....	96



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Análise morfológica do equipamento de <i>tape casting</i> .....	61
Quadro 2 - Análise morfológica do segundo equipamento de <i>tape casting</i> .....	71
Quadro 3 - Análise morfológica da coletora de livros.....	89



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medição das amostras.....	82
Tabela 2 – Média diária de devolução de livros por horário de recolhimento .....	83





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
AC	Corrente Alternada
ACM	Material Composto de Alumínio
AHM	<i>Automated Materials Handling</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CIN	Classificação Internacional de Normas
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DFMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EVA	Etileno Acetato de Vinila
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo
FDM™	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
ICS	<i>International Classification for Standards</i>
LTC	Laboratório de Tribologia e Compósitos
NR	Norma Regulamentadora
PETG	Poli (Tereftalato de Etileno Glicol)
PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge</i>
PMI	<i>Project Management Institute</i>
PU	Poliuretano
PUB	Programa Unificado de Bolsas de Estudos para Estudantes de Graduação
PVC	Policloreto de vinila
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SIBiUSP	Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade de São Paulo
SIMMaC	Grupo de Pesquisa “Soluções Integradas em Manufatura e Materiais Cerâmicos”
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultravioleta



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	31
1.1	Objetivos .....	32
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	35
2.1	Transportadores de correia .....	35
2.1.1	Aplicações.....	35
2.1.2	Classificação quanto ao perfil da correia.....	36
2.1.3	Componentes .....	37
2.1.3.1	Correia.....	37
2.1.3.2	Tambores .....	38
2.1.3.3	Esticadores.....	38
2.1.3.4	Roletes .....	39
2.1.4	Normas.....	39
2.2	<i>Tape casting</i> .....	39
2.2.1	<i>Doctor blade</i> .....	42
2.2.2	Variáveis de controle de altura da fita em verde .....	44
2.2.3	Tensão de bobinamento .....	45
2.3	Coletora de livros .....	46
2.4	Metodologia de projeto .....	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	55
3.1	Fase informacional .....	55
3.1.1	Estudo de caso – <i>Tape casting</i> .....	56
3.1.2	Estudo de caso – Coletora de livros.....	56
3.2	Projeto conceitual .....	56
3.3	Projeto preliminar.....	57
3.3.1	Sistema de acionamento .....	57
3.4	Projeto detalhado.....	57
3.5	Estudo de caso – Coletora de livros .....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
4.1	Estudo de caso – <i>Tape casting</i> , SIMMaC .....	59
4.1.1	Fase informacional.....	59
4.1.2	Projeto conceitual .....	59

4.1.3	Projeto preliminar .....	60
4.1.3.1	<i>Doctor blade</i> .....	62
4.1.3.2	Correia transportadora .....	62
4.1.3.3	Tambores e roletes.....	63
4.1.3.4	Estrutura .....	64
4.1.3.5	Sistema de acionamento .....	65
4.1.4	Projeto detalhado .....	66
4.1.5	Fabricação e montagem .....	66
4.1.5.1	<i>Doctor blade</i> .....	66
4.1.5.2	Suportes de eixo, polias e castanhas.....	67
4.1.5.3	Estrutura, acionamento e dispositivos elétricos .....	68
4.1.6	Validação .....	69
4.2	Estudo de caso – <i>Tape casting</i> , FEB .....	70
4.2.1	Fase informacional.....	70
4.2.2	Projeto conceitual .....	71
4.2.3	Projeto preliminar .....	71
4.2.3.1	<i>Doctor blade</i> .....	72
4.2.3.2	Suportes de eixo .....	72
4.2.3.3	Estrutura .....	73
4.2.3.4	Tambores e roletes.....	74
4.2.3.5	Acionamento .....	75
4.2.3.6	Sistema de segurança.....	76
4.2.4	Projeto detalhado .....	76
4.2.5	Fabricação e montagem .....	77
4.2.5.1	<i>Doctor blade</i> .....	77
4.2.5.2	Suportes de eixo, polias e castanhas.....	77
4.2.5.3	Estrutura, acionamento e dispositivos elétricos .....	79
4.2.6	Validação .....	81
4.3	Estudo de caso – Coletora de Livros .....	83
4.3.1	Fase informacional.....	83
4.3.2	Projeto conceitual .....	85
4.3.2.1	Desinfecção de livros .....	88
4.3.3	Projeto preliminar .....	89
4.3.3.1	Correia transportadora.....	90

4.3.3.2	Tambores e esticador .....	90
4.3.3.3	Estrutura .....	92
4.3.3.4	Sistema de acionamento .....	92
4.3.3.5	Circuito elétrico e sistema de segurança .....	93
4.3.3.6	Carro de armazenamento .....	94
4.3.3.7	Projeto detalhado .....	94
4.3.4	Fabricação e montagem .....	96
5	CONCLUSÕES .....	97
5.1	Trabalhos futuros .....	97
	REFERÊNCIAS .....	99
	ANEXO A – SELEÇÃO DE MATERIAL E FABRICAÇÃO DE COMPONENTE MECÂNICO AUXILIADOS POR MEF E MA: UM ESTUDO DE CASO .....	105



## 1 INTRODUÇÃO

Há diversas atividades na indústria em que se faz necessário o transporte de itens e uma das possibilidades para suprir tal necessidade é a utilização de transportadores por correia. Eles são utilizados nas mais diversas configurações, ambientes e comprimentos. Sua flexibilidade, fácil configuração, precisão e confiabilidade permitem o uso em atividades variadas, como transporte de itens à granel e linhas de montagem, coletando, selecionando e entregando produtos.

As primeiras evidências do uso de transportadores de correia aparecem no século XVIII, durante a Primeira Revolução Industrial na Inglaterra. Com um projeto extremamente simples, uma cinta de couro correndo sobre uma tábua de madeira, o sistema era adequado para transportar objetos à curta distância. Do ponto de vista de patentes, seu primeiro registro foi possivelmente em 1789 em uma versão do moinho automático de Oliver Evans. Contudo, o transportador de correia moderno é associado ao transportador de carvão, minérios e outros materiais à granel desenvolvido em 1891 por Thomas Robins, mediante encomenda de Thomas Edison e a *Edison Ore-Milling Company* em New Jersey (FERGUSON, 1980; THYSSENKRUPP ROBINS, 2009).

Outro transportador de correia bastante famoso é o utilizado por Henry Ford em suas fábricas de veículos em 1915 e eternizado por Charles Chaplin no filme *Tempos Modernos* de 1936. Este transportador foi a base de um modelo de produção em massa, chamado fordismo, que revolucionou a indústria ao introduzir o conceito das linhas de produção de produtos (GALANOPOULOS, 2008).

Além da indústria, bibliotecas também têm buscado o uso de transportadores de correia. Apesar das mudanças tecnológicas e a digitalização de acervos, as atividades de ensino, principalmente de graduação, ainda são muito pautadas pelo acervo físico das bibliotecas e, ao analisar o procedimento atual de devolução de material, em especial, de livros, observa-se que ele consiste basicamente em um extenso trabalho manual dos bibliotecários. A trajetória do livro começa com sua chegada às mãos do bibliotecário, seguido por sua identificação, registro no sistema da biblioteca e alocação em seu devido local. Na ausência das pessoas, cria-se um gargalo no recebimento, processamento e armazenagem dos livros. Com a evolução da automação, a substituição da mão de obra manual e repetitiva por um processo mecanizado e autônomo se tornou natural nesse ambiente. A ideia é reduzir as tarefas manuais por meio da introdução de sistemas automatizados que recebam, reconheçam e armazenem adequadamente o livro recebido, 24

horas por dia, até que o bibliotecário esteja disponível para colocá-lo de volta na prateleira. A versatilidade dos transportadores de correia contribui para o desenvolvimento de equipamentos para atender esta demanda. A modularidade torna a personalização às necessidades e orçamentos de cada biblioteca uma realidade.

As correias também podem ser utilizadas como superfície de deposição de materiais em técnicas avançadas de recobrimento e fabricação. Em 1947, Howatt, Breckenridge e Brownlow, motivados pela escassez de mica para propósitos elétricos durante a Segunda Guerra Mundial, publicaram o artigo “*Fabrication of thin ceramic sheets for capacitors*” descrevendo o processo de fabricação de fitas cerâmicas utilizando um transportador de correia e um funil com ajuste de altura. Este seria o início da técnica de fabricação chamada *tape casting* (colagem de fitas), capaz de produzir fitas com centenas de metros de comprimento e espessuras de 1  $\mu\text{m}$  a 3000  $\mu\text{m}$  usadas na fabricação de substratos eletrônicos, capacitores multicamadas, cerâmicas piezelétricas, células de combustível, sensores de gases, membranas, etc. (JABBARI *et al.*, 2016). Embora existam diversos equipamentos disponíveis para *tape casting* no mercado, a maioria deles é de grandes dimensões e projetada para a alta produção industrial, o que não atende à demanda de laboratórios de pesquisa que têm limitações de espaço e requerem fabricação experimental em baixa escala com o uso de materiais nobres e propriedades específicas.

Neste contexto, o presente trabalho, buscou o desenvolvimento três mini máquinas, dois equipamentos de *tape casting* e um equipamento coletor de livros, as quais foram baseadas em transportadores por correia e, devido à similaridade de construção, compartilharam metodologias de projeto e especificações de componentes. O termo mini máquina se refere a um equipamento com dimensões e produtividade reduzida em relação à um equipamento industrial, porém equivalente em funcionalidade. Esta concepção de projeto reduz o custo de implementação enquanto preserva os principais componentes e a precisão do equipamento.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de mini máquinas baseadas em transportadores de correia para aplicação em dois casos: *tape casting* e esteira coletora de livros.

Dentre os objetivos específicos estão:

- Estudo e aplicação de metodologias de gerenciamento de produto, de gerenciamento de projeto e de projeto e ferramentas de auxílio à tomada de



decisão no desenvolvimento, fabricação e validação de mini máquinas de precisão;

- Estudo e aplicação de técnicas de dimensionamento, simulação, otimização topológica de componentes mecânicos e seleção de materiais;
- Atender demandas dos clientes acerca de características específicas das máquinas.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Transportadores de correia

#### 2.1.1 Aplicações

O primeiro registro histórico detectado de um transportador de correia foi no moinho automático de Oliver Evans, usado para fabricação de farinha, em 1789. Logo em seguida, em 1891, Thomas Robins iniciou sua adequação ao transporte de minérios e Richard Sutcliffe a adaptou para o uso em minas subterrâneas em 1905. O maior transportador de correia do mundo atualmente, com 98 km de extensão, foi construído em 1972 para transportar rochas fosfáticas no deserto do Saara. Um pouco antes, em 1915, Henry Ford introduziu linhas de montagem baseadas em transportadores de correia em sua fábrica de automóveis *Ford Motor Company*. E, em 1970, a primeira correia transportadora fabricada totalmente em plástico e de maneira modular foi registrada pela empresa Intralox para o transporte de camarão (CAETANO, 2010; FERGUSON, 1980; THYSSENKRUPP ROBINS, 2009).

Os transportadores de correia são utilizados nos mais variados terrenos, comprimentos e inclinações, em ambientes abertos ou não. As correias podem ser abertas, fechadas ou até enclausuradas para evitar contato com o ambiente. Combinadas com outros mecanismos de transportes, como canecas e calhas vibratórias, as correias são bastante utilizadas para transporte de materiais a granel e apresentam versatilidade no transporte tanto de materiais finos (ex.: açúcar em usinas) quanto de materiais com alta granulometria (ex.: grãos em silos de armazenagem) (CAETANO, 2010; CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION - CEMA, 1997; CORREIA..., 2009).

Transportadores de correia são utilizados na indústria alimentícia para mitigar o contato do alimento com qualquer fonte externa de contaminação. Na fabricação de bens de consumo, como eletrodomésticos e automóveis, fazem parte principalmente das linhas de montagem, deslocando componentes entre as estações de trabalho. Em indústrias de celulose, são utilizados tanto para o transporte de toras quanto para o manuseio do corte, dobra, impressão e embalagem do papel no final da linha de produção (CAETANO, 2010; LAITRAM, 2021).

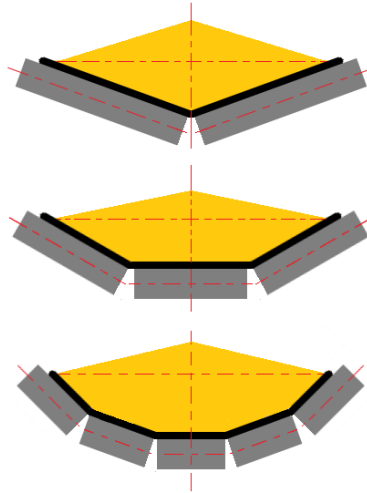
Com a introdução de sistemas informatizados, seu uso foi difundido em aeroportos e centros de logística para transportar, classificar e entregar volumes de maneira eficiente e com alta precisão. Esta mesma tecnologia é encontrada em bibliotecas para o manuseio de livros. Ainda, a precisão e suavidade de movimento permitem que sejam usadas como superfície de deposição de materiais em técnicas de fabricação de fitas cerâmicas como o *tape casting*.

### 2.1.2 Classificação quanto ao perfil da correia

Comumente, dois perfis são mais encontrados em transportadores de correia: correias abauladas e correias planas. Outros perfis menos comuns são: em U, em tubo, com perfil de centragem e circulares (CAETANO, 2010).

As correias abauladas se movem sobre roletes dispostos em ângulo, como ilustrado na Figura 1, que as fazem tomar uma forma cônica, como uma calha. Devido à alta capacidade de carga e a facilidade em carregar e descarregar, é uma das formas mais econômicas de transportar materiais a granel (CEMA, 1997; CORREIA..., 2009).

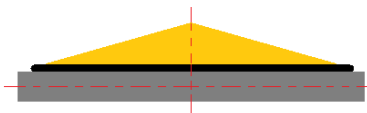
Figura 1 – Disposição de roletes de correias abauladas



Fonte: Caetano (2010).

As correias planas se movem sobre roletes ou chapas horizontais e operam sem abaulamento, como ilustrado na Figura 2. Elas entregam uma capacidade de carga mais baixa que as correias abauladas e funcionam bem a altas velocidades. São correias que podem transportar materiais a granel, porém são mais úteis no transporte de cargas volumétricas como sacas, caixas, produtos acabados, etc. (CEMA, 1997; CORREIA..., 2009).

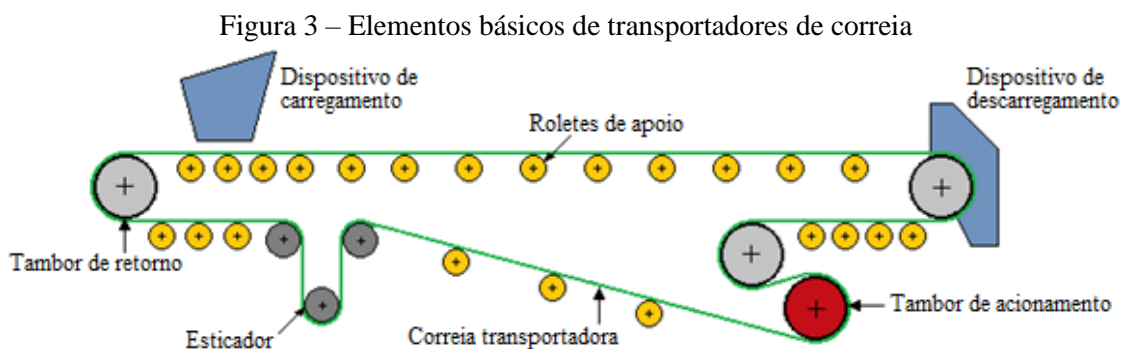
Figura 2 – Disposição de roletes de correias planas



Fonte: Caetano (2010).

### 2.1.3 Componentes

Os componentes básicos de transportadores de correia, ilustrados na Figura 3, são formados por elementos de máquinas tais como eixos, mancais, polias, acoplamentos e são responsáveis pelo seu bom funcionamento e confiabilidade (CORREIA..., 2009).



Fonte: Adaptado de Caetano (2010).

#### 2.1.3.1 Correia

Segundo a NBR 6177 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2016), correia é o elemento destinado a formar uma superfície de sustentação sobre a qual será assentado o material a ser transportado. O movimento translacional da correia produz o transporte propriamente dito.

Basicamente, conforme ilustrado na Figura 4, as correias são compostas por duas partes: a estrutura interna e as coberturas externas (inferior e superior). A seção estrutural é a mais importante da correia quando destinada a suportar as cargas de tração, cisalhamento e impacto, sendo construída de lonas sintéticas, lonas têxteis, cabos de aço ou uma combinação destes materiais. A cobertura é uma camada geralmente feita de borracha ou sua combinação com outros materiais que tem a função de protegê-la contra efeitos de abrasão, impacto, corte, temperatura, ataque químico ou outras condições adversas (CEMA, 1997).

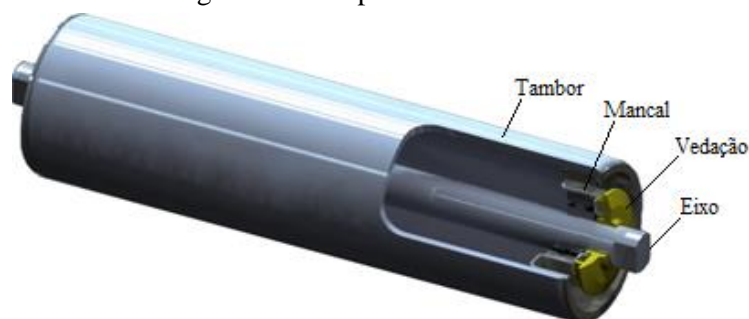


Fonte: Adaptado de Baoding Huayue (2021).

### 2.1.3.2 Tambores

Os tambores são utilizados para direcionar, tracionar e/ou tensionar a correia, sendo definidos como acionador ou livre. O acionador, ou de acionamento, é montado sobre o eixo motriz e transmite a força necessária à movimentação da correia. Os tambores livres giram livremente somente devido à tração proveniente do atrito com a correia, são usados para direcionar, sustentar e/ou tensionar as correias. O diâmetro do tambor tem influência direta na vida útil da correia. A Figura 5 ilustra os componentes usuais dos tambores (CORREIA..., 2009; FÁBRICA DE AÇO PAULISTA - FAÇO, 1996).

Figura 5 – Componentes do tambor

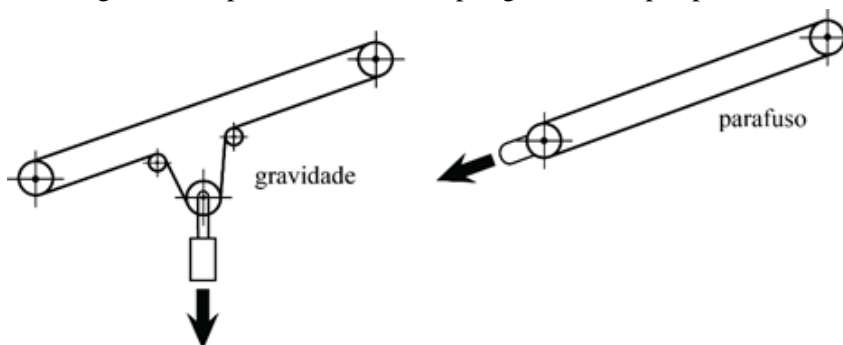


Fonte: Adaptado de Sibaroll (2021).

### 2.1.3.3 Esticadores

Esticadores são mecanismos utilizados para garantir a tensão conveniente de operação da correia. Eles podem ser automáticos, por contrapeso e/ou molas, ou manuais, por parafuso extensor. Os automáticos podem ser colocados em qualquer posição “frouxa” da correia, porém é recomendado que fique próximo do tambor de acionamento. O de parafuso é usado exclusivamente no tambor de retorno. A Figura 6 a seguir ilustra os tipos de esticadores (ABNT, 2016; CORREIA..., 2009).

Figura 6 – Tipos de esticadores: por gravidade e por parafuso



Fonte: Adaptado de Correia... (2009).

#### 2.1.3.4 Roletes

Roletes são elementos destinados a suportar, guiar e conformar a correia. Correias planas também podem ser apoiadas sobre chapas, dispensando o uso de roletes de suporte (ABNT, 2016; CORREIA..., 2009).

#### 2.1.4 Normas

Para o projeto, fabricação e operação de transportadores de correia devem-se observar algumas normas regulamentadoras e normas técnicas, a saber:

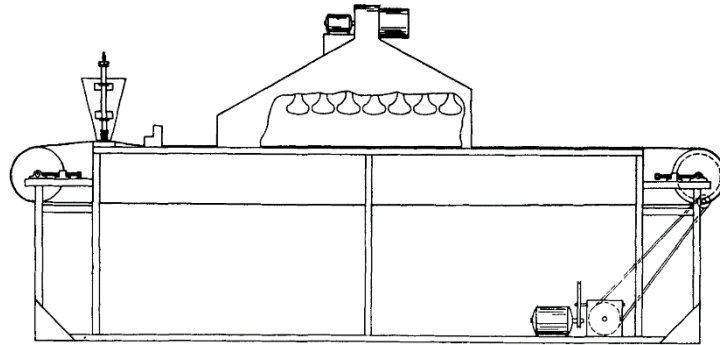
- NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade
- NR 12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos
- NR 17 – Ergonomia
- ABNT CIN/ICS 53.040 – Equipamento de movimentação contínua

## 2.2 *Tape casting*

No processo original de *tape casting*, ou colagem de fitas, partículas cerâmicas e outros aditivos são dispersados em um veículo para formar uma barbotina, uma suspensão coloidal. A barbotina é depositada sobre uma correia transportadora em movimento com o auxílio de um funil e uma janela com altura ajustada em relação a correia, formando assim, um depósito da barbotina com espessura controlada. A correia com a barbotina depositada é, então, aquecida e ventilada e, ao secar, se tem conformada uma fita de cerâmica em verde. No estado verde, uma alta concentração de componentes orgânicos permite que a fita seja enrolada, puncionada, cortada, estampada, impressa, empilhada e unida e, após estes procedimentos, ela é queimada e sinterizada, quando a parte orgânica da na fita é removida por degradação térmica, e, então, a fita se torna rígida (HOWATT; BRECKENRIDGE; BROWNLOW, 1947; TOK; BOEY; KHOR, 1999)

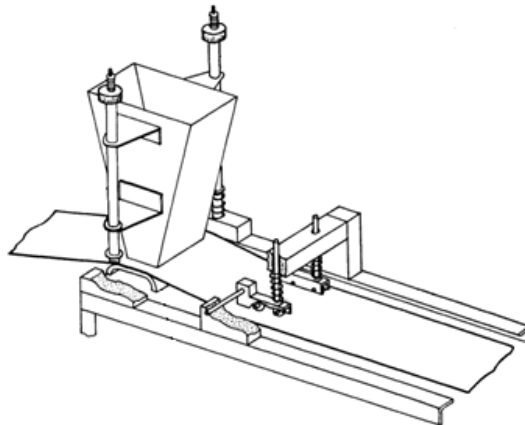
Este processo foi descrito pela primeira vez em 1947, no artigo “*Fabrication of thin ceramic sheets for capacitors*” publicado por Howatt, Breckenridge e Brownlow que também contava com a descrição do equipamento utilizado para realizá-lo, Figura 7, composto essencialmente por um transportador de correia e um funil com ajuste de altura em relação à correia, Figura 8. Em 1952, Howatt obteve a patente US2582993 que conta com o processo de *tape casting* e o dispositivo ilustrado na Figura 9.

Figura 7 – Esquemático do primeiro equipamento de *tape casting*



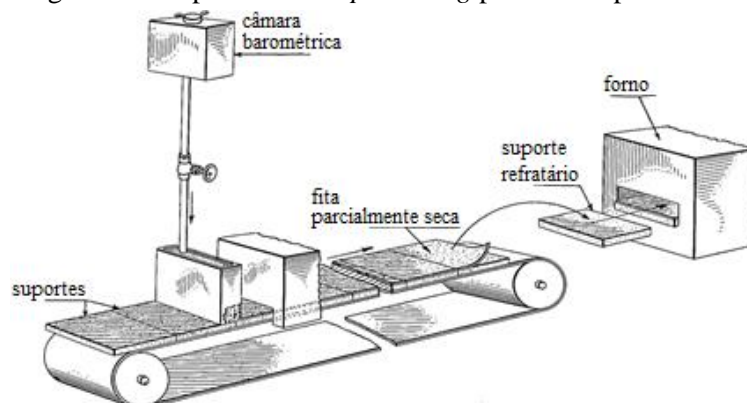
Fonte: Adaptado de Howatt, Breckenridge e Brownlow (1947).

Figura 8 – Esquemático do funil com ajuste de altura



Fonte: Adaptado de Howatt, Breckenridge e Brownlow (1947).

Figura 9 – Dispositivo de *tape casting* patenteado por Howatt



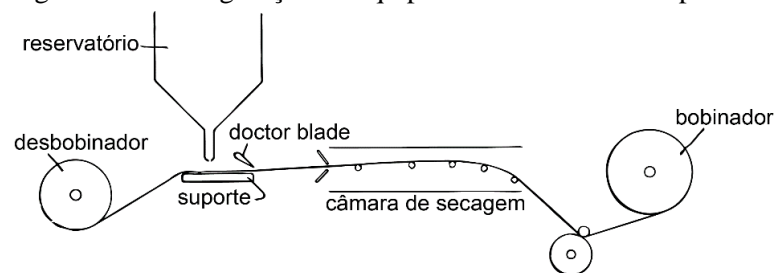
Fonte: Adaptado de Howatt (1952).

Em 1961, John Lawrence Park, Jr. obteve a patente US2966719 com alterações no processo e no equipamento que permitem a fabricação de fitas contínuas e flexíveis que podem ser bobinadas e armazenadas indefinidamente, livres de rachaduras, furos ou rompimento de partículas. Se destacando em relação ao processo de Howatt, que produz



placas rígidas e de comprimento limitado ao tamanho do suporte de secagem. Um dos novos elementos do equipamento apresentado nesta patente é o *doctor blade*, uma lâmina de nivelamento da barbotina que substitui o funil de Howatt, Breckenridge e Brownlow (1947) na regulagem de altura de colagem da fita. A Figura 10 ilustra a configuração do equipamento patenteado por Park no qual a correia transportadora é aberta e bobinada junto à fita em verde. Ainda, a correia é um filme polimérico espesso com pelo menos uma de suas faces revestida de silicone, para evitar a adesão da fita depositada com o filme (correia).

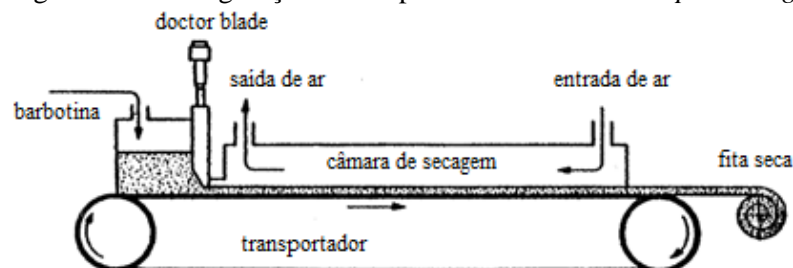
Figura 10 – Configuração do equipamento desenvolvido por Park



Fonte: Adaptado de Park (1961).

A Figura 11 de Tok, Boey e Khor (1999) apresenta uma correia fechada, como a do equipamento de Howatt, Breckenridge e Brownlow (1947), e a fita em verde bobinada separadamente. Ambas as configurações são largamente utilizadas para o processo de *tape casting* contínuo.

Figura 11 – Configuração de um processo contínuo de *tape casting*

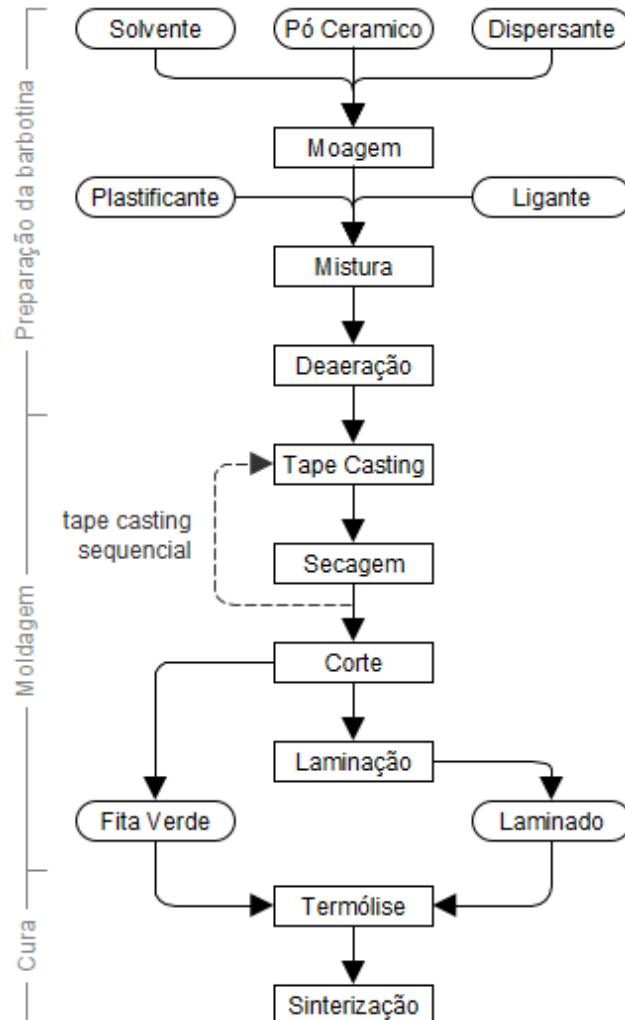


Fonte: Adaptado de Tok, Boey e Khor (1999).

Desde então, o processo de fabricação de fitas cerâmicas tem se desenvolvido, agregando novas etapas e elementos ao *tape casting* que aumentam a versatilidade e a capacidade de fabricar produtos cada vez mais complexos. Hotza *et al.* (2019), sintetizam as etapas atuais no fluxograma apresentado na Figura 12. Eles dividem as etapas do processo em

três grupos macros: preparação da barbotina, moldagem da fita em verde e cura da cerâmica. O *tape casting* é uma etapa de moldagem da fita em verde.

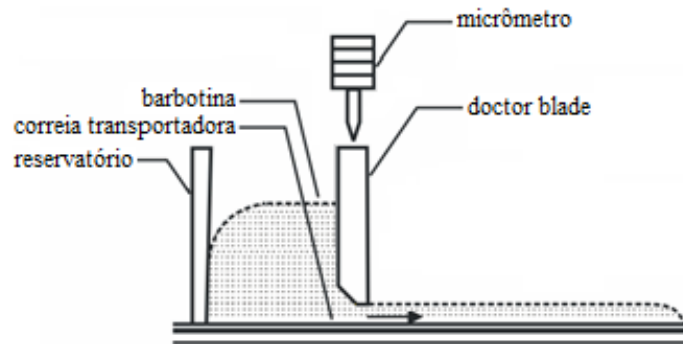
Figura 12 – Fluxograma do processo atual de *tape casting*



Fonte: Adaptado de Hotza *et al.* (2019).

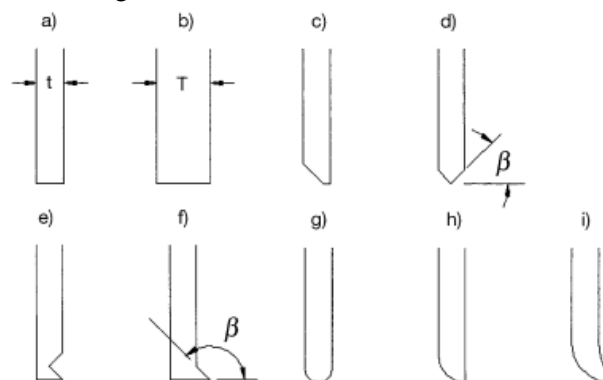
### 2.2.1 *Doctor blade*

O aparato de deposição de barbotina em equipamentos modernos de *tape casting* é formado basicamente por um reservatório, uma lâmina niveladora e um micrômetro para regulagem de altura da janela entre esta lâmina e a superfície de depósito, como ilustrado na Figura 13. O *doctor blade*, que denomina todo o dispositivo de deposição, é especificamente a lâmina niveladora com altura ajustável em relação à correia transportadora. Ela é responsável por determinar a altura do vão de passagem da barbotina e, entre outros fatores, a espessura de colagem da fita (MISTLER; TWINAME, 2000).

Figura 13 – Esquemático da seção de um *doctor blade*

Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2012).

O formato da lâmina influencia o escoamento da barbotina do reservatório para a superfície de deposição. Os parâmetros para seleção são reológicos e dependem, principalmente, da viscosidade da barbotina, tensão superficial entre barbotina e superfície de depósito e velocidade de deposição. A Figura 14 ilustra vários formatos disponíveis no mercado: (a) fina de fundo plano; (b) grossa de fundo plano; (c, d) chanfrada; (e, f) ponta de faca; (g, h) arredondada; (i) em formato de “vírgula”. As lâminas de fundo plano são as mais comuns e usadas em equipamentos com superfície de deposição plana. As chanfradas facilitam o escoamento da barbotina e permitem velocidades de colagem mais altas. As lâminas com ponta de faca melhoram o perfil de escoamento após a lâmina. E as arredondadas ou em formato de “vírgula” são utilizadas em superfícies de deposição cilíndricas. É comum alguns projetos de *doctor blade* contarem com mais de uma lâmina e, nestes casos, elas desempenham papéis diferentes e complementares entre nivelamento e acabamento (MISTLER; TWINAME, 2000).

Figura 14 – Formatos do *doctor blade*

Fonte: Adaptado de Mistler e Twiname (2000).

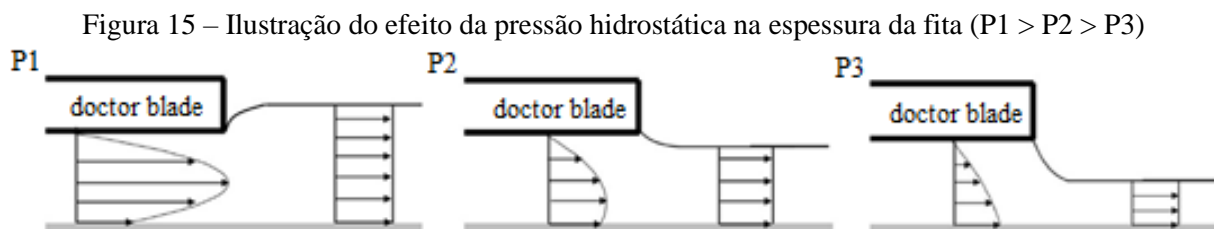
### 2.2.2 Variáveis de controle de altura da fita em verde

Mistler e Twiname (2000) listam quatro variáveis distintas, mensuráveis e controláveis que trabalham juntas para determinar a espessura de colagem da fita. Elas são chamadas de variáveis primárias:

1. Viscosidade da barbotina;
2. Velocidade da correia transportadora;
3. Abertura e largura efetiva da lâmina;
4. Pressão hidrostática do reservatório de barbotina.

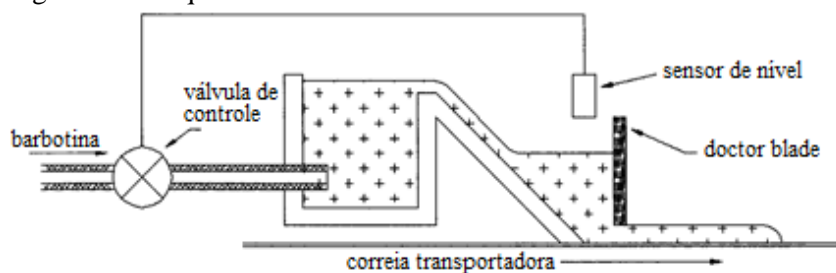
Para condições ambientes constantes, uma vez definidas a abertura e largura da lâmina e a viscosidade da barbotina, estas variáveis não se alteram ao longo do processo. A velocidade da esteira transportadora, porém, em equipamentos como os da Figura 10, pode aumentar à medida que o diâmetro do bobinado aumenta se a velocidade angular do bobinador for constante. Equipamentos modernos utilizam um controle da velocidade linear da esteira transportadora ajustando automaticamente a velocidade angular do bobinador com a variação de diâmetro do bobinado. Evitando, assim, que o bobinamento cause qualquer efeito na espessura da fita em verde (JABBARI *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2012).

De forma similar, a pressão hidrostática diminui à medida que a altura do reservatório diminui e o efeito na espessura da fita pode ser visto na Figura 15 (JABBARI *et al.*, 2016). Para mitigar esse efeito, Mistler e Twiname (2000) apresentam um alimentador de barbotina controlado por uma válvula de controle e a um sensor de nível que mantém constante a altura do reservatório, ilustrado na Figura 16. Outra forma de atenuação é o uso de duas lâminas na construção do *doctor blade*, como ilustrado na Figura 17. Nesta configuração, a primeira lâmina mantém a altura de barbotina praticamente constante à montante da segunda, que trabalha como uma ferramenta de acabamento (LIU *et al.*, 2012).



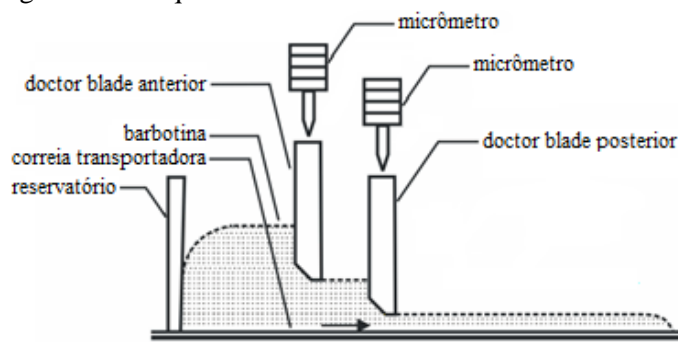
Fonte: Adaptado de Jabbari (2016).

Figura 16 – Esquemático de *doctor blade* com alimentador de barbotina



Fonte: Adaptado de Mistler e Twiname (2000).

Figura 17 – Esquemático de *doctor blade* com duas lâminas



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2012).

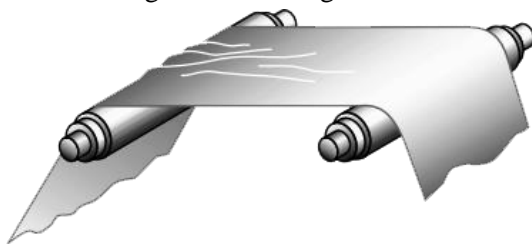
Jabbari *et al.* (2016) e Liu *et al.* (2012) analisaram modelos matemáticos para estimar a espessura da fita em verde de acordo com as variáveis primárias do processo e demonstraram a importância do controle destas variáveis para a obtenção de fitas de espessura constante. Neste trabalho, discutimos apenas aquelas que são pertinentes à máquina: velocidade da correia, abertura e largura da lâmina, pressão hidrostática do reservatório.

### 2.2.3 Tensão de bobinamento

O controle adequado da tensão de bobinamento em máquinas que utilizam os princípios desenvolvidos por Park resulta em produtos de maior qualidade e com maior rendimento. Por exemplo, se a tensão não for devidamente controlada, podem aparecer rugas no material (Figura 18), as camadas externas podem esmagar as camadas internas (Figura 19), ou as camadas internas podem se encurtar (Figura 20) resultando em um produto defeituoso (CLEVELAND MOTION CONTROLS, 2002).

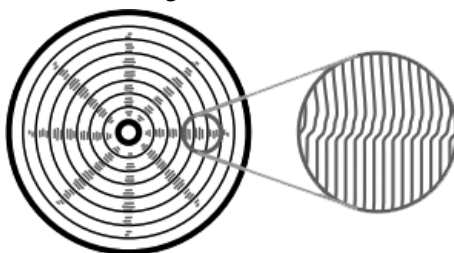
A tensão adequada depende da espessura e do tipo de material sendo bobinado. E o seu controle, geralmente, é feito com o uso de freio no desbobinador e/ou de esticadores ao longo do processo (CLEVELAND MOTION CONTROLS, 2002).

Figura 18 – Enrugamento



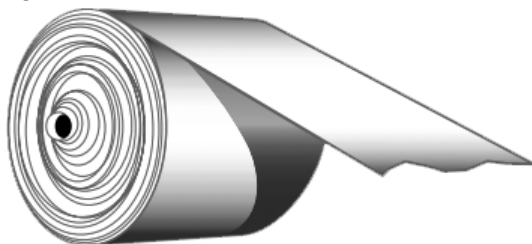
Fonte: Cleveland Motion Controls (2002).

Figura 19 – Esmagamento de camadas internas



Fonte: Cleveland Motion Controls (2002).

Figura 20 – Encurtamento de camadas internas



Fonte: Cleveland Motion Controls (2002).

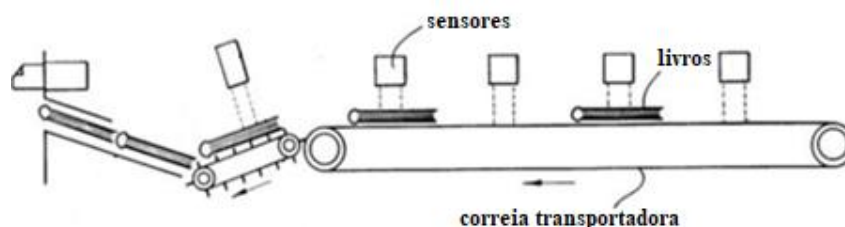
### 2.3 Coletora de livros

A devolução automática de livros faz parte do conceito de Manuseio Automatizado de Materiais, do inglês *Automated Materials Handling* (AMH), que se refere a qualquer automação que reduz ou elimina a necessidade de funcionários para realizar a identificação, seleção ou transporte de materiais. Em seu estágio mais simplificado, temos um sistema simples de devolução automática de livros com uma máquina transportadora, com subsequente separação dos livros e armazenamento destes em caixas. Este tipo de sistema pode funcionar integrado ao sistema de controle da biblioteca e registrar as devoluções automaticamente através da leitura de código de barras ou RFID (GALECIA GROUP, (2021).

Existem vários sistemas de transporte do livro da interface com o usuário até o sistema de armazenamento. A fim de garantir confiabilidade ao processo de transporte, pode-se utilizar correias transportadoras ou rolos de transporte. Isso se deve à baixa carga total do

sistema, leveza e simplicidade do projeto associado a essa forma de transporte. A Figura 21., retirada da patente WO96/32207 de Naylor (1996), ilustra a utilização de correias transportadoras para transporte de livros.

Figura 21 – Imagem da patente WO96/32207



Fonte: Adaptado de Naylor (1996).

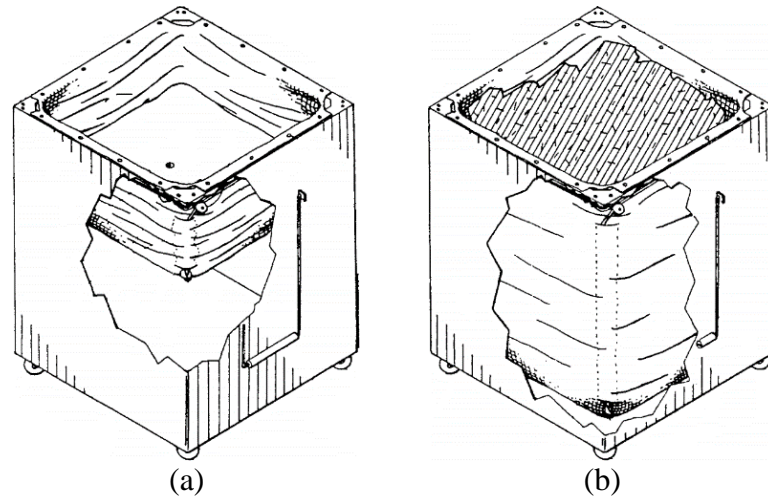
O sistema de armazenamento serve como um pulmão para os livros devolvidos até que algum funcionário transfira os livros para suas respectivas prateleiras. Em um cenário totalmente automatizado, o sistema de armazenamento seria inexistente e ocorreria uma transferência direta do livro para o seu local de destino, contudo há diversas complicações para a realização desse sistema e Diebold (1952, p.181), acrescenta: “Um trabalho de automatização de 80 a 90% pode reduzir bastante o custo. Caso se tentasse automatizar os 10 a 20% restantes do projeto, todo o sistema poderia se tornar economicamente inviável”. Para simplificar instalações e reduzir custos, a utilização de carros de armazenamento, como o da Figura 22, é mais comum atualmente. Estes carros costumam ter o fundo móvel, com sistemas que mantêm a sua altura constante a fim de minimizar o impacto da queda do livro sobre eles. A Figura 23 ilustra um destes sistemas, que atua com a compensação de peso dos livros através de elementos elásticos embutidos na bolsa retrátil.

Figura 22 – Carro de armazenamento da Arfido



Fonte: Arfido (2018).

Figura 23 – Esquemático de carro com fundo móvel, posições: (a) retraído; (b) estendido



Fonte: Adaptado de Homel e Swagel (1992).

#### 2.4 Metodologia de projeto

A atividade “projeto” é objeto de estudo de vários autores. Asimow (1968) a define como “uma atividade orientada para atender as necessidades humanas, principalmente aquelas que podem ser satisfeitas por fatores tecnológicos da nossa cultura”. Para o Guia PMBOK (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE - PMI, 2013), “projeto é um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo”. Frazzon *et al.* (2015) dizem que a atividade está inserida dentro do processo de desenvolvimento de produto que, por sua vez, é parte do ciclo de vida do produto. De toda forma, para realizá-lo de maneira eficiente e objetiva, os autores convergem na necessidade de utilizar metodologias com procedimentos, instrumentos de análise e desenvolvimento.

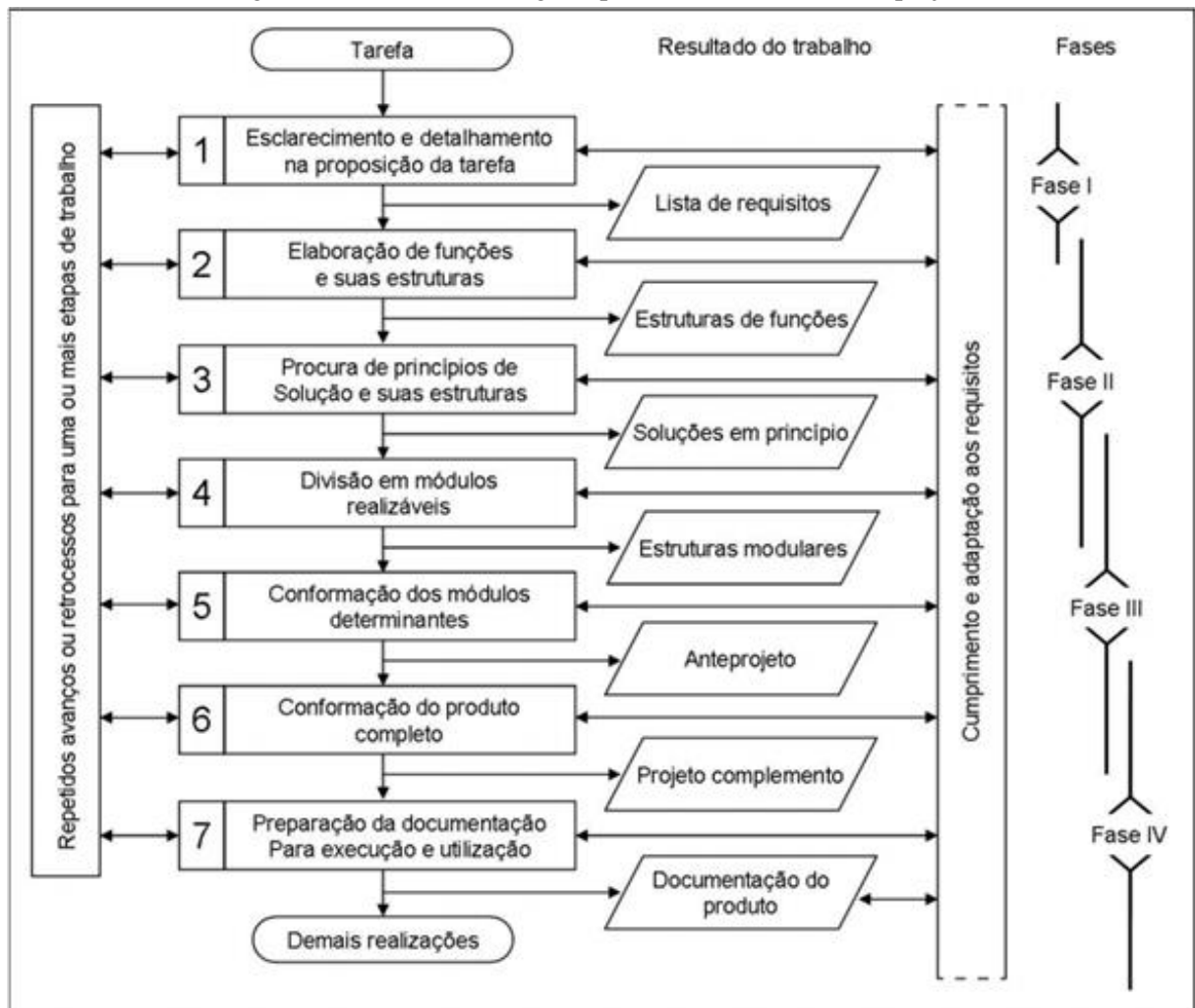
Pahl *et al.* (2007) explicam que a atividade de projeto se origina por uma demanda de inovação, adaptação ou alteração de um produto ou serviço. Eles descrevem o desdobramento do procedimento geral de desenvolvimento de um projeto como o apresentado na Figura 24, dividindo-o em quatro fases principais:

- Fase I – Projeto informacional: fase de especificações, ela mostra o ponto de partida do problema, constata uma necessidade, faz uma avaliação das demandas do cliente. Apresenta uma especificação de produto através de uma lista de requisitos (ROZENFELD *et al.*, 2012).
- Fase II – Projeto conceitual: fase de descrição da tecnologia, dos princípios de funcionamento e da forma do produto. Descreve como o produto irá satisfazer as necessidades dos clientes (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002).



- Fase III – Projeto preliminar: nesta fase é feita a análise de possíveis soluções e a validação de conceitos com o uso de protótipos físicos ou virtuais. Avança-se na especificação dos módulos e componentes (PAHL *et al.*, 2007).
- Fase IV – Projeto detalhado: fase de especificação definitiva de forma, dimensões, componentes e outros itens que formam o produto. O detalhamento contém informações suficientes para se implementar o produto ou serviço (ARAUJO, 2009).

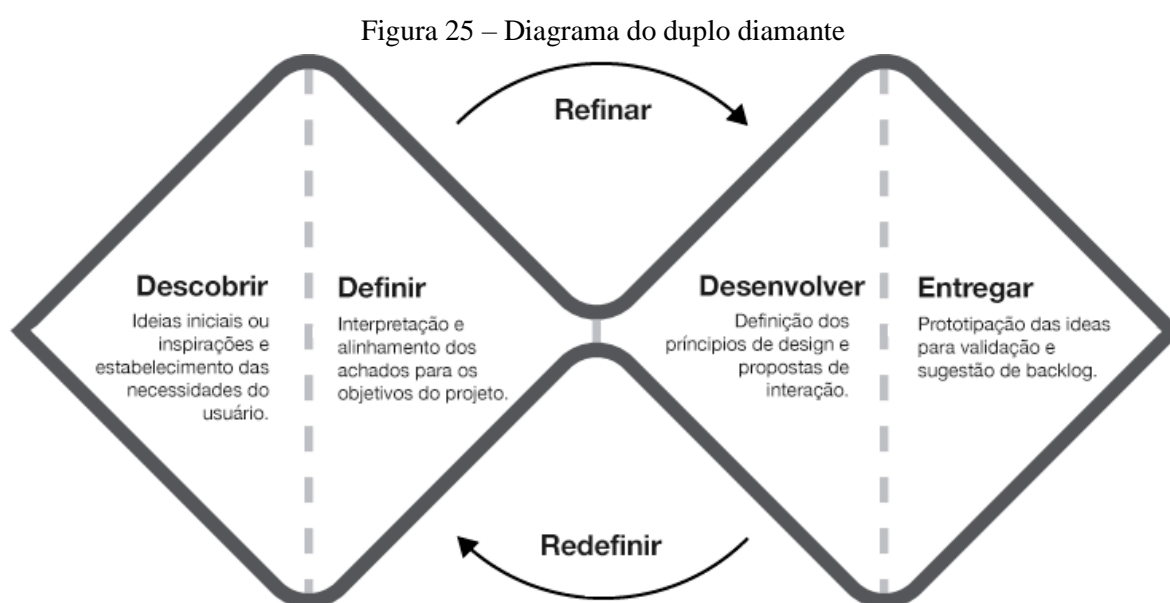
Figura 24 – Procedimento geral para desenvolvimento de projeto



Fonte: Adaptado de Pahl *et al.* (2007).

Ashby (2005) adiciona que o processo de desenvolvimento é interativo e as etapas são realimentadas a cada passo com novas informações, podendo ser retomadas para o aprimoramento do desempenho, redução de custos ou adaptação a mudanças de requisitos e condições do mercado.

Para Brown (2017), a forma como projetistas pensam tende ao processo conhecido como “duplo diamante”, ilustrado na Figura 25, o qual mapeia as quatro fases do processo de criação e se relaciona diretamente com as fases de desenvolvimento de projeto descritas por Pahl *et al.* (2007). Duas fases são divergentes, com expansão de ideias e propostas de soluções: descobrir e desenvolver. Duas fases são convergentes, delineadas pelas tomadas de decisões, testes e validações que definem o caminho do desenvolvimento e o produto ou serviço em si: definir e entregar. Executá-las de forma sistemática e orientada é fundamental para o sucesso do projeto.



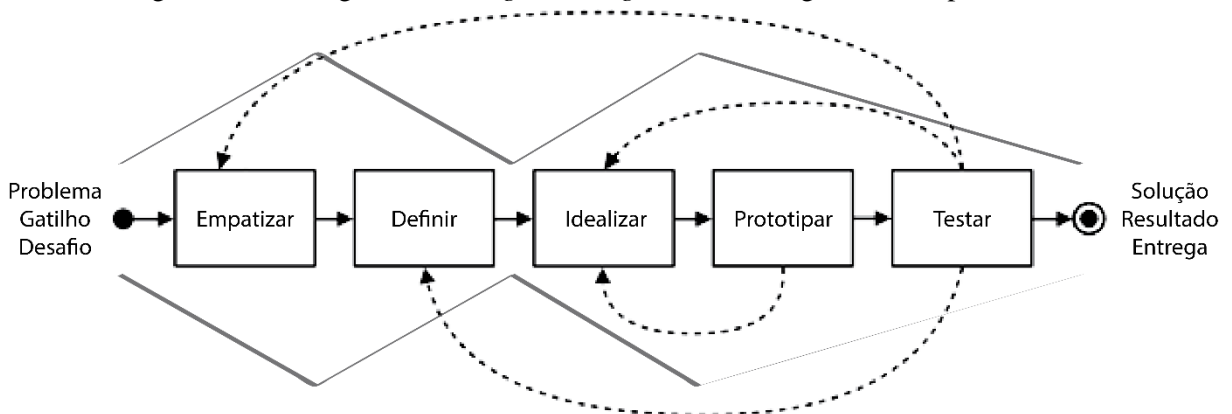
Fonte: Mourão (2016).

Desta forma, Brown (2017) propõe que os conceitos e soluções sejam avaliados e testados a todo momento, tanto pelo projetista quanto pelo usuário, para acelerar o processo de desenvolvimento e direcionamento do produto às expectativas do cliente. Assim, prototipar desde o começo do projeto permite transitar em três espaços de inovação: inspiracional, por inspirar novas ideias e gerar novos protótipos; de idealização, por permitir assegurar que as ideias incorporam os elementos funcionais e emocionais necessários para atender a demanda do mercado; e de implementação, por dar clareza o suficiente à uma ideia para ela ser aceita pelo cliente, evidenciando que ela funcionará em seu mercado-alvo.

Esta proposta de Brown (2017) faz parte do *design thinking*, apresentado por ele como uma disciplina que visa combinar a sensibilidade do projetista com métodos de inovação para atender às necessidades das pessoas com soluções tecnicamente possíveis e financeiramente viáveis e, desse modo, criar valor ao cliente. Carvalho (2019, p.1) o descreve como um

processo de projeto iterativo (com repetição de etapas) em conjunto com ferramentas utilizadas para “entender o usuário, desafiar suposições e redefinir problemas na tentativa de identificar estratégias e soluções alternativas que podem não ser instantaneamente aparentes com o nosso nível inicial de entendimento”. A Figura 26 ilustra a divisão deste processo em cinco estágios e como eles se relacionam ao diagrama do duplo diamante. Os cinco estágios são:

Figura 26 – Fluxograma do *design thinking* associado diagrama do duplo diamante



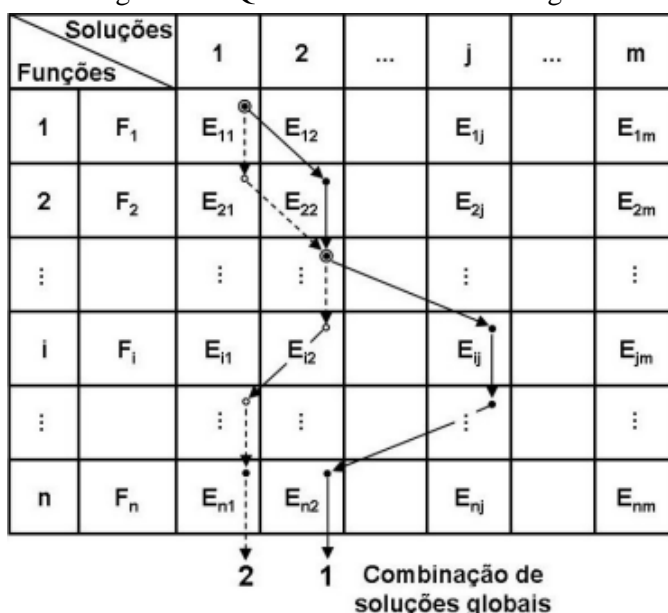
Fonte: Adaptado de Carvalho (2019).

- **Empatizar:** envolve o desenvolvimento de um senso de empatia com as pessoas para as quais você está projetando”, com a intenção de descobrir o que elas precisam e querem (CARVALHO, 2019).
- **Definir:** estágio em que as descobertas são analisadas, definidas e refinadas como problemas significativos nos quais o projetista se concentrará nas soluções (DESIGN COUNCIL, 2007).
- **Idealizar:** o principal objetivo dessa etapa é “usar a criatividade e a inovação para gerar um grande número de ideias a fim de encontrar soluções melhores, mais elegantes e satisfatórias para os problemas que afetam a experiência do usuário com o produto” (CARVALHO, 2019, p1.).
- **Prototipar:** etapa de desenhar e construir modelos, funcionais ou não, que permitam avaliar uma ideia e levá-la adiante (BROWN, 2017).
- **Testar:** é o estágio de teste das ideias e soluções implementadas. Apesar de ser mais comum que os testes sejam realizados juntos ao estágio de prototipagem, testar permite alimentar a maioria dos demais estágios. Testar permite simpatizar e compreender melhor os

usuários, levando a novas descobertas que mudam a definição do problema ou gerando novas ideias e um novo protótipo (BROWN, 2017; CARVALHO, 2019).

Araujo (2009) e Pahl *et al.* (2007) ressaltam que várias opções podem satisfazer a mesma característica de projeto e sugerem que utilizar a ferramenta de análise morfológica permite ter uma visão geral das possíveis combinações de soluções, auxiliando a tomada de decisão. Nesta ferramenta, um quadro é montado com as possíveis soluções para cada estrutura de função e, sobre ele, são traçados linhas para as combinações de soluções escolhidas, como ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Quadro de análise morfológica



Fonte: Adaptado de Pahl *et al.* (2007).

O conceito de Projeto para a Manufatura e Montagem (DFMA) sugere princípios a serem seguidos durante o desenvolvimento de equipamentos que resultam em: redução de custo, tempo de fabricação e montagem, aumento da qualidade, sustentabilidade, confiabilidade e segurança dos produtos (BOOTHROYD *et al.*, 2010). Tahara (2008) listou alguns destes princípios:

- Projetar para um número mínimo de componentes;
- Projetar componentes para serem multifuncionais;
- Padronizar materiais, acabamentos e componentes;
- Utilizar componentes e processos padronizados;
- Utilizar abordagem de projeto modular;

- Utilizar montagem unidirecional;
- Facilitar alinhamento e inserção de todos os componentes;
- Eliminar parafusos, molas, roldanas, chicotes de fios, etc.;
- Eliminar ajustes;
- Considerar possibilidades de automação;
- Utilizar e promover o trabalho em equipe.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho trata do desenvolvimento de três máquinas baseadas em transportadores de correia e foi dividido em dois casos que compartilham especificações de componentes, subconjuntos e a metodologia de projeto utilizada.

Os desenvolvimentos seguiram as fases de projeto descritas por Pahl *et al.* (2007): fase informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Em cada fase, foram aplicadas ferramentas do *design thinking* para auxiliar a compreensão e descrição dos problemas, exploração e teste de ideias e soluções, ferramentas para o auxílio de tomada de decisão e conceitos de DFMA para auxiliar o desenvolvimento de projetos e equilibrar os custos de desenvolvimento, fabricação e montagem.

#### 3.1 Fase informacional

Durante as pesquisas e observações realizadas, com o intuito de compreender as demandas dos clientes, como sugere Carvalho (2019), foi assumida a mentalidade de um iniciante no tema, deixando suposições e experiências prévias de lado. Esse posicionamento permitiu fazer observações puramente factuais, sem julgamento ou influência oriunda de vícios de projeto e desenvolvimento.

Ao receber as demandas dos clientes, eles foram questionados sobre “o que”, “como” e “por quê” queriam as máquinas. Estas três perguntas permitiram direcionar as observações para motivações mais abstratas e elucidar demandas que não estavam claras na comunicação das solicitações de projeto. Após o esclarecimento e detalhamento das proposições de projetos, foram feitos estudos de literaturas, patentes e soluções comerciais buscando princípios de funcionamento, principais características, parâmetros e elementos de máquinas para atender as demandas dos clientes. Devido às demandas elencadas, os casos tiveram outras atividades distintas de investigação e observação descritas nos itens 3.1.1 e 3.1.2 (BROWN, 2017; CARVALHO, 2019; UNIVERSITY OF COPENHAGEN, 2018).

As informações obtidas nessa etapa foram analisadas em conjunto com os clientes e embasaram as declarações dos problemas a serem solucionados em cada projeto, sintetizadas na forma de listas de requisitos. Durante as elaborações das listas, foi constante o questionamento de “por que” cada requisito deveria compô-las. Este questionamento permitiu perceber requisitos muito abstratos e possibilitou declará-los de maneira mais específica e significativa.

### 3.1.1 Estudo de caso – *Tape casting*

No estudo de caso de *tape casting* foram desenvolvidas e implementadas duas máquinas. A primeira surgiu a partir da solicitação do SIMMAC (EESC – USP) que, devido às dificuldades de aquisição de uma máquina comercial que atendesse às demandas do grupo de trabalho, solicitou a construção de uma máquina de projeto original e personalizado. A segunda veio da solicitação da FEB (UNESP) para construção de uma máquina similar e, para a qual, foram propostas melhorias no projeto.

No desenvolvimento da segunda máquina, foi possível entrevistar membros do SIMMAC e levantar sugestões de melhoria. A utilização da máquina por esses usuários foi observada para encontrar gargalos que podem passar despercebidos para um usuário já acostumado às suas características de funcionamento. Após a observação dos usuários habituais, a máquina foi operada pelo autor em uma imersão completa no ambiente dos usuários, aumentando a percepção das dificuldades de utilização, com a intenção de encontrar as soluções mais adequadas.

### 3.1.2 Estudo de caso – Coletora de livros

Este estudo de caso tratou da melhoria da infraestrutura da Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes (EESC – USP). Por isso, foram realizados levantamentos e medições da infraestrutura atual e, com o propósito de automatizar parte do manuseio de materiais, foi observado e mapeado o caminho percorrido pelos livros ao serem devolvidos pelos usuários.

## 3.2 Projeto conceitual

Após a elaboração das listas de requisitos, significativos e acionáveis, que permitissem a idealização de soluções de maneira orientada a objetivos, foram realizadas sessões de *brainstorming* com o intuito de gerar um grande número de ideias, encontrar as melhores soluções e elaborar os conceitos das máquinas.

Nessas sessões, foram utilizadas as ferramentas de *brainwalking* e SCAMPER para orientar os trabalhos. Para tal, soluções encontradas no mercado, na literatura ou desenvolvidas por alunos de graduação na disciplina do SEM0534 – Projeto Mecânico foram previamente escolhidas como ponto de partida e, então, foi seguida uma sequência de Substituição, Combinação, Adaptação, Modificação, Proposição, Eliminação e Reorganização de soluções até a obtenção de conceitos enxutos e executáveis que atendessem às expectativas dos clientes e respeitassem os requisitos de projeto (OSBORN, 1953; RODRIGUES, 2020; UNIVERSITY OF COPENHAGEN, 2018).



### 3.3 Projeto preliminar

Para executar os projetos preliminares, as máquinas foram divididas em módulos de estruturas funcionais e várias iterações às fases informacional e conceitual foram realizadas para desenvolver cada módulo.

Quadros morfológicos foram elaborados e analisados para definir as soluções a serem implementadas nas máquinas. A ferramenta das “4 categorias” foi utilizada para auxiliar a análise e tomada de decisão em alguns módulos. Nela, as soluções são classificadas entre quatro categorias: a escolha racional, a que mais encanta, a querida e a arriscada/improvável. Classificá-las desta forma orienta a discussão da equipe para cobrir todos os motivos da escolha, desde o mais prático até o com maior potencial de sucesso (CARVALHO, 2019; PAHL *et al.*, 2007; UNIVERSITY OF COPENHAGEN, 2018).

Uma vez que as soluções foram escolhidas, os módulos foram desenvolvidos de acordo com os princípios de DFMA e integrados com a construção de modelos digitais 3D.

#### 3.3.1 Sistema de acionamento

O sistema de acionamento de transportadores por correia, geralmente, é dimensionado através dos métodos CEMA ou Prático (MALAGONI; SANTOS, 2014). Eles são otimizados para transportadores de grandes dimensões e alta capacidade de transporte de itens a granel, os parâmetros tabelados não abrangem os parâmetros deste trabalho. Portanto, neste trabalho, foi utilizado o método teórico de Gürocak (2016) para dimensionamento e seleção de motores e transmissões.

### 3.4 Projeto detalhado

Para construir os modelos digitais 3D e realizar os detalhamentos das peças e conjuntos mecânicos das máquinas, foi utilizado o software SOLIDWORKS®.

Os diagramas funcionais e *layouts* elétricos foram desenvolvidos no software AutoCad®.

### 3.5 Estudo de caso – Coletora de livros

Este projeto teve início na disciplina do SEM0534 – Projeto Mecânico em 2017, na qual 15 alunos se mobilizaram para estudar o assunto. Posteriormente, em 2018/2019, a aluna de iniciação científica do PUB/USP, Iasmin Cristina Santana Santos, estudou assuntos relacionados à automação da identificação e registro da devolução dos livros. Em 2020, a pandemia de COVID-19 tornou o projeto imprescindível e emergencial. Os bibliotecários

estavam em trabalho remoto, a recepção de livros no balcão foi interrompida e a devolução sem contato interpessoal se tornou essencial. Assim, o projeto precisava evoluir rapidamente de estudos com propósitos acadêmicos para o projeto de equipamento implementável. Devido a analogia com transportadores de correia, o projeto foi incorporado neste trabalho.

Para acelerar o desenvolvimento e a implementação do projeto, uma equipe multidisciplinar foi formada entre as partes interessadas (*stakeholders*) do projeto, com pessoas de diferentes áreas, capazes de tomar decisões rápidas e agregar diferentes visões e conhecimentos ao equipamento. Esta equipe contribuiu na fase informacional, na elaboração do conceito e assumiu a responsabilidade pela construção da máquina após a aprovação do projeto detalhado. Ela foi formada por:

- Sergio Gomes Machado Filho (Engenheiro Mecânico) – Projetista;
- Elenise Maria de Araújo (Chefia do Serviço de Biblioteca) – Cliente;
- Andressa de Carvalho (Serviço de Biblioteca) – Usuária;
- Eduardo Graziosi Silva (Chefia do Atendimento ao Usuário) – Usuário;
- Alexandre da Silva Machado (Engenheiro de Controle e Automação) – Consultor;
- Carlos Alberto Fortulan (Professor da disciplina Projeto Mecânico) – Consultor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estudo de caso – *Tape casting*, SIMMaC

#### 4.1.1 Fase informacional

A partir dos princípios e modelos de funcionamento encontrados na revisão bibliográfica foi concluído que a colagem de fitas cerâmicas é baseada na deposição de uma fita fina e uniforme de barbotina cerâmica sobre uma superfície e, na sequência, a remoção da parte orgânica por volatilização de veículos orgânicos.

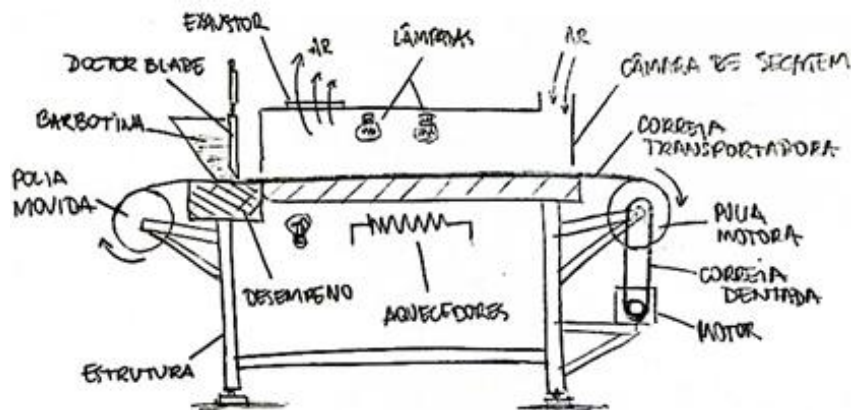
Pela demanda apresentada pelo SIMMaC, era esperado que a máquina atendesse a produção de fitas cerâmicas em baixa escala e tivesse dimensões condizentes com o espaço disponível nas dependências do laboratório. Para atender esta expectativa, foi elaborada a lista de requisitos:

- Dimensões máximas do equipamento:
  - Comprimento: 2 m;
  - Largura: 0,6 m;
- Largura de colagem da fita: 100 a 200 mm;
- Espessura de colagem da fita: 0,3 a 5 mm;
- Velocidade de colagem da fita: 5 mm/s;
- Bobinamento da fita verde;
- Possibilidade de aquecimento da câmara de secagem até 50 °C.

#### 4.1.2 Projeto conceitual

A partir da lista de requisitos, o bobinamento da correia transportadora junto à fita em verde foi usado como base para elaboração do conceito funcional da máquina. A Figura 28 mostra o esboço deste conceito, no qual podemos identificar algumas estruturas de funções. O *doctor blade* foi posicionado sobre a superfície plana e de baixa rugosidade de um desempenho de granito natural. A câmara de secagem foi elaborada com um material rígido e transparente que permite a instalação de um exaustor, lâmpadas incandescentes e/ou resistências para aquecimento do ambiente interno além de permitir a visualização do processo. O acionamento da correia transportadora foi desenhado com um motor acoplado ao eixo bobinador e com ajuste de velocidade.

Figura 28 – Esboço elaborado para o equipamento de *tape casting*



Fonte: Autor.

#### 4.1.3 Projeto preliminar

Após a elaboração do conceito, a máquina foi subdividida em estruturas modulares e foi realizada a análise morfológica para avaliar e selecionar as melhores soluções para estes módulos, visando melhor atender as expectativas do cliente/usuário. Os critérios para seleção, neste caso, foram: custos de matéria-prima, custos de fabricação, nível de especialização de mão de obra necessária para fabricação e montagem, versatilidade, durabilidade, manutenção, possibilidade de alterações.

O Quadro 1 resume os módulos principais (linha) e possíveis soluções (colunas) para cada um deles. A linha tracejada vermelha indica as soluções selecionadas, gerando novas delimitações de projetos:

- *Doctor blade*: Foi preferida uma construção mais simples e de menor custo, com apenas uma lâmina de fundo plano e largura menor que 12,7 mm (Figura 14a). Assumindo que o pequeno volume de material utilizado em cada lote de produção junto a baixa velocidade de colagem da fita minimiza o efeito da variação da altura no reservatório na espessura da fita, foi selecionado o controle da altura de forma manual pelo operador.

- *Estrutura*: Tradicionalmente, estruturas de máquinas de precisão são robustas e pesadas para reduzir deformações e vibrações. Porém, foi deliberado o projeto de uma estrutura leve e de fácil movimentação dentro do espaço compartilhado do laboratório de pesquisa, resistente a corrosão e com baixa necessidade de manutenção no longo prazo. O uso do aço inoxidável era inviável devido ao alto custo de material e fabricação, então, foi adotada a fabricação em alumínio, com perfis aparafusados para reduzir os custos de serviços terceiros e mão-de-obra.

- Câmara de secagem: Na elaboração do conceito, foi determinado a utilização de uma cobertura transparente para permitir a visualização constante do experimento, o que excluiu os materiais metálicos das possíveis opções. Então, foi escolhido o PETG, material de fabricação nacional, baixo custo e com boas propriedades mecânicas. Para que a fita seque em uma superfície plana, com boa estabilidade térmica e dimensional, foi decidido apoiá-la em uma placa de vidro. O uso de vidro visou, também, permitir a instalação de lâmpadas UV sob a placa de vidro para a utilização de barbotinas com resinas foto polimerizáveis com polimerização simultânea nas duas faces da fita. Para o controle da exaustão, foi proposto o uso de um potenciômetro para ajustar a velocidade de rotação da ventoinha.
- Acionamento: O motor elétrico mais utilizado no acionamento de correias transportadoras é o de indução com corrente alternada devido a sua relação quase linear de torque e velocidade entre os pontos de operação (CEMA, 1997). Sabendo disto, ele foi escolhido para ser utilizado neste projeto. Para a transmissão, foram escolhidas correias dentadas, que possuem alta eficiência de transmissão e permitem adaptar as posições de montagem dos componentes. Assim como para a exaustão, o controle manual da velocidade do motor foi escolhido e, para tal, foi decidido usar um inversor de frequência. O desenvolvimento de um controle automático foi descartado devido ao prazo de entrega da máquina e ao custo de aquisição de sensores.

Quadro 1 - Análise morfológica do equipamento de *tape casting*

<i>Doctor blade</i>	Lâminas	Uma	Duas			
	Formato	A	B	C	E	F
	Controle de altura no reservatório	Manual	Alimentador			
Estrutura	Material	Aço Carbono	Aço Inoxidável	Alumínio		
	Fabricação	Chapa dobrada	Tubos soldados	Perfis aparafusados		
Câmara de secagem	Material	Aço Carbono	Aço Inoxidável	Alumínio	Policarbonato	PETG
	Controlador do exaustor	Liga/Desliga	Potenciômetro	Automático		
	Suporte da correia	Roletes	Chapa de aço	Chapa de alumínio	Placa de vidro	
Acionamento	Motor	Passo	Servo	AC		
	Controlador	Capacitor de partida	Inversor de frequência	Automático		
	Transmissão	Acoplamento	Engrenagens	Correia dentada	Corrente	

Fonte: Autor.

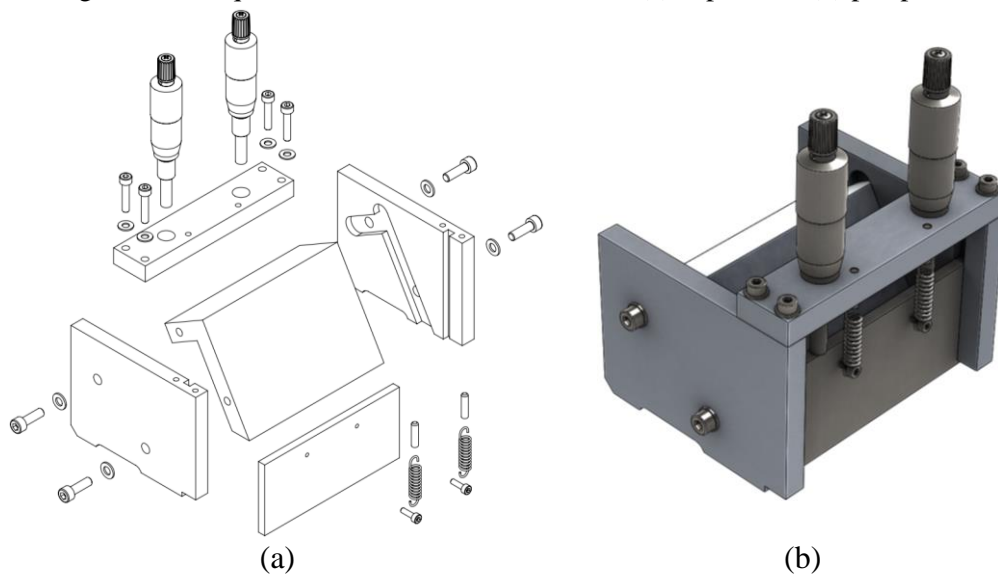
#### 4.1.3.1 *Doctor blade*

O reservatório foi projetado para o volume de 100 ml de barbotina e colagem de fitas com 100 mm de largura. A seção desenhada é semelhante à um funil para facilitar o escoamento da barbotina e evitar a sedimentação. Sua construção em alumínio e montagem com peças sólidas e encaixadas garante rigidez estrutural e uma manutenção simples. A lâmina fabricada em aço inoxidável AISI 420 temperado, retificado e polido, minimiza os efeitos abrasivos da barbotina e visa facilitar o seu escoamento, proporcionando melhor acabamento superficial à fita.

A abertura da lâmina foi desenhada com molas em contraposição a dois cabeçotes micrométricos, responsáveis por definir a posição da lâmina. Slocum (1992) sugere que componentes de máquinas de precisão devem ter resolução mínima de 1/10 daquela esperada para o item que será fabricado, portanto, foram selecionados micrômetros de precisão de 0,01 mm para atender ao requisito de precisão de ajuste da abertura de 0,1 mm.

O projeto preliminar é apresentado no desenho esquemático da Figura 29.

Figura 29 – Esquemático do *doctor blade*, vistas: (a) explodida; (b) perspectiva

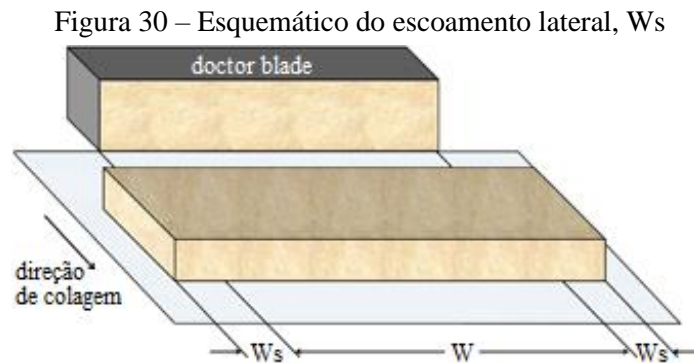


Fonte: Autor.

#### 4.1.3.2 Correia transportadora

Foi selecionado um filme de poliéster siliconado como esteira transportadora. Segundo o fabricante DuPont<sup>TM</sup>, ele possui estabilidade dimensional, grande capacidade de isolamento elétrica, alta resistência mecânica e microestrutura pouco orientada, sendo esta última característica interessante para a polimerização UV em ambos os lados da fita.

Para permitir a colagem de fitas com até 200 mm de largura, considerando o escoamento lateral ilustrado por Jabbari *et al.* (2016) na Figura 30, a largura do filme foi definida em 240 mm.

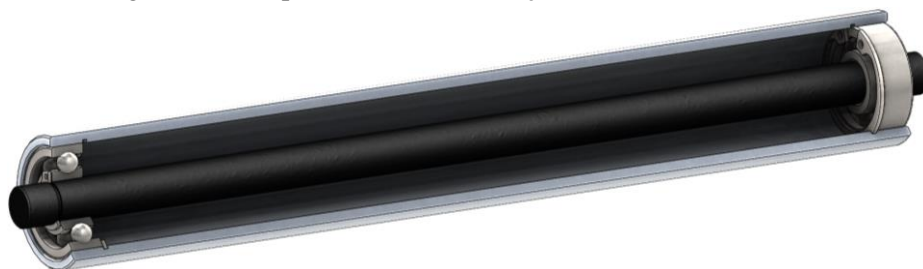


Fonte: Adaptado de Jabbari *et al.* (2016).

#### 4.1.3.3 Tambores e roletes

Os tambores e roletes tiveram a mesma construção e foram projetados para minimizar o número de componentes. Buscando também dimensões mínimas, foi decidido utilizar o menor diâmetro de flexão do filme recomendado pelo fabricante. Então, o projeto do conjunto foi realizado com um tubo redondo de alumínio com diâmetro externo de 1.1/2" e espessura de parede 1/8", um eixo em aço prata retificado com  $\text{Ø}12\text{h}6$  mm e mancais de rolamentos rígidos de esferas, como ilustrado na Figura 31. Estas dimensões de componentes são padrões de fornecimento dos fabricantes e adotá-las no projeto reduz processos de usinagem.

Figura 31 – Esquemático da construção dos tambores e roletes



Fonte: Autor.

Para centrar a bobina de filme de poliéster no tambor desbobinador, foram desenvolvidas buchas expansíveis inspiradas em pinças de fresadoras. A montagem da bucha no tambor é ilustrada na Figura 32.

Figura 32 – Bucha expansível, vistas: (a) perspectiva; (b) montagem



Fonte: Autor.

#### 4.1.3.4 Estrutura

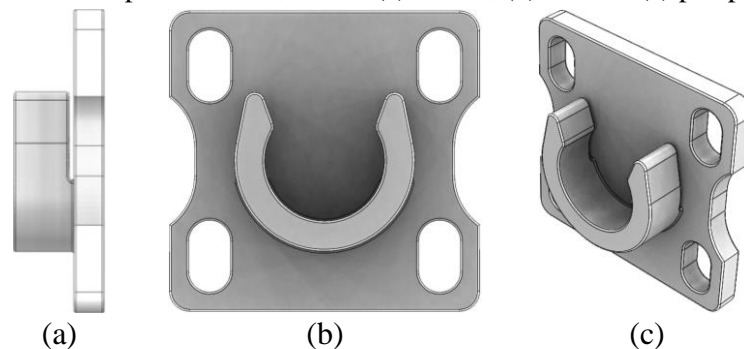
A estrutura foi desenhada com o uso de perfil de alumínio extrudado que possui boa relação entre resistência mecânica e peso, além de boa resistência à corrosão. Este perfil tem custo acessível, montagem fácil e flexível e possibilita a instalação posterior de acessórios apenas com elementos de fixação, sem a necessidade de usinagem ou solda.

A câmara de secagem foi elaborada com uma placa de vidro para apoiar a fita em verde sem permitir abaulamento da correia. A cobertura da câmara foi desenhada com uma placa dobrada de PETG e um exaustor de 120 mm acoplada a ela.

Um desempenho de granito natural foi usado para apoiar o *doctor blade*.

Os tambores e roletes foram apoiados em suportes de eixo com encaixe rápido, ilustrados na Figura 33, fabricados em ABS por impressão 3D.

Figura 33 – Suporte de eixo, vistas: (a) lateral; (b) frontal; (c) perspectiva



Fonte: Autor.

A montagem geral da estrutura é ilustrada na Figura 34.



Figura 34 – Esquemático do conjunto de montagem da estrutura

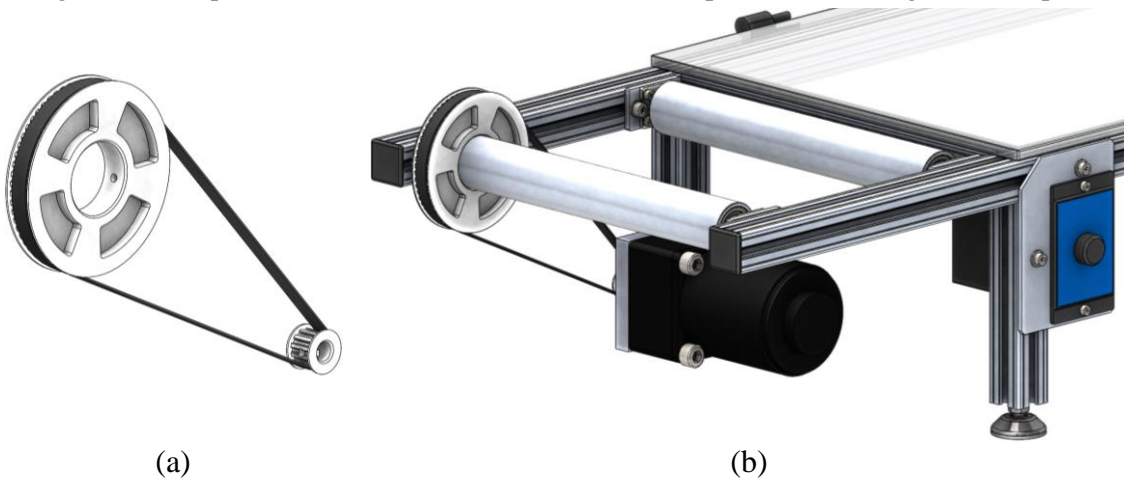


Fonte: Autor.

#### 4.1.3.5 Sistema de acionamento

Para o acionamento da correia, foi selecionado um motor elétrico de indução monofásico com potência de 25 W e um redutor planetário de relação 30:1. A acoplamento no tambor de acionamento foi projetado com uma correia sincronizadora e um par de polias com relação 5:1. A redução total foi de 150:1. Um inversor de frequência foi usado para controle da velocidade da correia. A Figura 35 ilustra a montagem do sistema de acionamento na máquina.

Figura 35 – Esquemático do sistema de acionamento: (a) polias; (b) montagem na máquina

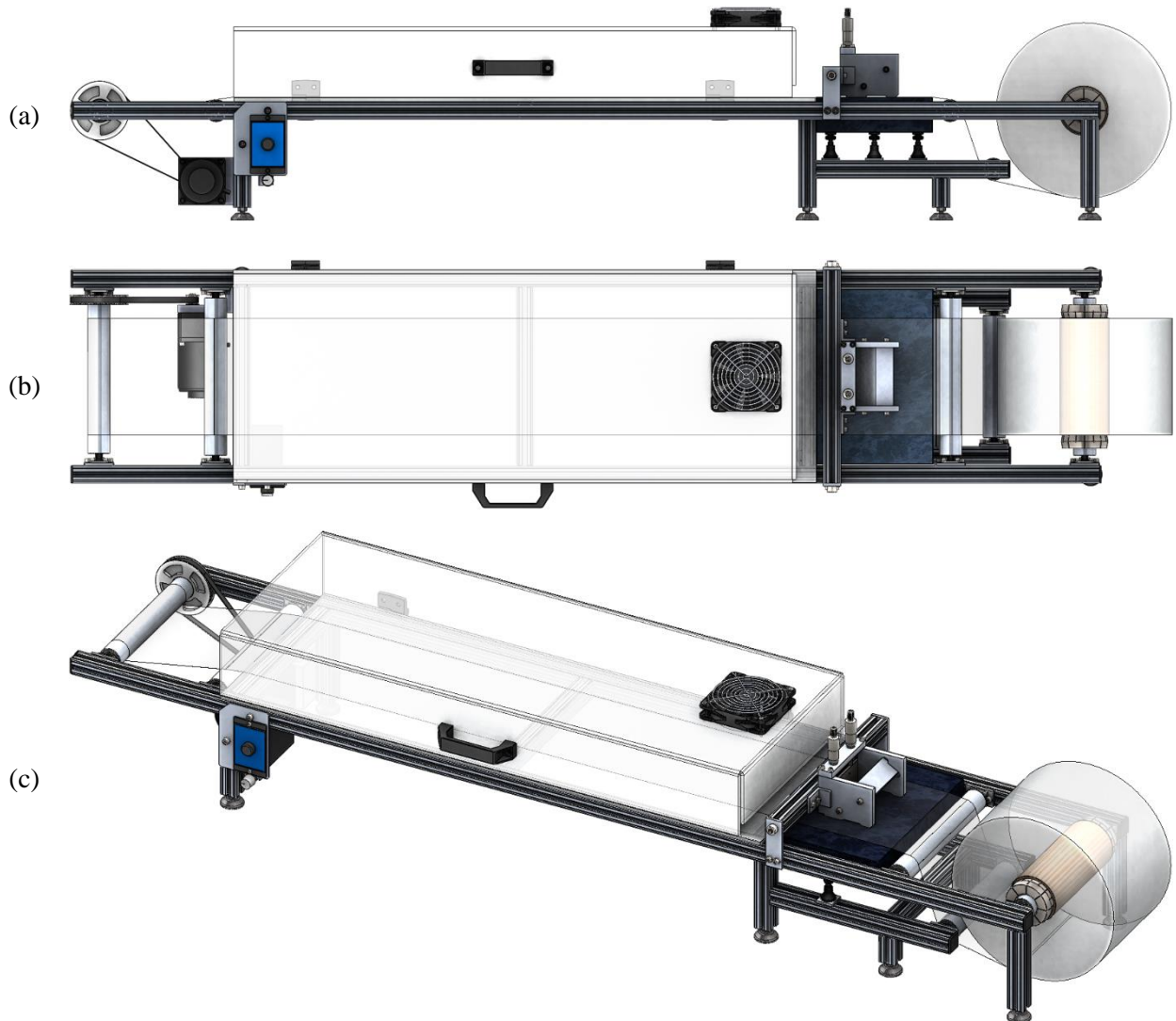


Fonte: Autor.

#### 4.1.4 Projeto detalhado

A Figura 36 ilustra a montagem geral da máquina após a finalização do projeto detalhado.

Figura 36 – Ilustração do equipamento de *tape casting*, vistas: (a) frontal; (b) superior; (c) perspectiva



Fonte: Autor.

#### 4.1.5 Fabricação e montagem

##### 4.1.5.1 Doctor blade

A fabricação do *doctor blade* demandou bastante atenção às tolerâncias dimensionais e de forma, a saber:

- Ajuste incerto entre a lâmina e o canal de deslizamento;
- Perpendicularismo entre a lâmina e a face inferior do reservatório;

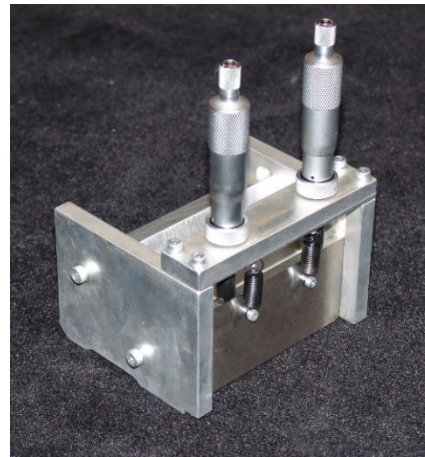
- Planicidade e rugosidade da face da lâmina em contato com a barbotina;
- Planicidade e rugosidade da face inferior do reservatório.

A Figura 37 mostra a lapidação da face inferior da estrutura, feita separada da lâmina devido à diferença de dureza entre elas, e o *doctor blade* finalizado.

Figura 37 – Fabricação do *doctor blade*: (a) lapidação; (b) montagem final



(a)



(b)

Fonte: Autor.

#### 4.1.5.2 Suportes de eixo, polias e castanhas

Suportes de eixo, polias do sistema de acionamento e castanhas de centragem do rolo de poliéster no desbobinador, mostrados na Figura 38, foram fabricadas por impressão 3D em ABS P430 com suporte solúvel P400SR ABS no equipamento Dimension Elite de FDM™ da fabricante Stratasys®.

Figura 38 – Peças em ABS fabricadas por impressão 3D



(a)



(b)

Fonte: Autor.

#### 4.1.5.3 Estrutura, acionamento e dispositivos elétricos

Os suportes de eixos foram montados na estrutura, como na Figura 39, e alinhados com auxílio de uma régua graduada e um nível de bolha. Na sequência, roletes, tambores, exaustor, motor e controles de velocidade também foram montados na estrutura.

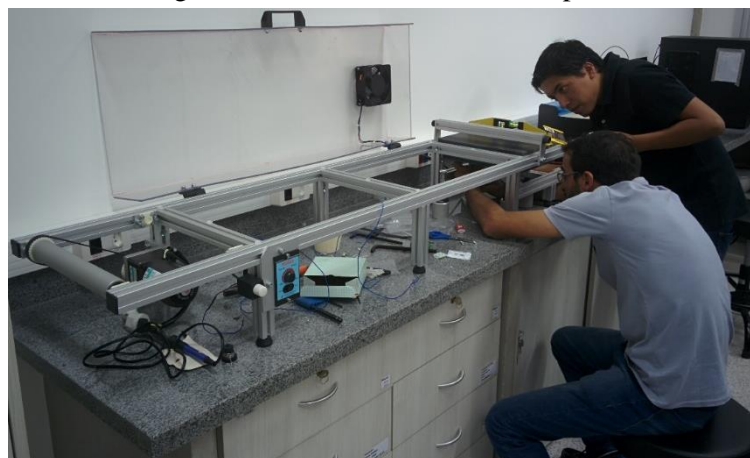
Figura 39 – Montagem dos suportes de eixo



Fonte: Autor.

Ao instalar o desempenho, foi notado que os locais indicados em sua face inferior para posicionar os macacos niveladores não estavam alinhados com o previsto no projeto. Então, o desempenho foi apoiado sobre a bancada ao invés de na própria estrutura da máquina. Foram feitos três apoios com tarugos de alumínio para ajustar a altura dos macacos e posicioná-los nos locais indicados pelo fornecedor. O nivelamento, apresentado na Figura 40, foi feito com o auxílio de um nível.

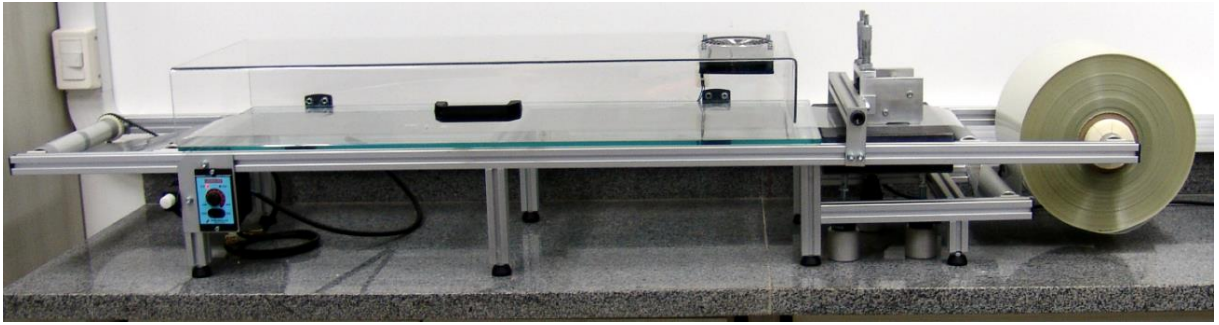
Figura 40 – Nivelamento do desempenho



Fonte: Autor.

A montagem final do equipamento é apresentada na Figura 41.

Figura 41 – Equipamento de *tape casting* construído para o SIMMaC



Fonte: Autor.

#### 4.1.6 Validação

A Figura 42 retrata o primeiro teste de colagem realizado na máquina, com a utilização de uma suspensão aquosa de alumina (Alcoa GS100) baseada no trabalho de Revelo (2019).

Figura 42 – Primeiro teste do equipamento de *tape casting*, SIMMaC



Fonte: Autor.

Durante a montagem e validação, foram observadas algumas falhas no equipamento:

- A flexão da estrutura com o peso em suspenso do rolo de poliéster denunciou sua baixa rigidez;
- A inércia de rotação do rolo de poliéster durante a colagem da fita promoveu um descontrole no desbobinamento do filme;
- A dificuldade no alinhamento dos roletes e tambores que foi acreditada ser devida aos muitos graus de liberdade e a falta de referências para posicionamento dos suportes;

- A fragilidade dos suportes que apresentaram fratura durante a montagem dos eixos ou após pouco tempo de uso;
- A distância entre o *doctor blade* e o controle do motor deixou difícil o ajuste de velocidade do filme e adição simultânea de barbotina no reservatório por um único operador;
- Falta do atendimento das normas de segurança.

Para corrigir algumas destas falhas, as seguintes adaptações foram feitas:

- Rearranjo dos perfis de forma a apoiar o peso do rolo de poliéster, que estava em suspenso, e eliminar a flexão da estrutura;
- Utilização de um barbante amarrado na estrutura como freio de atrito para controlar a inércia de rotação do desbobinador;
- Reforço interno dos suportes com resina epóxi, conforme técnica descrita por LOVO *et al.* (2020), para aumentar a sua confiabilidade.

Todavia, o equipamento foi positivamente validado no trabalho de Revelo *et al.* (2016) com a colagem de fitas de vidro diopsídio ( $\text{CaO.MgO.2SiO}_2$ ) que apresentaram bom acabamento superficial e resistência mecânica a verde suficiente para sua manipulação e corte.

A máquina, assim configurada, foi entregue ao SIMMaC, sob responsabilidade do professor Eduardo Bellini Ferreira, como parte do projeto FAPESP 2013/07793-6, CEPIV – Centro de Ensino, Pesquisa e Inovação em Vidros.

## 4.2 Estudo de caso – *Tape casting*, FEB

### 4.2.1 Fase informacional

Após a análise das necessidades que provocaram esta demanda e do desempenho obtido no primeiro equipamento, foram propostas melhorias e novas delimitações de projeto:

- Velocidade de colagem da fita: 1 a 10 mm/s;
- Aumentar rigidez da estrutura;
- Aumentar confiabilidade dos suportes elásticos;
- Reduzir o tempo de alinhamento dos eixos;
- Utilizar freio no desbobinador;
- Atender a norma de segurança em máquinas e equipamentos.

#### 4.2.2 Projeto conceitual

No desenvolvimento do equipamento, foi decidido fazer apenas alterações pontuais para atender as melhorias propostas, sem alterar o conceito da máquina, ilustrado na Figura 28.

#### 4.2.3 Projeto preliminar

Utilizando os mesmos critérios de seleção da primeira análise morfológica e levando em consideração os novos requisitos, o Quadro 2 demonstra, em azul, o que foi alterado em nível de princípio de funcionamento para o desenvolvimento do segundo equipamento. Ademais, foi realizada uma revisão generalizada dos componentes no desenvolvimento do segundo equipamento, aprofundando as análises de DFMA.

Quadro 2 - Análise morfológica do segundo equipamento de *tape casting*

<i>Doctor blade</i>	Lâminas	Uma	Duas			
	Formato	A	B	C	E	F
	Controle de altura no reservatório	Manual	Alimentador			
Estrutura	Material	Aço Carbono	Aço Inoxidável	Alumínio		
	Fabricação	Chapa dobrada	Tubos soldados	Perfis aparafusados		
	Suportes de eixo	Fixo	Encaixe			
Câmara de secagem	Material	Aço Carbono	Aço Inoxidável	Alumínio	Polícarbonato	PETG
	Controlador do exaustor	Liga/Desliga	Potenciômetro	PID		
	Suporte da correia	Roletes	Chapa de aço	Chapa de alumínio	Placa de vidro	
Acionamento	Motor	Passo	Servo	AC		
	Controlador	Capacitor de partida	Inversor de frequência	Automático		
	Transmissão	Acoplamento	Engrenagens	Correia dentada	Corrente	
	Freio do desbobinador	Magnético	Tração	Mordente		

Fonte: Autor.

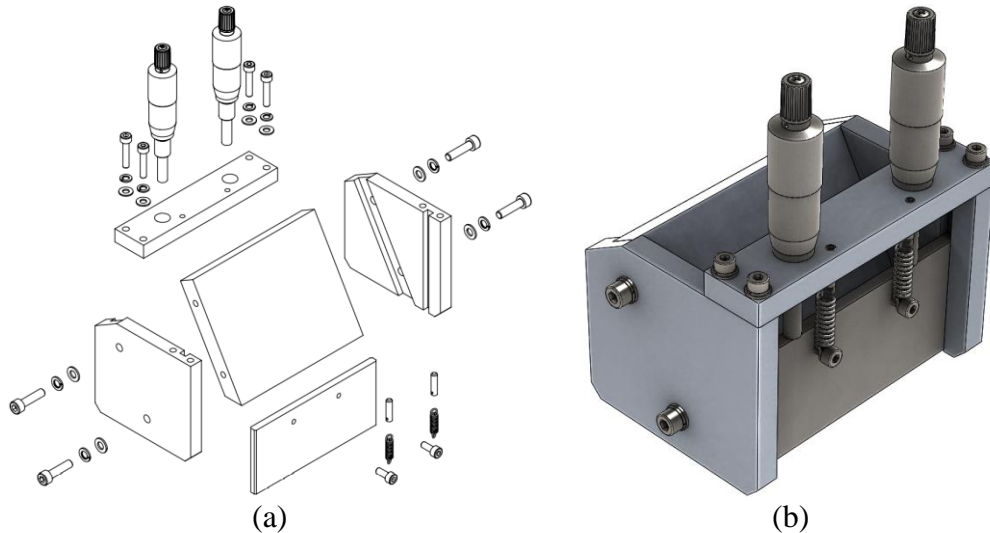
- Estrutura: Para aumentar a rigidez, mantendo a leveza e facilidade de limpeza da primeira estrutura, foi proposto utilizar uma combinação de soluções com uma chapa de alumínio dobrada sobre os perfis de alumínio.

- Acionamento: Foi decidido utilizar um freio de atrito, com formato mordente, de menor complexidade.

#### 4.2.3.1 *Doctor blade*

Para simplificar a escolha de materiais e fabricação das peças, a matéria prima utilizada na construção do reservatório foi unificada. Essa alteração reduziu etapas de usinagem e o custo de fabricação. O desenho alterado do dispositivo é ilustrado na Figura 43.

Figura 43 – Esquemático do segundo *doctor blade*, vistas: (a) explodida; (b) perspectiva

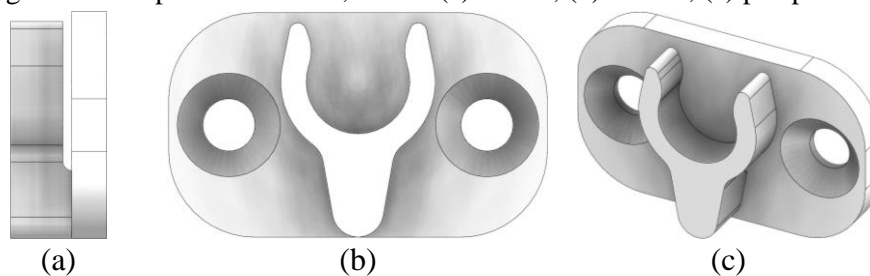


Fonte: Autor.

#### 4.2.3.2 Suportes de eixo

Os suportes foram redesenhados para fixação direta na estrutura, reduzindo os graus de liberdade e facilitando a montagem e o alinhamento. Para aumentar a confiabilidade das peças, os esforços e materiais de fabricação dos suportes de eixo foram estudados por Machado Filho, Lovo e Fortulan (2021) conforme o ANEXO A e redesenhados como mostram a Figura 44 e a Figura 45. Eles foram fabricados em resina epóxi aditivada com poliol utilizando a técnica de replicação por moldagem desenvolvida por Purquerio *et al.* (2018).

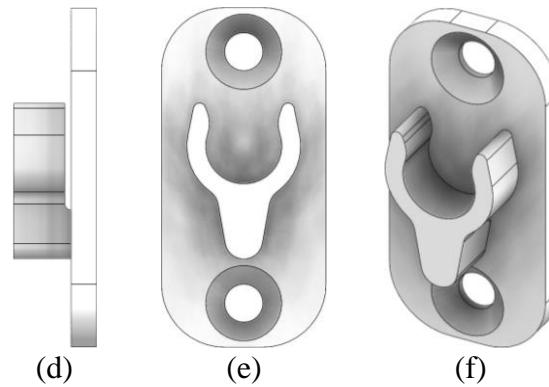
Figura 44 – Suporte horizontal, vistas: (a) lateral; (b) frontal; (c) perspectiva



Fonte: Autor.



Figura 45 – Suporte vertical, vistas: (a) lateral; (b) frontal; (c) perspectiva

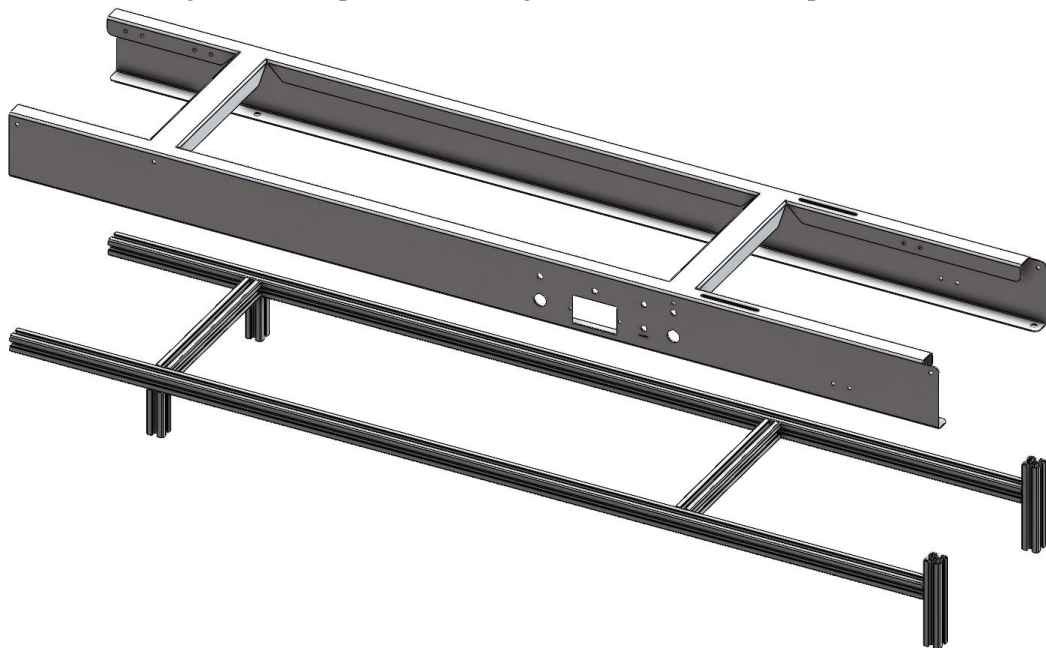


Fonte: Autor.

#### 4.2.3.3 Estrutura

Para aumentar a rigidez da estrutura, foi utilizado um esqueleto de perfis de alumínio combinado a uma chapa de alumínio dobrada, com seção desenhada para aumentar o momento de inércia (BEER *et al.*, 2011). Esta montagem é ilustrada na Figura 46.

Figura 46 – Esquemático da segunda estrutura, vista explodida



Fonte: Autor.

Todos os furos e rasgos para posicionamento dos componentes foram desenhados no plano padrão da chapa para ser cortado em uma máquina de corte a laser com precisão de 0,1 mm e dobrado em uma dobradeira com CNC. Este método de fabricação agrega precisão e redução das etapas de alinhamento dos eixos.

A montagem da segunda estrutura é ilustrada na Figura 47.

Figura 47 – Esquemático do conjunto de montagem da segunda estrutura

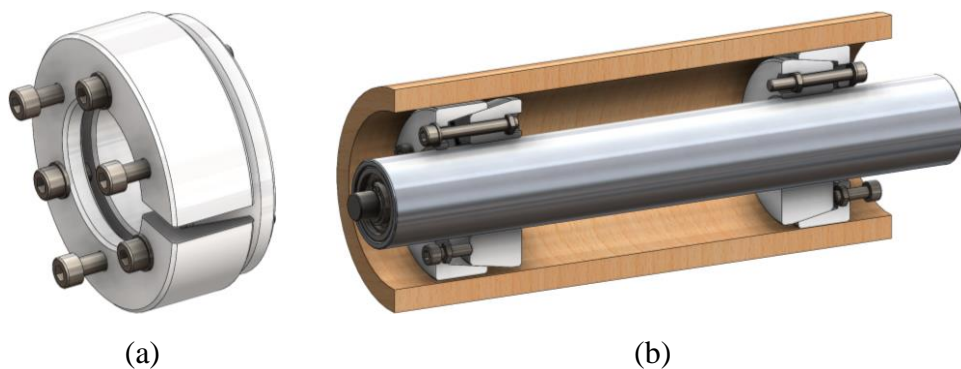


Fonte: Autor.

#### 4.2.3.4 Tambores e roletes

A fim de otimizar o uso de espaço para permitir a instalação de novos acessórios nos eixos e de ter elementos que facilitem a montagem e desmontagem do desbobinador, as buchas expansíveis do equipamento foram redesenhadas usando buchas de fixação de dispositivos em eixos de alta rotação como referência. Duas peças com formatos cônicos permitem a variação dos diâmetros à medida que parafusos as aproximam ou afastam uma da outra. O novo desenho é ilustrado na Figura 48.

Figura 48 – Esquemático da bucha expansível redesenhada, vistas: (a) perspectiva; (b) montagem

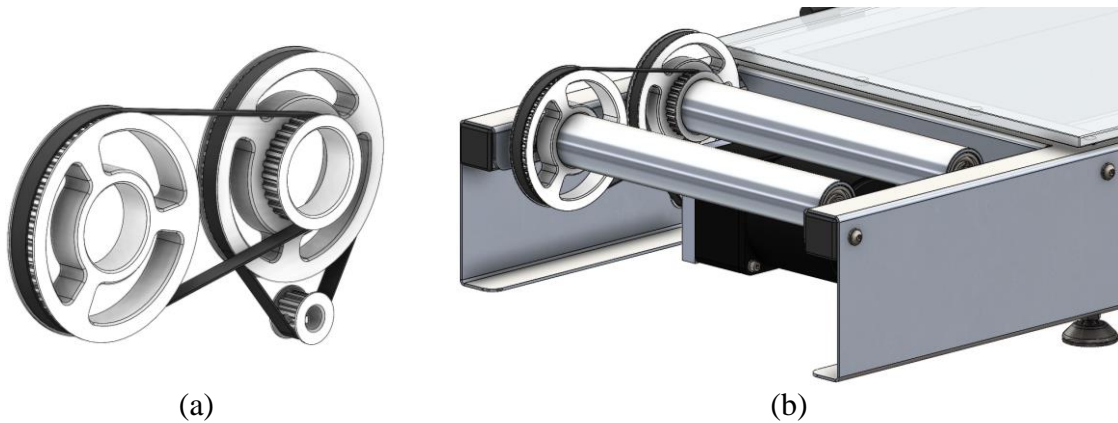


Fonte: Autor.

#### 4.2.3.5 Acionamento

Foi adicionado um segundo par de polias para atingir a faixa de velocidade proposta, obtendo redução total de 310:1. O conjunto foi verificado segundo a metodologia de dimensionamento e seleção de motor e transmissão de Gürocak (2016) e foram mantidos os mesmos motor e redutor do primeiro equipamento. A Figura 49 ilustra a montagem do sistema de acionamento na máquina.

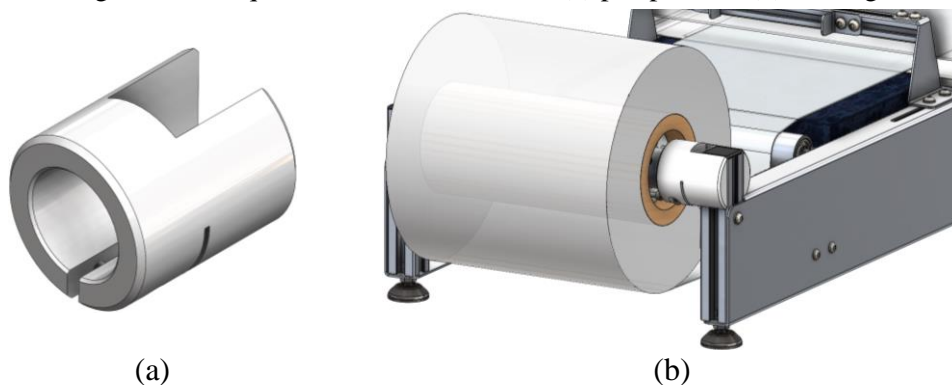
Figura 49 – Esquemático do sistema de acionamento: (a) polias; (b) montagem



Fonte: Autor.

O controle de tensão de bobinamento do filme de poliéster foi idealizado com um freio de atrito acoplado ao tambor de desbobinamento e apoiado na estrutura, como ilustrado na Figura 50.

Figura 50 – Esquemático do freio, vistas: (a) perspectiva; (b) montagem



Fonte: Autor.

#### 4.2.3.6 Sistema de segurança

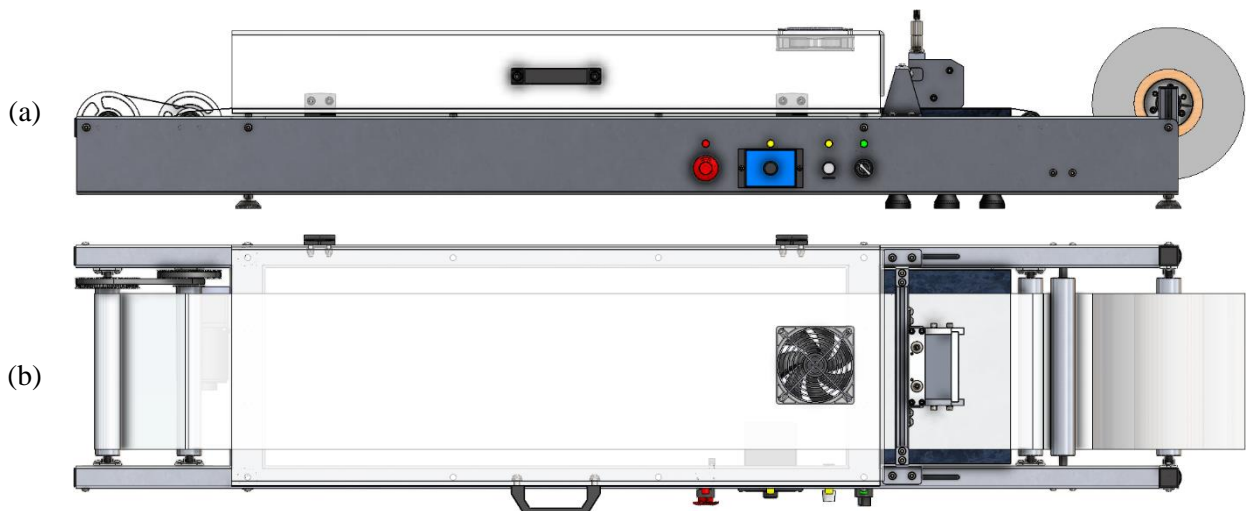
Para atendimento das normas NR 10 e NR 12, todo o circuito elétrico foi posicionado na parte interna da máquina, os níveis de tensão nas interfaces com o operador foram ajustados, foram incluídos uma chave seccionadora, um botão de emergência, sinaleiros em três cores de iluminação: verde para indicar a energização da máquina, amarelo para indicar a máquina em operação e vermelho para indicar parada de emergência.

Considerando a ergonomia, todos os comandos, ajustes e sinalizações foram posicionados na parte frontal do equipamento, com fácil acesso, e a altura do equipamento, levando em conta a altura da bancada onde seria instalado, foi ajustada para que o operador tenha boa postura e conforto durante o seu manuseio. Assim, o projeto também atendeu a NR 17.

#### 4.2.4 Projeto detalhado

A Figura 51 ilustra a montagem geral da máquina após a finalização do projeto detalhado.

Figura 51 – Ilustração do segundo equipamento de *tape casting*, vistas: (a) frontal; (b) superior; (c) perspectiva





Fonte: Autor.

#### 4.2.5 Fabricação e montagem

##### 4.2.5.1 Doctor blade

A fabricação do *doctor blade* seguiu as mesmas etapas e rigor do primeiro. A Figura 52 mostra a montagem do reservatório e o dispositivo finalizado.

Figura 52 – *Doctor blade*: (a) montagem do reservatório; (b) montagem final



(a)



(b)

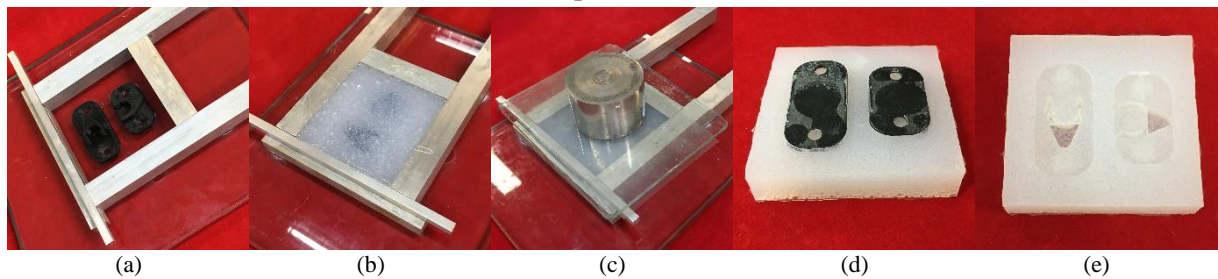
Fonte: Autor.

##### 4.2.5.2 Suportes de eixo, polias e castanhas

Para a fabricação dos suportes de eixo, duas peças foram fabricadas por impressão 3D e utilizadas como modelos para fabricação de um molde em silicone, Figura 53, que foi utilizado para replicar os suportes em resina. Durante a replicação, foram realizados testes dos materiais: resina epóxi reforçada com fibras longas de carbono; resina epóxi reforçada com fibras curtas de carbono; resina epóxi com óleo de rícino como plastificante; resina epóxi com

óleo de rícino e fibras curtas de carbono; resina epóxi com poliol como plastificante; resina epóxi com poliol e fibras curtas de carbono. A formulação utilizando o sistema epóxi Araldite® LY 5052 (100% p/p) e Aradur™ 5052 (38% p/p) da fabricante Huntsman aditivado com 10% de poliol apresentou melhor resistência aos esforços da aplicação, como demonstrado por Machado Filho, Lovo e Fortulan (2021), e foi selecionada para uso na máquina. A Figura 54 apresenta alguns dos suportes fabricados utilizando diferentes materiais.

Figura 53 – Etapas de fabricação do molde de silicone: (a) posicionamento dos modelos; (b) imersão em silicone líquido; (c) confinamento para cura do silicone; (d) remoção dos modelos; (e) molde pronto



Fonte: Machado Filho, Lovo e Fortulan (2021).

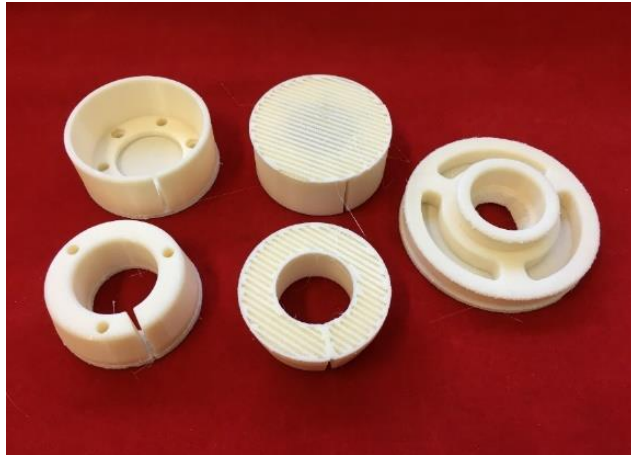
Figura 54 – Suportes fabricados em diferentes materiais



Fonte: Autor.

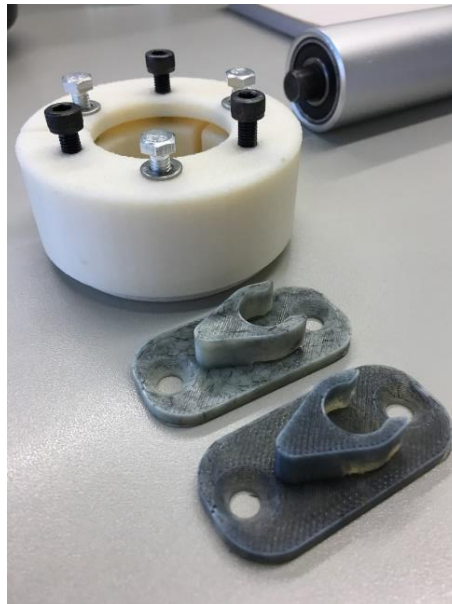
A fabricação das polias e castanhas, Figura 55, seguiu o mesmo processo utilizado no primeiro equipamento, impressão 3D em ABS. A Figura 56 mostra a montagem das castanhas e destaca os suportes de eixo fabricados com fibras curtas de carbono.

Figura 55 – Impressão 3D de peças em ABS



Fonte: Autor.

Figura 56 – Montagem das castanhas e suporte de eixo



Fonte: Autor.

#### 4.2.5.3 Estrutura, acionamento e dispositivos elétricos

Assim que a estrutura de perfis foi montada na chapa de alumínio, foi possível notar melhora considerável na rigidez do conjunto. Os suportes de eixo foram fixados com facilidade e o sistema de acionamento posicionado sem que houvesse fratura dos suportes. A Figura 57 mostra a instalação do sistema elétrico.

Figura 57 – Instalação do sistema elétrico



Fonte: Autor.

O rolo de poliéster foi fixado com facilidade no tambor com uso das novas castanhas. O freio foi instalado e o conjunto foi apoiado na estrutura, como apresentado na Figura 58, sem que houvesse qualquer sinal de flexão da mesma.

Figura 58 – Conjunto desbobinador apoiado na estrutura



Fonte: Autor.

A montagem final do segundo equipamento é apresentada na Figura 59.



Figura 59 – Equipamento de *tape casting* construído para a FEB

Fonte: Autor.

#### 4.2.6 Validação

Durante os primeiros testes, o bobinamento sem escorregamento lateral do filme de poliéster, observado na Figura 60, evidenciou a eficácia das soluções apresentadas para o tensionamento do filme e o posicionamento e alinhamento dos eixos.

Figura 60 – Bobinamento da fita de poliéster

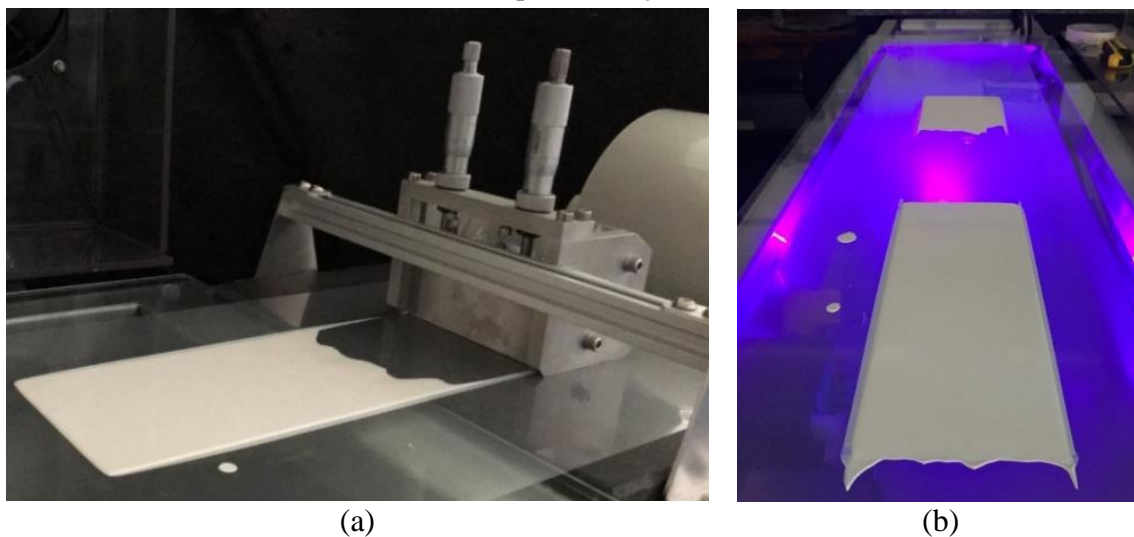


Fonte: Autor.

A validação foi realizada com a colagem de fitas de Zircônia-3Y em uma formulação baseada nos trabalhos de Camargo *et al.* (2021a e b), ilustrada na Figura 61, um processo de densificação híbrido por perda de solvente e polimerização UV. Amostras com dimensões 35x6mm foram cortadas da fita em verde e utilizadas para medição da espessura, os valores

obtidos são apresentados na Tabela 1. O baixo desvio padrão evidenciou a capacidade da máquina de colar fitas de espessura uniforme, atendendo os requisitos de projeto.

Figura 61 – Teste do segundo equipamento de *tape casting*: (a) colagem da fita; (b) secagem e fotopolimerização



Fonte: Autor.

Tabela 1 – Medição das amostras

<b>Amostra</b>	<b>Espessura [mm]</b>
1	0,84
2	0,84
3	0,84
4	0,85
5	0,85
6	0,84
7	0,84
8	0,85
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,01</b>

Fonte: Autor.

A máquina, assim configurada, foi entregue à FEB – UNESP como parte do projeto FAPESP 2016/22842-1, Fabricação de filmes cerâmicos nano-estruturados para aplicação em sensores de gases, sob responsabilidade do professor César Renato Foschini.

### 4.3 Estudo de caso – Coletora de Livros

#### 4.3.1 Fase informacional

A Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes empresta livros para alunos de todo o Campus da USP em São Carlos. Atualmente, a biblioteca conta com uma caixa de devoluções de livros disponível para os usuários no modelo de devolução 24 horas. Os livros são recolhidos da caixa em 5 horários diferentes nos dias de semana: 8h, 12h, 14, 18h e 21h. Nos sábados, os livros são recolhidos apenas nos horários da manhã. Nos domingos e feriados, não há expediente na biblioteca e os livros não são recolhidos. A Tabela 2 mostra as médias diárias de livros recolhidos durante a semana em cada horário conforme informado pela biblioteca.

Tabela 2 – Média diária de devolução de livros por horário de recolhimento

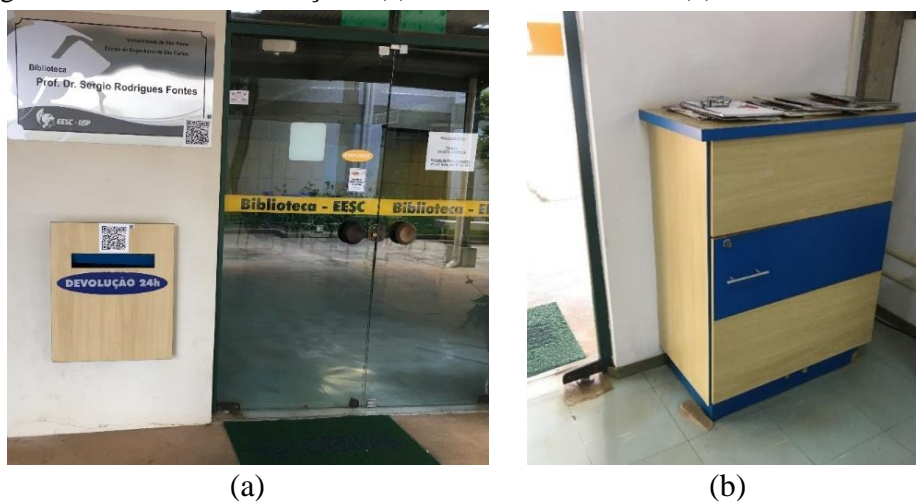
<b>Horário</b>	<b>Média diária</b>
8h	6,5
12h	8,4
14h	4,2
18h	8,2
21h	2,8

Fonte: Autor.

A caixa de devoluções atual, apresentada na Figura 62, possui capacidade estimada de 15 livros. Quando há feriado na segunda-feira, sexta-feira ou com ponte durante a semana, a porta da caixa é deixada aberta para, caso seja devolvida uma quantidade de livros superior à capacidade da caixa, os livros deslizem para o chão da biblioteca. Esta prática favorece a ocorrência de danos aos livros.

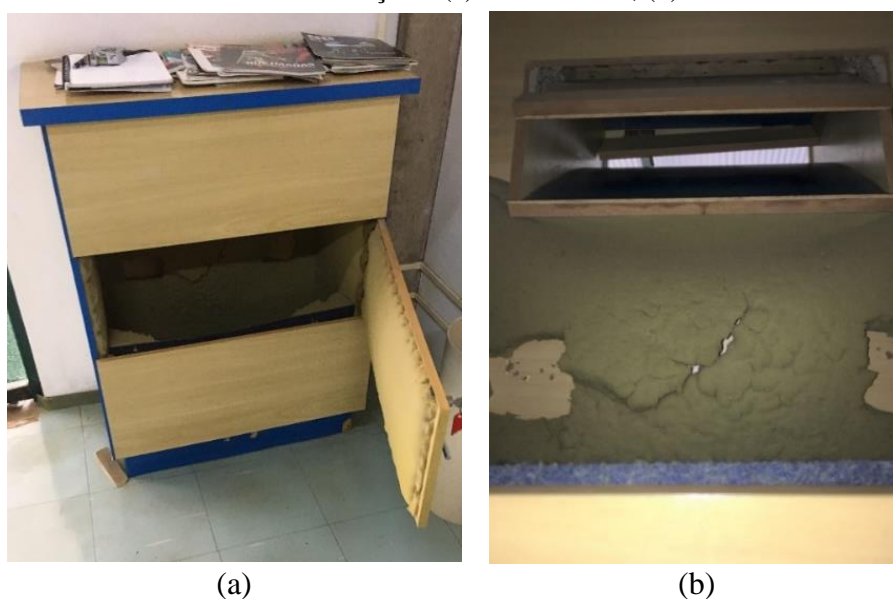
É um desejo dos bibliotecários, reformá-la. Além da capacidade de armazenamento insuficiente, ela apresenta avarias pelo longo tempo de uso e não garante a absorção da queda dos livros. A deterioração do acolchoamento interno dificulta a limpeza e aumentou o acúmulo de sujeira, gerando um ambiente insalubre e desconforto aos bibliotecários. A Figura 63 mostra as condições do interior da caixa. Partindo deste desejo, a biblioteca solicitou ao professor Carlos Alberto Fortulan auxílio para o desenvolvimento de uma nova caixa e sugeriu que, além de trazer melhorias à conservação dos livros, ela automatize parte das etapas do processo de devolução de livros.

Figura 62 – Caixa de devoluções: (a) exterior da biblioteca, (b) interior da biblioteca



Fonte: Autor.

Figura 63 – Interior da caixa de devoluções: (a) vista externa, (b) detalhe do acolchoamento



Fonte: Autor.

A nova caixa ou equipamento para devolução de livros foi planejada de modo a minimizar ao máximo qualquer necessidade de intervenção na infraestrutura e instalações elétricas da biblioteca, ter capacidade de coletar e armazenar um grande número de livros e não os danificar na armazenagem. Para tanto, os seguintes dados iniciais foram fornecidos pela biblioteca:

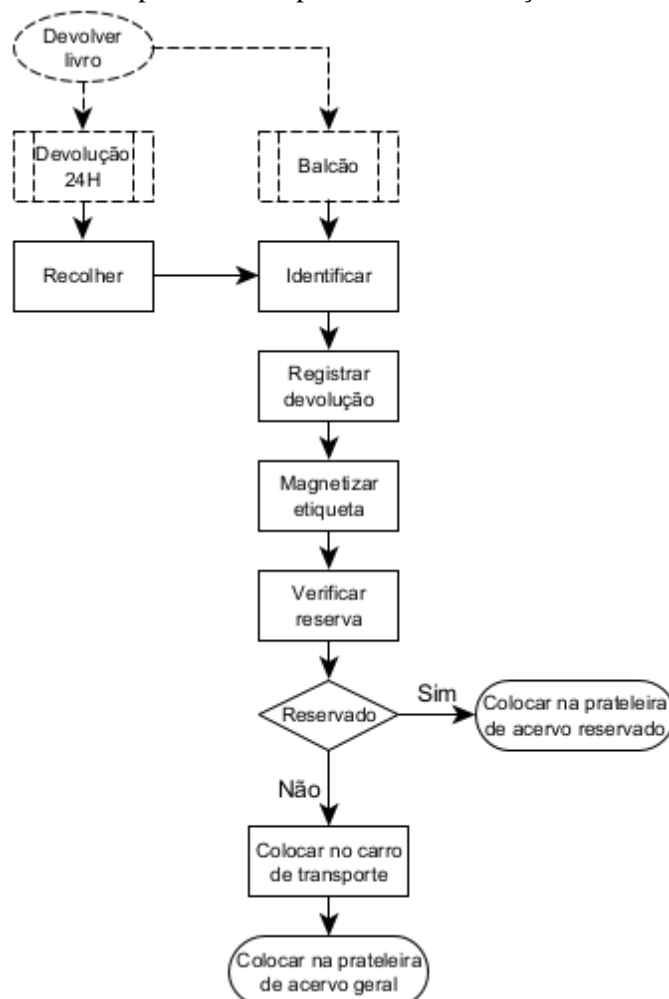
- Dimensões máximas dos livros: 200x300x50 mm;
- Peso máximo dos livros: 2,1 kg;
- Rede elétrica: 220V;

- Espaço disponível para o equipamento:
  - Comprimento = 2,0 m;
  - Largura = 1,5 m;
  - Altura = 2,0 m.

#### 4.3.2 Projeto conceitual

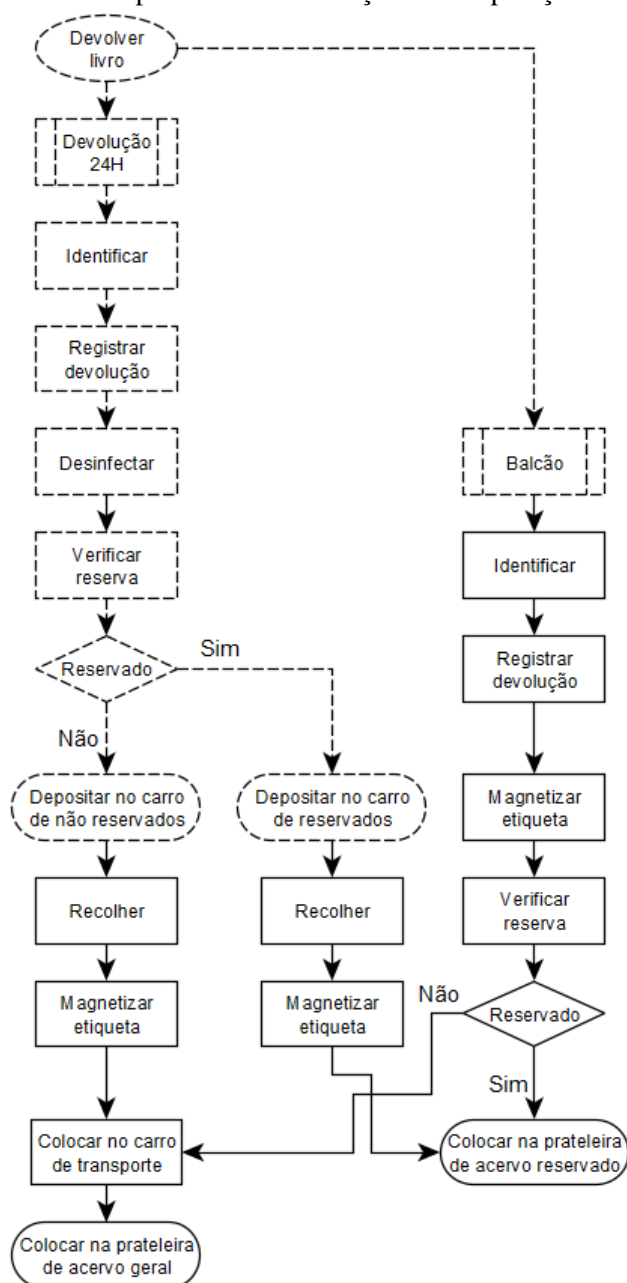
Ao devolver um livro na biblioteca, o usuário tem duas opções: depositar na caixa de devoluções ou entregar à um bibliotecário no balcão. Em seguida, o livro é identificado e sua devolução é registrada no SIBiUSP que indica se o livro está reservado ou não. Se estiver reservado, ele é separado para ser entregue ao usuário que o requisitou. Se não, é devolvido às prateleiras do acervo geral. Este processo de devolução de livros na biblioteca é descrito no fluxograma da Figura 64. As etapas em tracejado são aquelas que não são executadas pelos bibliotecários.

Figura 64 – Mapeamento do processo de devolução de livros atual



Na elaboração do conceito da máquina, foram discutidas quais atividades executadas pelos bibliotecários seriam automatizadas. O desejado era que a máquina executasse todas as etapas necessárias para a recepção e separação dos livros entre reservados e não reservados. Neste caso, a máquina precisaria identificar o livro, se comunicar com o sistema de controle de acervo do SIBiUSP para registrar a devolução e verificar se o livro está reservado e, então, depositar o livro na pilha de reservados ou de não reservados. Assim, os bibliotecários precisariam apenas ativar a etiqueta magnética e colocar os livros nas respectivas prateleiras. O fluxograma deste processo é apresentado na Figura 65.

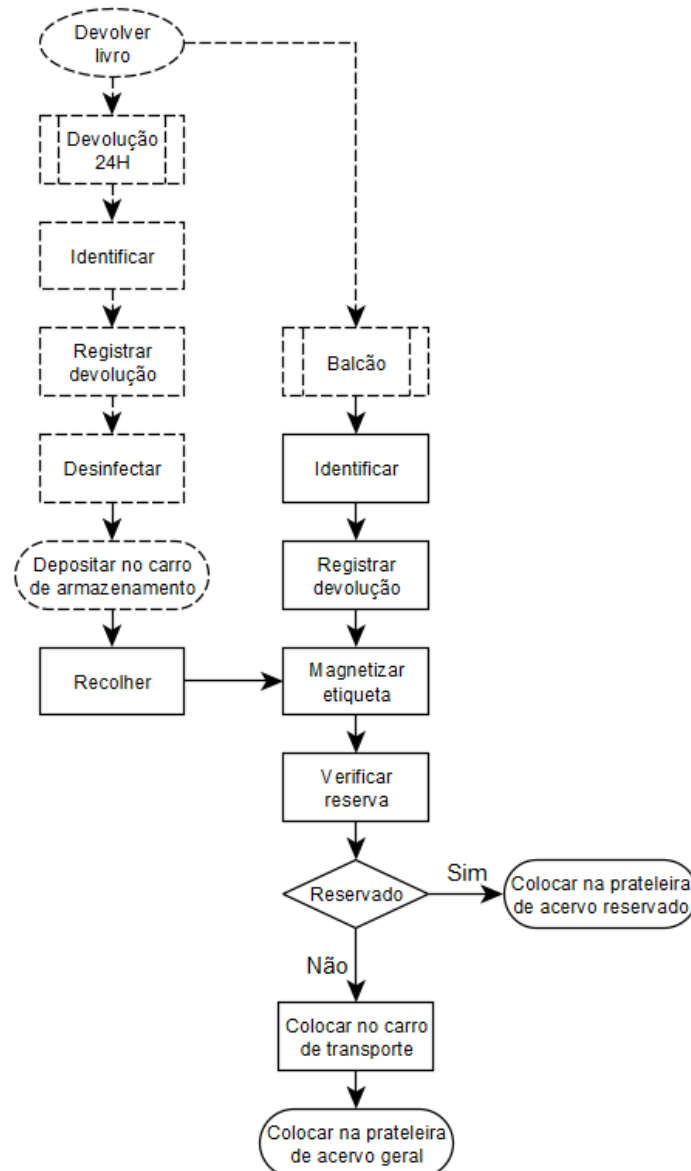
Figura 65 – Mapeamento do processo de devolução com separação automática proposto



Devido ao custo e à urgência de implementação, foi preferida uma opção mais simples e rápida de ser desenvolvida. Então, o conceito da máquina foi elaborado para identificar e registrar a devolução do livro no sistema do SIBiUSP e armazená-lo em uma única pilha, sem realizar a separação entre livros reservados e não reservados. Todavia, a máquina deveria ser construída de modo que seja possível inserir, posteriormente, um sistema de classificação e separação dos livros. O fluxograma deste processo é apresentado na Figura 66.

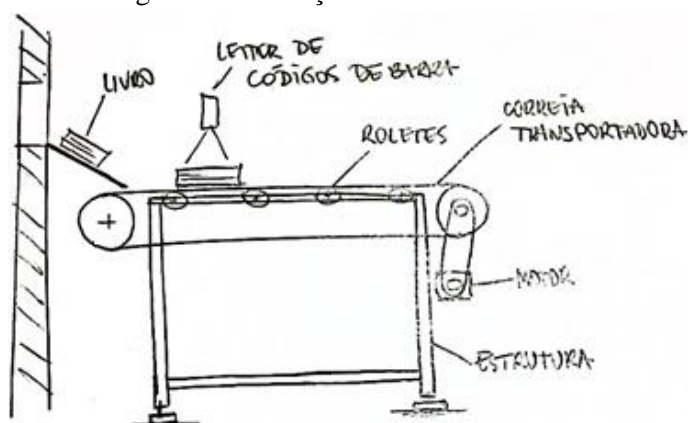
Com a intenção de agilizar ainda mais o desenvolvimento e disponibilização da máquina, o projeto foi dividido em duas fases. Na primeira, foi desenvolvida uma máquina capaz apenas de receber e armazenar os livros. Na segunda, será desenvolvido o sistema de identificação do livro e comunicação com o sistema do SIBiUSP.

Figura 66 – Mapeamento do processo de devolução implementado



Desta forma, a máquina foi concebida como um transportador por correia, alinhado à abertura da caixa de devoluções atual, que transporta o livro até um carro de armazenamento. Um esboço foi elaborado e apresentado na Figura 67. O funcionamento geral da máquina é bastante simples e ocorre da seguinte forma: o livro é inserido na abertura da caixa de devolução e escorre por uma rampa até a correia transportadora, um sensor identifica a presença do livro e aciona o motor por um tempo determinado e suficiente para que a correia transporte o livro até o carro de armazenamento. Caso outro livro seja depositado enquanto a esteira estiver em movimento, o sensor recompõe o tempo de acionamento do motor.

Figura 67 – Esboço da coletora de livros



Fonte: Autor.

#### 4.3.2.1 Desinfecção de livros

Durante a elaboração do conceito, foi considerado implementar uma solução para desinfetar os livros durante a sua passagem pela máquina e mitigar qualquer risco de eles serem vetores de micróbios para o interior da biblioteca. Pesquisas realizadas por Chen *et al.* (2020) e Furriel *et al.* (2020) avaliam a viabilidade de usar luz UV ou aquecer os livros acima de 80 °C para inativar os vírus. Foram realizadas consultas à Coordenadoria de Preservação da Fundação Biblioteca Nacional para verificar a possibilidade de adotar estas soluções no equipamento e foi apontado que estas soluções poderiam causar a deterioração precoce do papel trazendo prejuízos à vida útil do livro e, portanto, elas foram descartadas. Assim, os livros armazenados no carro deverão passar por um período de quarentena antes de serem manipulados pelos bibliotecários.



### 4.3.3 Projeto preliminar

Após o desenho do conceito, a seleção de soluções seguiu critérios similares aos projetos anteriores. Juntamente com as análises de custo, facilidade de montagem e manutenção, versatilidade e durabilidade, foram considerados o tempo de desenvolvimento e as previsões de alterações da máquina na segunda fase do projeto. Desta forma, foram priorizadas soluções que possibilitem a instalação do sistema de identificação de livros com alterações mínimas na estrutura e acionamento da máquina. O Quadro 3 demonstra a análise morfológica das soluções selecionadas:

Quadro 3 - Análise morfológica da coletora de livros

Estrutura	Material	Aço Carbono	Aço Inoxidável	Alumínio	
	Fabricação	Chapa dobrada	Tubos soldados	Perfis aparafusados	
	Fechamento	Aço	Alumínio	ACM	PETG
	Tambores	<i>Tape-casting</i>	Novos		
Correia	Material	Metálico	PVC	PU	
	Esticador	Gravidade	Parafuso		
	Apoio	Roletes	Chapa de aço	Chapa de alumínio	
Acionamento	Motor	Passo	Servo	AC	
	Controlador	Capacitor de partida	Inversor de frequência	Automático	
	Transmissão	Acoplamento	Engrenagens	Correia dentada	Corrente
	Sensor	Físico	Indutivo	Capacitivo	Presença
Carro	Caixa	Comercial	Tubos soldados	Perfis aparafusados	Madeira
	Fundo	Contrapeso	Mola-gás	Pantográfico	

Fonte: Autor.

- Estrutura: Foi decidido fazer a estrutura com os mesmos perfis de alumínio usados na construção do *tape casting*, eles permitem a montagem posterior do sistema de identificação de livros sem alteração na estrutura. O fechamento, para proteger a parte interna da máquina, foi concebido com placas de ACM, as quais entregam bom acabamento e são de limpeza fácil. Foi priorizada a reutilização dos tambores desenvolvidos para o *tape casting*.

- Correia: A princípio, foi considerado o uso de correia de PVC, mais econômica e mais comum no mercado. Porém, devido ao diâmetro mínimo de flexão, para permitir o aproveitamento do projeto dos tambores do *tape casting*, foi definido a utilização de correia de PU que, convenientemente, também traz mais facilidade de limpeza e melhores condições de higiene. Com o intuito de simplificar a construção, foi planejado apoiá-la em uma chapa de aço e utilizar esticador por parafuso.

- **Acionamento:** Foi mantido o uso de motor AC. Uma vez que o processo realizado é único, é possível definir a velocidade de operação e utilizar capacitor de partida para reduzir o custo, contudo, como o sistema de identificação de livros pode requerer alteração e ajuste fino da velocidade, foi determinado a utilização de um inversor de frequência para permitir este ajuste caso seja necessário. Para o acoplamento do motor com o tambor de acionamento, foi selecionado o uso de acoplamento elástico. E, para notar a presença de um livro e acionar o movimento da correia, foi indicado o uso de um sensor capacitivo.

- **Carro de armazenamento:** Foi decidido utilizar uma caixa plástica comercial e adaptá-la com molas a gás para sustentar o fundo móvel. As molas a gás são isentas de manutenção e permitem uma montagem simples, reduzindo os cuidados necessários para limpeza e conservação, prolongando a vida útil do conjunto.

#### 4.3.3.1 Correia transportadora

Foi selecionada uma correia com cobertura superior de PU, com maior resistência a óleos e gorduras, e inferior em tecido antiestático, com menor coeficiente de atrito sobre a chapa de apoio, reforçada com telas de poliéster. Esta é uma construção com limite de tração de 12 kgf/cm de largura e diâmetro mínimo de 10 mm na flexão. A largura foi definida em 350 mm, medida suficiente para acomodar a maior dimensão dos livros do acervo e se alinhar com a abertura da caixa atual.

#### 4.3.3.2 Tambores e esticador

No projeto dos tambores foram usados os mesmos elementos de construção usados no *tape casting*. Entretanto, o projeto foi alterado para adaptá-los às suas funções na nova máquina.

No tambor de acionamento, ilustrado na Figura 68, o tubo foi fixado no eixo utilizando buchas de alumínio com ajustes interferentes e os rolamentos foram posicionados na estrutura da máquina.

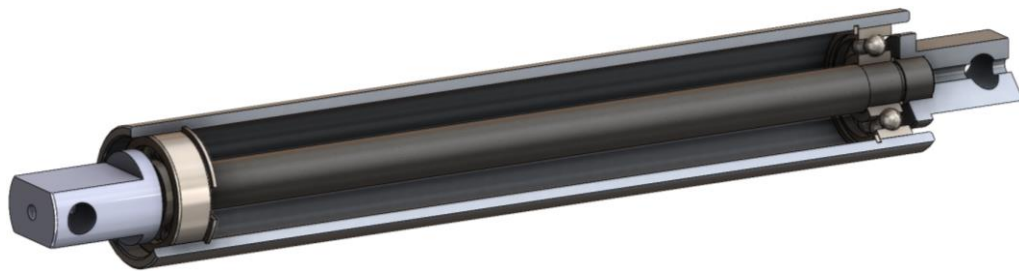
Figura 68 – Desenho esquemático do tambor de acionamento



Fonte: Autor.

No tambor de retorno, ilustrado na Figura 69, a construção é a mesma usada no *tape casting*. Ele foi montado em dois suportes móveis que deslizam em guias da estrutura para ajustar a distância entre os tambores e, assim, esticar a correia.

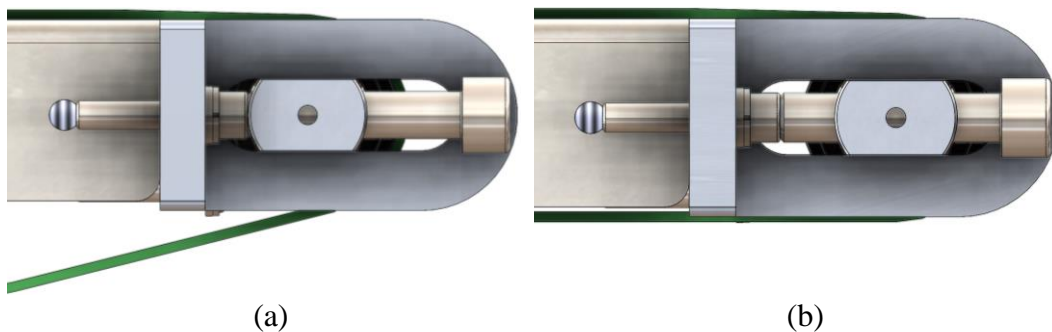
Figura 69 – Desenho esquemático do tambor de retorno



Fonte: Autor.

O ajuste de tensão da correia foi desenhado com um sistema de parafusos que, em contraposição à tensão exercida pela própria correia, mantem o tambor em uma posição fixa de funcionamento. A Figura 70 ilustra como será a montagem deste conjunto.

Figura 70 – Desenho esquemático do esticador, posições: (a) retraído; (b) esticado



Fonte: Autor.

#### 4.3.3.3 Estrutura

A estrutura foi projetada com perfil de alumínio extrudado e fechamento em placas de ACM na cor azul. Uma chapa de aço inoxidável foi usada para apoiar a correia. Foram feitos furos usinados nas placas de fechamento para fixação dos sinaleiros. Foi previsto um perfil superior para fixação do sistema de identificação dos livros na segunda fase do projeto. A Figura 71 ilustra como será a montagem da estrutura.

Figura 71 – Desenho esquemático da estrutura



Fonte: Autor.

#### 4.3.3.4 Sistema de acionamento

Seguindo a metodologia de Gürocak (2016) e assumindo a velocidade recomendada por FAÇO (1996) para o transporte de volumes, 200 mm/s, foi verificado que o motor de indução monofásico de 25 W utilizado nas máquinas de *tape casting* atende esta aplicação com redutor de relação 5:1. Assim, ele foi utilizado junto à um acoplamento elástico.

#### 4.3.3.5 Circuito elétrico e sistema de segurança

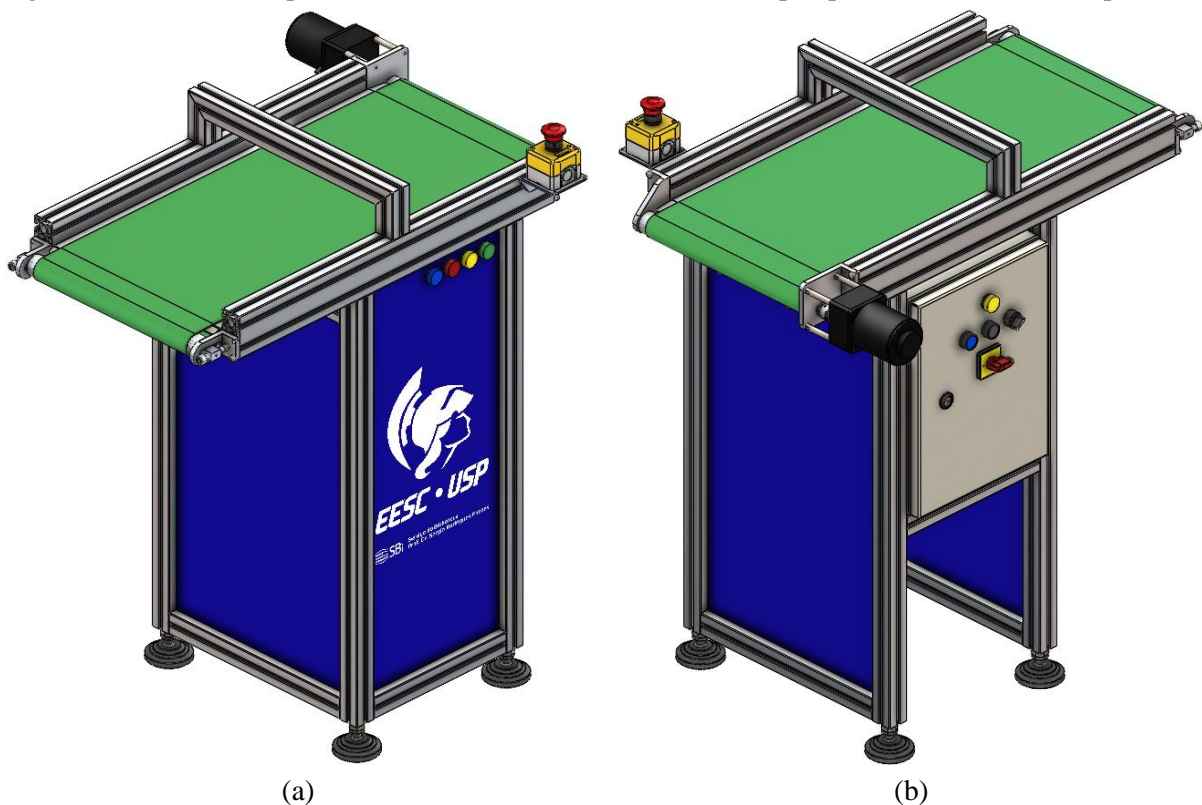
Por ser uma máquina que opera sozinha (sem a necessidade de um operador) e fora do ambiente laboratorial, foi delineado um circuito elétrico mais robusto e com recursos a mais do que as máquinas de *tape casting*.

Foi utilizada uma caixa elétrica equipada, na porta, com chave seccionadora, chave liga/desliga, botão de acionamento forçado do motor, botão de reinício e um sinaleiro indicando a energização da máquina. No seu interior foram colocados os elementos de proteção elétrica, relé de acionamento, inversor de frequência do motor e bornes para conexão com os elementos externos. Ela foi posicionada no lado direito da máquina, com acesso mais restrito. No lado oposto, ficaram a chave de emergência e sinaleiros com as mesmas cores e funções dos anteriores. Foi adicionado um sinaleiro de cor azul para indicar ao responsável que a máquina precisa ser reiniciada.

Um sensor capacitivo foi posicionado na rampa de entrada dos livros e será responsável por dar o sinal de acionamento do motor automaticamente quando um livro for devolvido.

A disposição desses elementos e do sistema de acionamento é ilustrada na Figura 72.

Figura 72 – Desenho esquemático da coletora de livros, vistas em perspectiva: (a) frontal; (b) posterior



Fonte: Autor.

#### 4.3.3.6 Carro de armazenamento

No desenvolvimento do carro de armazenamento foi utilizada uma caixa plástica comercial com volume interno de 370 L, suficiente para armazenar mais de 70 livros e atender a média de devoluções nos finais de semana. O fundo móvel foi projetado com uma chapa de aço inoxidável com abas laterais para aumentar a rigidez, sobreposta de uma placa de EVA com 30 mm de espessura para absorver o impacto da queda do livro. Para o controle do deslocamento do fundo móvel, foram utilizadas 4 molas gás com curso de 250 mm e força nominal de 200 N, conforme ilustra a Figura 73.

Figura 73 – Desenho esquemático do carro coletor, posição do fundo: (a) superior; (b) inferior

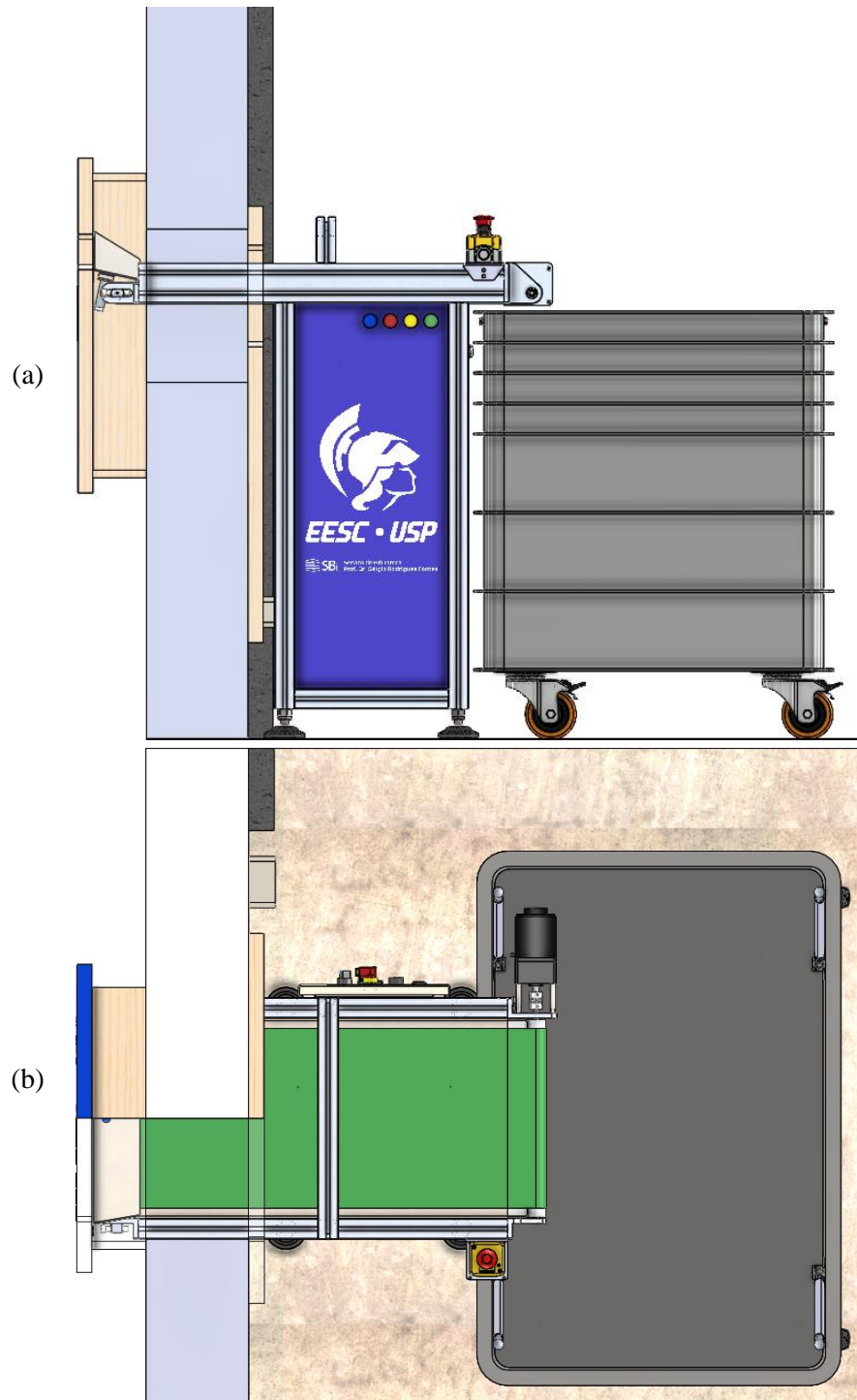


Fonte: Autor.

#### 4.3.3.7 Projeto detalhado

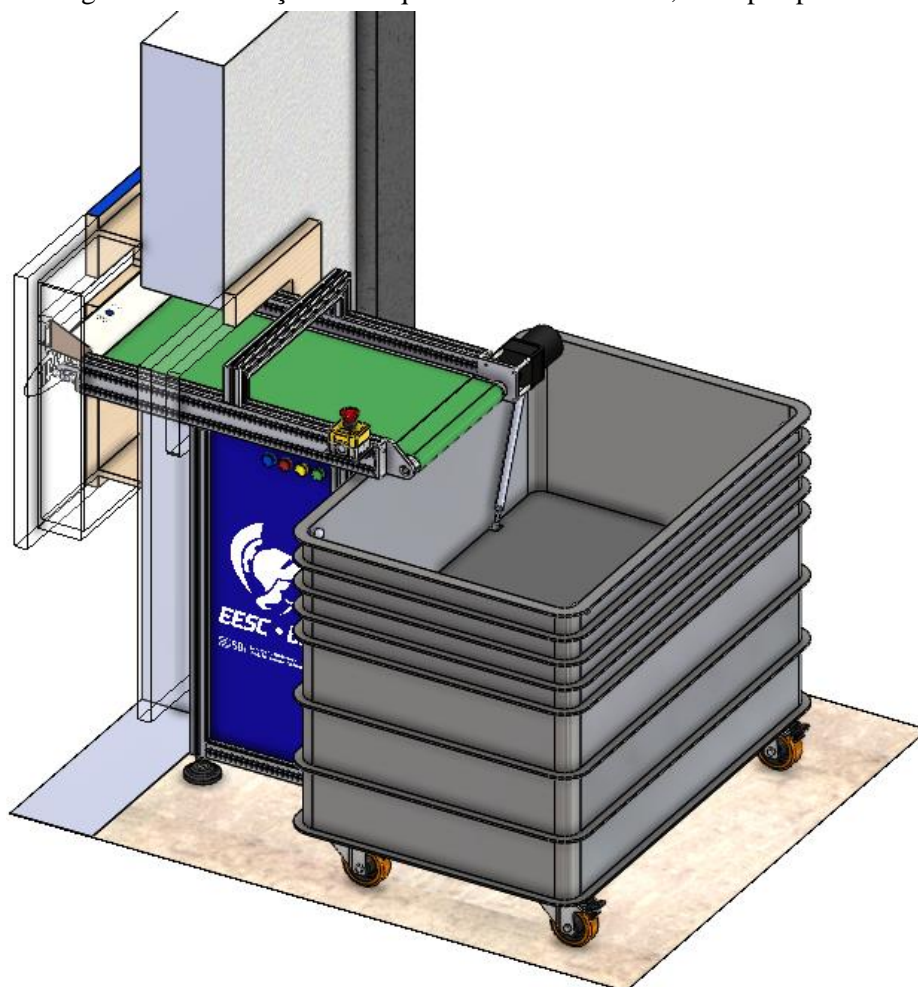
As Figura 74 e a Figura 75 ilustram a montagem geral da máquina após a finalização do projeto detalhado.

Figura 74 – Ilustração da máquina coletora de livros, vistas: (a) frontal; (b) superior



Fonte: Autor.

Figura 75 – Ilustração da máquina coletora de livros, vista perspectiva



Fonte: Autor.

#### 4.3.4 Fabricação e montagem

Ao final do desenvolvimento, o projeto detalhado foi apresentado às partes interessadas e aceito pela chefia da Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes, a qual entendeu que ele atende todas as premissas do projeto. Em seguida, a Diretoria da EESC aprovou o financiamento da fabricação e, em posse de toda documentação técnica, listas de materiais e orçamentos preliminares, iniciaram o processo de aquisição dos itens e serviços necessários para a implementação da máquina.



## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o estudo de transportadores de correias e resultou no projeto de três máquinas de precisão. No desenvolvimento, foram aplicadas metodologias e ferramentas de projeto na obtenção de máquinas de pequeno porte, modernas, precisas, enxutas, versáteis, com custos acessíveis e possibilidade de integração com elementos de controle e interfaces lógicas. As máquinas desenvolvidas se destacam das demais do mercado, também, por atenderem demandas específicas dos clientes de forma customizada.

As máquinas de *tape casting* foram implementadas e produziram fitas cerâmicas sem defeitos notáveis, com espessuras abaixo de 1 mm e desvio padrão na ordem de 0,01 mm ao longo do comprimento. Evidenciando, assim, que elas atendem os critérios necessários para fabricação de fitas cerâmicas com alta precisão e satisfazem os requisitos dos clientes. Ponderando os desafios que o desenvolvimento de equipamentos para laboratórios de pesquisas muitas vezes traz, como o nível de detalhamento de requisitos, a alta exigência quanto à precisão, a necessidade de dimensões pequenas e até a escassez de recursos, é possível perceber que a versatilidade do projeto elaborado o deixa preparado para o uso em escala industrial. Para tanto, bastaria aprimorar os controles de temperatura, velocidade linear da esteira e pressão hidrostática no reservatório do *doctor blade* a fim de, junto ao controle de viscosidade da barbotina feito pelo usuário, permitir o controle fino das quatro variáveis elencadas por Mistler e Twiname (2000) que influenciam a espessura e uniformidade de colagem da fita.

A máquina coletora de livro teve seu projeto desenvolvido e os custos de fabricação levantados. Memoriais de cálculo e descritivo, projeto detalhado, diagrama elétrico, listas de materiais, estimativas de custo e manual técnico foram entregues e aceitos pelo cliente. O projeto atendeu todos os requisitos e extrapolou às expectativas dos clientes, tanto na capacidade operacional quanto na simplicidade, robustez e custo de implementação. Ao longo do desenvolvimento do trabalho surgiram limitações que não foram previstas, como a falta de recursos financeiro para construção, de toda forma, o uso das metodologias de projeto contribuiu para a superação de todas as limitações vivenciadas e para entregar máquinas que satisfazem as expectativas dos clientes, gerando valor para os mesmos.

Assim, é possível afirmar que os objetivos deste trabalho foram alcançados.

### 5.1 Trabalhos futuros

Sugestões de trabalhos futuros para aprimorar a máquina de *tape casting*:

- Desenvolvimento de controle automático da altura da barbotina no reservatório do *doctor blade*;
- Desenvolvimento de controle automático da velocidade linear do filme de poliéster.

Sugestões de trabalhos futuros para continuidade das fases de desenvolvimento da máquina coletora de livros:

- Construção e validação do equipamento;
- Desenvolvimento de sistema informatizado para identificação e registro dos livros devolvidos;
- Desenvolvimento de soluções integradas para controle de micróbios e desinfecção dos livros.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. A. O. **Projeto conceitual e construção de um protótipo de uma minimáquina para o corte de substratos de alumina**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- ARFIDO. **Library cart with movable floor**. Chyby: ARFIDO, 2018. Disponível em: <http://arfido.com/library-cart-with-movable-floor.html>. Acesso em: 26 maio 2021.
- ASHBY, M. F. **Materials selection in mechanical design**. 3<sup>rd</sup>ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2005.
- ASIMOW, M. **Introdução ao projeto: fundamentos do projeto de engenharia**. São Paulo: Mestre Jou, 1968.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6177: transportadores contínuos — transportadores de correia — terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BAODING HUAYUE. **Anti-tear Steel Cord Conveyor Belt**. Disponível em: <http://www.hbhuayue.com.cn/en/product/mid2pro01.html>. Acesso em: 28 abr. 2021.
- BEER, F. P. *et al.* **Mechanics of materials**. 6<sup>th</sup>ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. A. **Product design for manufacture and assembly**. 3<sup>rd</sup>ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- BRASIL. Ministério do Trabalho. **NR 17 - ergonomia**. Brasília: Ministério do Trabalho, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-17.pdf/view>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.
- BRASIL. Ministério do Trabalho. **NR 10 - segurança em instalações e serviços em eletricidade**. Brasília: Ministério do Trabalho, 2019a. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-10.pdf/view>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.
- BRASIL. Ministério do Trabalho. **NR 12 - segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília: Ministério do Trabalho, 2019b. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-12.pdf/view>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.
- BROWN, T. **Design thinking: uma metodologia poderosa para decretar o fim das velhas ideias**. Rio de Janeiro: Atlas Books, 2017.
- CAETANO, M. **Correias transportadoras**. 2010. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/correias-transportadoras/>. Acesso em: 28 out. 2020.
- CARVALHO, H. **Design thinking: entenda como funciona o modelo**. 2019. Disponível em: <https://vidaproduto.com.br/design-thinking/>. Acesso em: 8 jun. 2021.

CHEN, H. *et al.* Influence of different inactivation methods on severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 RNA copy number. **Journal of Clinical Microbiology**, [s. l.], v. 58, n. 8, p. 1–8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1128/JCM.00958-20>.

CLEVELAND MOTION CONTROLS. **Advanced web process control**: how to size and select load cells for web process productivity. Cleveland: Litho USA, 2002.

CONVEYOR EQUIPEMENT MANUFACTURES ASSOCIATION. **Belt conveyors for bulk materials**. 5<sup>th</sup>ed. New York: Conveyor Equipment Manufacturers Association, 1997.

CORREIAS transportadoras: guia básico. Brasília: Eletrobrás, CNI, 2009. (PROCEL Indústria edição seriada).

DESIGN COUNCIL. **Eleven lessons**: managing design in eleven global brands. Londres: Design Council, 2007.

DIEBOLD, J. **Automation**: the advent of the automatic factory. New York: D.Van Nostrand, 1952.

FABRICA DE AÇO PAULISTA. **Manual de transportadores de correias**. São Paulo: FAÇO, 1996.

FERGUSON, E. S. **Oliver evans, inventive genius of the american industrial revolution**. Delaware: The Hagley Museum, 1980.

FRAZZON, L. S. *et al.* O Processo de desenvolvimento de um serviço inovador com base em um modelo de referência. **Revista Produção Online**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 622, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v15i2.1933>.

FURRIEL, G. *et al.* **Esteira com lâmpadas UV-C pode auxiliar na descontaminação de materiais infectados pelo novo coronavírus**. 2020. Disponível em: <https://www.ifg.edu.br/ultimas-noticias-campus-goiania/17901-esteira-lampadas-uv-c-pode-auxiliar-descontaminacao-materiais-infectados-coronavirus>. Acesso em: 4 ago. 2020.

GALANOPOULOS, K. How contemporary are Charlie Chaplin's 'modern times'? The Fordist and post fordist production models'. **Intellectum**, v. 3, p. 117–130, 2008.

GALECIA GROUP. **Automated materials handling**: more information. Disponível em: <https://galecia.com/content/automated-materials-handling-more-information>. Acesso em: 26 maio 2021.

GÜROCAK, H. **Industrial motion control**: motor selection, drives, controller tuning, applications. Vancouver: John Wiley, 2016.

HOMEL, R.; SWAGEL, J. **Book return with collapsible bag receptacle**. US5082171. Depósito: 30 jul. 1990. Concessão: 21 jan. 1992.

HOTZA, D. *et al.* Tape casting of preceramic polymers toward advanced ceramics: a review.

**International Journal of Ceramic Engineering & Science**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 21–41, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/ces2.10009>.

HOWATT, G. N. **Method of producing high dielectric high insulation ceramic plates**. US2582993. Depósito: 29 out. 1948. Concessão: 22 jan. 1952.

HOWATT, G. N.; BRECKENRIDGE, R. G.; BROWNLOW, J. M. Fabrication of thin ceramic sheets for capacitors. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 30, n. 8, p. 237–242, 1947. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1947.tb18889.x>.

JABBARI, M. *et al.* Ceramic tape casting: a review of current methods and trends with emphasis on rheological behaviour and flow analysis. **Materials Science and Engineering B: solid-state materials for advanced technology**, [s. l.], v. 212, p. 39–61, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.07.011>.

LAITRAM. **History of innovation**. 2021. Disponível em: <https://www.laitram.com/innovation>. Acesso em: 6 jul. 2021.

LIU, S. *et al.* Calculation of tape thickness for ceramic tape casting. **Key engineering materials**, [s. l.], v. 512–515, p. 328–333, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.512-515.328>.

LOVO, J. F. P. *et al.* Mechanical structural design based on additive manufacturing and internal reinforcement. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: journal of mechanical engineering science**, [s. l.], v. 234, n. 2, p. 417–426, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406219878471>.

MACHADO FILHO, S. G.; LOVO, J. F. P.; FORTULAN, C. A. Seleção de material e fabricação de componente mecânico auxiliados por MEF e MA: um estudo de caso. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 11., 2021, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: ABCM, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEP2021.COB21-0016>.

MALAGONI, R. A.; SANTOS, D. A. Projeto de correias transportadoras: um estudo computacional de comparação dos métodos CEMA e prático. **HOLOS**, [s. l.], v. 3, p. 358, 2014. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2014.1780>.

MISTLER, R. E.; TWINAME, E. R. **Tape casting: theory and practice**. Westerville: American Ceramic Society, 2000.

MOURÃO, A. **Como os designers pensam: o duplo diamante**. 2016. Disponível em: <https://paxliber.weebly.com/dt/como-os-designers-pensam-o-duplo-diamante>. Acesso em: 11 nov. 2020.

NAYLOR, R. **Sorting device and method**. WO96/32207. Depósito: 7 mar. 1996. Concessão: 17 out. 1996.

OSBORN, A. F. **Applied imagination: principles and procedures of creative problem solving**. New York: Scribner, 1953.

PAHL, G. *et al.* **Engineering design**. 3<sup>rd</sup>ed. Londres: Springer, 2007.

PARK JR., J. L. **Manufacture of ceramics**. US2996719. Depósito: 15 jun. 1954. Concessão: 03 jan. 1961.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK)**. 5<sup>th</sup>ed. Newton Square: PMI, 2013.

PURQUERIO, B. M. *et al.* **Processo para a fabricação de moldes de silicone, moldes de silicone, e uso dos moldes de silicone**. BR 102016023090-0 A2. Depósito: 04 out. 2016. Concessão: 02 mai. 2018.

REVELO, R. J. *et al.* Desenvolvimento de um equipamento laboratorial de tape casting para componentes multicamadas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, 60., 2016, Águas de Lindóia. **Anais [...]**. Águas de Lindóia: ABCERAM, 2016.

REVELO, R. J. **Obtenção e caracterização de substratos vitrocerâmicos dielétricos a base de dióxido de silício conformados por Tape Casting**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

RODRIGUES, V. **Conhece a ferramenta Scamper para gerar novos insights criativos?**. 2020. Disponível em: <https://www.siteware.com.br/blog/produktividade/ferramenta-scamper/>. Acesso em: 20 jul. 2021.

ROZENFELD, H. *et al.* **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva Uni, 2012.

SIBAROLL. **Roletes para esteira**. Disponível em: [www.sibaroll.com.br](http://www.sibaroll.com.br). Acesso em: 28 abr. 2021.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SLOCUM, A. H. **Precision machine design**. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

SOUL. Direção: Pete Docter e Kemp Powers. Estados Unidos: Disney, 2020.

TAHARA, S. **DFMA (design for manufacturing and assembly)**. 2008. Disponível em: <http://portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/Conteudo/DFMA-Design-for-Manufacturing-and-Assembly>. Acesso em: 11 nov. 2020.

THYSSENKRUPP ROBINS. **Robins History**. 2009. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20100314165904/http://www.krupprobins.com/Company/History/robins.html>. Acesso em: 4 nov. 2020.

TOK, A.I. Y.; BOEY, F. Y. C.; KHOR, K. A. Tape casting of high dielectric ceramic composite substrates for microelectronics application. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 89–90, p. 508–512, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00131-4).

UNIVERSITY OF COPENHAGEN. **Inovation toolbox.** 2018. Disponível em:  
<https://innovationenglish.sites.ku.dk/>. Acesso em: 20 jul. 2021.





ANEXO A – SELEÇÃO DE MATERIAL E FABRICAÇÃO DE  
COMPONENTE MECÂNICO AUXILIADOS POR MEF E MA: UM ESTUDO  
DE CASO