



Desenvolvimento de Metodologias de Gestão Inovadoras em Contexto de Manutenção 4.0

JOÃO VÍTOR MENEZES RAFAEL
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadora:

Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Vogais:

Doutor António Mário Henrique Pereira

Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado

Outubro de 2025

Desenvolvimento de Metodologias de Gestão Inovadoras em Contexto de Manutenção 4.0

JOÃO VÍTOR MENEZES RAFAEL
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadora:

Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado,
ISEL/IPL

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor António Mário Henrique Pereira, ESTG/IPLeiria
Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado,
ISEL/IPL

Outubro de 2025

Agradecimentos

Expresso aqui os meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a conclusão desta etapa, com especial destaque para:

- Prof.^a Doutora Teresa Morgado, a minha orientadora, pelo suporte e apoio constante. Seu conhecimento e experiência foram essenciais para o meu desenvolvimento académico e concretização desta tese.
- Aos meus pais por, desde sempre, investirem na minha educação e acreditarem em mim. Graças a eles consegui chegar até aqui.
- Aos meus tios que, assim como meus pais, sempre me ajudaram e apoiaram com o que fosse necessário.
- Daniela Neves, colega de curso, sempre paciente e disponível para dúvidas e conselhos ao longo destes 2 anos.
- Aos engenheiros da The Navigator Company - Setúbal, nomeadamente: Engenheiro Pedro Almeida e o Diretor de Manutenção João Baleizão por terem permitido que esta tese fosse desenvolvida dentro das instalações, ao meu orientador da empresa Engenheiro João Barbeiro e ao Engenheiro Pedro Monteiro por acompanharem de perto o desenvolvimento desta tese e auxiliado no que fosse preciso.

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

João Vítor Menezes Raposo
Lisboa, 30 de junho de 2025

Desenvolvimento de Metodologias de Gestão Inovadoras em Contexto de Manutenção 4.0

Resumo

A indústria 4.0 está a transformar os processos de manutenção industrial, tendo o fabrico aditivo (FA) como uma das suas principais técnicas. Com este intuito, este trabalho avaliou a aplicação do fabrico aditivo na produção de peças de substituição numa indústria de base florestal, especificamente para utilização na manutenção. As cadeias de abastecimento destas peças de substituição apresentam problemas com fornecedores, tais como, tempo de espera e custos elevados. A presente dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de tecnologias de gestão inovadoras em contexto de manutenção 4.0.

A metodologia experimental consistiu no desenvolvimento de uma estratégia inovadora para aplicação da manutenção preventiva sistemática baseado no fabrico aditivo de peças sobresselentes. Através do desenvolvimento de um fluxograma representativo do processo de tomada de decisão para a criação de peças fabricadas via FA, foram selecionados dois casos de estudo designados por "Rolete", "Finger Plate". Os estudos consistiram na análise económica das peças selecionadas, seguido da análise de resistência dos materiais e da seleção de materiais alternativos, tendo em conta os processos de fabrico convencionais (laminagem a quente e injeção) e os aditivos (FDM - *Fused Deposition Modeling* e DLP - *Digital Light Processing*). Por fim foi realizado o estudo de previsão de durabilidade ao serviço.

Da análise económica concluiu-se que o Rolete produzido por DLP apresentou uma redução de 55% nos custos, face ao fabrico convencional. No caso do "Finger Plate", a peça produzida por FDM mostrou-se igualmente vantajosa, com uma redução de custos de 88,27%. Como trabalhos futuros é necessário validar a durabilidade prevista através da estratégia proposta e do tempo de serviço das novas peças dos casos "Rolete" e "Finger Plate"; para o caso de "Rotor" é necessário concluir o estudo já iniciado e validar resultados além de estipular e controlar parâmetros de qualidade para as peças fabricadas por FA.

Palavras-chave: Manutenção, Indústria 4.0, Sustentabilidade, Fabrico Aditivo.

Development of Innovative Management Methodologies in a Maintenance 4.0 Context

Abstract

Industry 4.0 is transforming the processes of industrial maintenance, with additive manufacturing (AM) as one of its main techniques. To this end, this work evaluated the application of additive manufacturing in the production of spare parts in a forest-based industry, specifically for use in production and maintenance. The supply chains for these spare parts present problems with suppliers, such as waiting times and high costs. The aim of this thesis was to develop innovative management technologies in maintenance 4.0 context.

The experimental methodology consisted of developing an innovative strategy for applying systematic preventive maintenance based on the additive manufacture of spare parts. Through the development of a flowchart representing the decision-making process for the creation of parts manufactured via AM, two case studies were selected, designated as "Roller", "Finger Plate". The studies consisted of the economic analysis of the selected parts, followed by the strength analysis of the materials and the selection of alternative materials, considering the conventional manufacturing processes (hot rolling and injection) and additive manufacturing (FDM - Fused Deposition Modeling and DLP - Digital Light Processing). Finally, a service life prediction study was carried out.

The economic analysis shows that the roller produced by DLP had a 55% reduction in costs compared to conventional manufacturing. In the case of the "Finger Plate", the part produced by FDM proved to be equally advantageous, with a cost reduction of 88.27%. As future work, it is necessary to validate the durability predicted by the proposed strategy and the service life of the new parts in the "Roller" and "Finger Plate" cases; for the "Rotor" case, it is necessary to complete the study already started and validate the results, as well as stipulate and control quality parameters for the parts manufactured by AM.

Keywords: Maintenance, Industry 4.0, Sustainability, Additive Manufacturing.

Lista de Símbolos e de siglas

Símbolos

$C_{convencional}$	<i>Custo convencional</i>
C_{FA}	<i>Custo fabrico aditivo</i>
I	<i>Momento de inércia do material de secção tubular</i>
D_e	<i>Diâmetro externo do rolete</i>
D_i	<i>Diâmetro interno do rolete</i>
M	<i>Momento fletor máximo</i>
c	<i>Distância do eixo neutro ao limite do rolete</i>
q	<i>Carga máxima por unidade de comprimento</i>
L	<i>Comprimento do rolete</i>
q_{seg}	<i>Carga máxima por unidade de comprimento com fator de segurança</i>
f_s	<i>Fator de segurança</i>
T_F	<i>Tempo de fabrico</i>
T_I	<i>Tempo de instalação</i>
t_i	<i>Tempo de fabrico individual de cada peça</i>
n	<i>Número de peças</i>
$\sigma_{lim_{flexão}}$	<i>Tensão máxima de flexão</i>
ρ	<i>Densidade</i>
E	<i>Módulo de Young</i>
W	<i>Módulo de Flexão</i>
D	<i>Dureza Shore D</i>
μ	<i>Coefficiente de fricção</i>
$\sigma_{lim_{tração}}$	<i>Tensão máxima de tração</i>

Siglas

FA	<i>Fabrico Aditivo</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
$PDED$	<i>Plasma Direct Energy Deposition</i>

<i>DOE</i>	<i>Design of Experiments</i>
<i>ONU</i>	Organização das Nações Unidas
<i>ODS</i>	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
<i>CLP</i>	Controlador Lógico Programável
<i>CPS</i>	<i>Cyber-Physical Systems</i>
<i>SLA</i>	<i>Stereolithography</i>
<i>SLS</i>	<i>Selective Laser Sintering</i>
<i>EBM</i>	<i>Electron Beam Melting</i>
<i>LOM</i>	<i>Laminated Objects Manufacturing</i>
<i>PdM</i>	<i>Predictive Maintenance</i>
<i>IA</i>	Inteligência Artificial
<i>I4.0</i>	Indústria 4.0
<i>MRO</i>	<i>Maintenance Repair and Operations</i>
<i>KPI</i>	<i>Key Performance Indicator</i>
<i>CMMS</i>	<i>Computerized Maintenance Management System</i>
<i>3D</i>	Três Dimensões
<i>I3D</i>	Impressão 3D
<i>LT</i>	<i>Lead Time</i>
<i>PM</i>	<i>Plant Maintenance</i>
<i>TMSFA</i>	Tempo médio de substituição com o fabrico aditivo
<i>TMS</i>	Tempo médio de substituição
<i>CT</i>	Custo total
<i>CST</i>	<i>Consumo total</i>
<i>PMM</i>	Preço total médio
<i>PPA-CF</i>	<i>Polyphthalamide-Carbon Fiber</i>
<i>UV</i>	Ultravioleta
<i>POM-H</i>	Homopolímero de Polioximetileno
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>AISI</i>	<i>American Iron and Steel Institute</i>
<i>DIN</i>	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>MTTF</i>	<i>Mean Time to Failure</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer-Aided Design</i>
<i>TPM</i>	<i>Total Productive Maintenance</i>

Unidades

<i>kg</i>	<i>Quilograma</i>
<i>g</i>	<i>Gramma</i>

<i>cm</i>	<i>Centímetro</i>
<i>K</i>	<i>Grau kelvin</i>
<i>GPa</i>	<i>Giga Pascal</i>
<i>MPa</i>	<i>Mega Pascal</i>
<i>m</i>	<i>Metro</i>
<i>s</i>	<i>Segundo</i>
<i>l</i>	<i>Litro</i>
<i>rpm</i>	<i>Rotação por minuto</i>
<i>C</i>	<i>Grau celsius</i>
<i>N</i>	<i>Newton</i>
<i>kgf</i>	<i>Quilograma-força</i>

Índice

1	ENQUADRAMENTO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVO	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	2
1.2	OBJETIVO E METODOLOGIA	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DO VOLUME	4
2	ESTADO DA ARTE	5
2.1	FERRAMENTAS DA INDÚSTRIA 4.0	5
3	ESTUDOS DE CASOS	17
3.1	PROPOSTA DE UM PROCESSO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA UTILIZANDO O FABRICO ADITIVO.....	18
3.2	VERIFICAÇÃO ECONÓMICA DAS PEÇAS ESCOLHIDAS PELA FÁBRICA PARA SEREM FABRICADAS VIA FA	21
3.2.1	<i>Fábrica de Papel</i>	21
3.2.2	<i>Fábrica de celulose</i>	22
3.3	ESTUDO TÉCNICO DOS COMPONENTES ALVO DE ESTUDO.....	24
3.3.1	<i>Roleta</i>	24
3.3.2	<i>Finger Plate</i>	28
3.3.3	<i>Rotor</i>	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	CARGA A FLEXÃO DO ROLETE.....	38
4.2	TEMPO DE VIDA ÚTIL MÉDIA ESTIMADA DO ROLETE EM POM-H	39
4.3	RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO DOS ROLETES DE RESINA UV FABRICADOS POR FABRICO ADITIVO	40
4.4	FINGER PLATE.....	41
4.5	TEMPO DE VIDA ÚTIL MÉDIA ESTIMADA DO FINGER PLATE EM PPA-CF	43
4.6	RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO FINGER PLATE EM PPA-CF FABRICADOS POR FABRICO ADITIVO	44
5	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	47
5.1	IMPACTO CIENTÍFICO	48
5.2	TRABALHO FUTURO	48
5.2.1	<i>Roleta</i>	49
5.2.2	<i>Finger Plate</i>	50
5.2.3	<i>Rotor</i>	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

Índice de Figuras

FIGURA 1.1 – ORGANOGRAMA DA THE NAVIGATOR COMPANY - SETÚBAL: (A) GERAL; (B) COMPLEXO INDUSTRIAL DE SETÚBAL.....	2
FIGURA 1.2 – ORGANOGRAMA DA DIREÇÃO DE MANUTENÇÃO DE SETÚBAL.....	2
FIGURA 1.3 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DA METODOLOGIA UTILIZADA PARA DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO.	3
FIGURA 2.1 – REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DA <i>BIG DATA</i>	6
FIGURA 2.2 – INFRAESTRUTURA DE UM SISTEMA CIBERFÍSICO.....	7
FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO FABRICO ADITIVO.	8
FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA DE MANUTENÇÃO SEGUNDO A NP EN 13306:2007 [19]. .	9
FIGURA 2.5 – EXEMPLIFICAÇÃO DA IoT.	10
FIGURA 2.6 – PRINCIPAIS FUNÇÕES DE UM CMMS.	12
FIGURA 2.7 – FABRICO HÍBRIDO-ADITIVO COMO RESULTADO DA JUNÇÃO DE OUTROS DOIS PROCESSOS.....	13
FIGURA 2.8 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICO DO PROCESSO DE FDM [41].	14
FIGURA 2.9 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PROCESSO DE DLP.	15
FIGURA 3.1 – PRINCIPAIS OBJETIVOS DO FA RELATIVAMENTE À PEÇAS DE SUBSTITUIÇÃO.	17
FIGURA 3.2 – VANTAGENS DO DOMÍNIO TÉCNICO E ECONÓMICO DO FA.	17
FIGURA 3.3 – LOCALIZAÇÃO DA FÁBRICA DE PAPEL E CELULOSE NA THE NAVIGATOR COMPANY - SETÚBAL.....	18
FIGURA 3.4 – (A) FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO DE MANUTENÇÃO NA FÁBRICA DE PAPEL E CELULOSE; (B) FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO PARA CRIAÇÃO DE LISTA DE PEÇAS FABRICADAS VIA FA.....	19
FIGURA 3.5 – PROPOSTA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA SISTEMÁTICA UTILIZANDO O FA: A) TEMPO MÉDIO DE SUBSTITUIÇÃO; B) ESTRATÉGIA PARA APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA SISTEMÁTICA DE FORMA A LEVANTAR A PEÇA NO TEMPO CORRETO (FIM DA VIDA ÚTIL DA PEÇA).	21
FIGURA 3.6 – "CASSETE" COM 1 ROLETE EM RESINA UV APOIADO SOBRE O VARÃO.	24
FIGURA 3.7 – TRANSPORTADOR DE RESMAS: (A) VISTA LATERAL; (B) VISTA FRONTAL DAS 2 CASSETES; (C) CORTE PARCIAL DO ROLETE EM POM-H.	24
FIGURA 3.8 – ROLETE EM RESINA UV IGUS I3000.	26
FIGURA 3.9 – RUÍNA DO ROLETE DE POM-H DEVIDO AO DESGASTE.	27
FIGURA 3.10 – FINGER PLATE: (A) COMPONENTE CONVENCIONAL À ESQUERDA E FABRICADO POR FABRICO ADITIVO À DIREITA; (B) COMPONENTE APARAFUSADO; (C) COMPONENTE APARAFUSADO VISTO DE CIMA; (D) COMPONENTE NA POSIÇÃO DE SUPORTE À CAIXA.	29
FIGURA 3.11 – DESENHO DO COMPONENTE FINGER PLATE POR FABRICO CONVENCIONAL, UNIDADES EM MM.....	30
FIGURA 3.12 – DESENHO DO COMPONENTE FINGER PLATE FORNECIDO PELA EMPRESA PARCEIRA POR FABRICO ADITIVO, UNIDADES EM MM.....	31
FIGURA 3.13 – EQUIPAMENTO DE ESTUDO: (A) ROTOR; (B) BOMBA CENTRÍFUGA.	32
FIGURA 3.14 – MODELO DO ROTOR PARA ESTUDO OBTIDO PELO SCANNER 3D CALIBRY THOR: (A) VISTA DE TOPO A 3D; (B) VISTA LATERAL A 3D; (C) DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DA VISTA DE TIPO, LATERAL E EM CORTES.	33
FIGURA 4.1 – GRÁFICO COMPARATIVO DA DENSIDADE ENTRE A RESINA UV IGUS I3000 E O POM-H	35
FIGURA 4.2 – GRÁFICO COMPARATIVO DO MÓDULO DE YOUNG ENTRE A RESINA UV IGUS I3000 E O POM-H.	36

FIGURA 4.3 – GRÁFICO COMPARATIVO DO MÓDULO DE FLEXÃO ENTRE A RESINA UV IGUS I3000 E O POM-H.	36
FIGURA 4.4 – GRÁFICO COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ENTRE A RESINA UV IGUS I3000 E O POM-H.	37
FIGURA 4.5 – GRÁFICO COMPARATIVO DA DUREZA SHORE D ENTRE A RESINA UV IGUS I3000 E O POM-H.	37
FIGURA 4.6 – GRÁFICO COMPARATIVO DO COEFICIENTE DE FRICÇÃO ENTRE A RESINA UV IGUS I3000 E O POM-H.	38
FIGURA 4.7 – CARGA MÁXIMA À FLEXÃO CALCULADA PARA O POM-H E PARA A RESINA UV (FATOR DE SEGURANÇA 4).....	39
FIGURA 4.8 – ROLETE EM RESINA UV E SUPORTES EM RESINA UV.....	40
FIGURA 4.9 – MODIFICAÇÃO DO ROLETE: (A) ANILHA METÁLICA NAS EXTREMIDADES; (B) NOVO ROLETE COM AUMENTO DE ESPESSURA; (C) DESENHO DO ROLETE ALTERADO.	41
FIGURA 4.10 – RESULTADO DA COMPARAÇÃO DA DENSIDADE ENTRE O PPA-CF E DO AÇO INOXIDÁVEL.	42
FIGURA 4.11 – RESULTADO DA COMPARAÇÃO DO MÓDULO DE YOUNG ENTRE O PPA-CF E DO AÇO INOXIDÁVEL.	42
FIGURA 4.12 – RESULTADO DA COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ENTRE O PPA-CF E DO AÇO INOXIDÁVEL.	43
FIGURA 4.13 – RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO PPA-CF VS AÇO INOXIDÁVEL.	43
FIGURA 4.14 – FINGER PLATE COM RUGOSIDADE NOTÓRIA ANTES DO ACABAMENTO FINAL (LIXAMENTO).....	45
FIGURA 4.15 – FINGER PLATE PÓS-ACABAMENTO: (A) INSTALADO NA ESTRUTURA; (B) ATUADOR ROTATIVO PNEUMÁTICO EM CALIBRAÇÃO; (C) ESQUADRO PARA AUXILIAR O ALINHAMENTO; (D) FINGER PLATE DESALINHADO.	45
FIGURA 4.16 – MARCAS DOS IMPACTOS FREQUENTES DA PEÇA CONVENCIONAL EM AÇO COM A ESTRUTURA.	45

Índice de Tabelas

TABELA 3.1 – COMPARAÇÃO ECONÓMICA ENTRE PEÇAS FABRICADAS POR FA E DE FORMA CONVENCIONAL.....	22
TABELA 3.2 – INFORMAÇÕES DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS DENTRO DA FÁBRICA DE ACORDO COM O SAP PM 770.	23
TABELA 3.3 – TABELA DE APOIO À DECISÃO DA BOMBA CUJO ROTOR SERIA ESTUDADO.	23
TABELA 3.4 – PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 [45].....	25
TABELA 3.5 – PROPRIEDADES DA RESINA UV IGUS I3000 [46].	25
TABELA 3.6 – PROPRIEDADES DO POM-H [47].....	25
TABELA 3.7 – DIMENSÕES E MOMENTO DE INÉRCIA DO ROLETE.....	26
TABELA 3.8 – DADOS OPERACIONAIS DO ROLETE EM POM-H.....	28
TABELA 3.9 – PROPRIEDADES DO PPA-CF DA BAMBU LAB [50].	30
TABELA 3.10 – DADOS OPERACIONAIS DO FINGER PLATE EM AÇO INOXIDÁVEL (MATERIAL CONVENCIONAL).....	31
TABELA 3.11 – CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DA BOMBA CENTRÍFUGA.	32
TABELA 3.12 – PROPRIEDADES DO FERRO FUNDIDO CINZA ASTM 20 [45].	33
TABELA 4.1 – RESULTADOS DA CARGA MÁXIMA À FLEXÃO POR ROLETE P EM KGF SEM O FATOR DE SEGURANÇA.....	38
TABELA 4.2 – RESULTADOS DA CARGA MÁXIMA À FLEXÃO POR ROLETE P EM KGF COM O FATOR DE SEGURANÇA 4.	38
TABELA 4.3 – RESULTADOS DOS CÁLCULOS REFERENTES AO TEMPO DE VIDA ÚTIL MÉDIA ESTIMADA DO ROLETE EM POM-H.	39
TABELA 4.4 – RESULTADOS DOS CÁLCULOS REFERENTES AO TEMPO DE VIDA ÚTIL MÉDIA ESTIMADA DO FINGER PLATE EM AÇO INOXIDÁVEL.....	44

1 Enquadramento, Motivação e Objetivo

A The Navigator Company é uma empresa do sector Base Florestal [1] de produção de pasta e papel, *tissue* e energia cuja atividade está alavancada em fábricas com tecnologia de ponta. Na empresa, o fabrico aditivo é amplamente estudado e aplicado como estratégia para reduzir os níveis de stock de peças de substituição de apoio à manutenção. Esta produção é viabilizada com diversos materiais, desde que atendam aos requisitos definidos pelos chefes de topo, nomeadamente produção e manutenção. A manutenção desempenha um papel importante no contexto da sustentabilidade e da Indústria 4.0, contribuindo significativamente para a eficiência operacional e a minimização do impacto ambiental nas atividades industriais.

As tecnologias de manutenção 4.0, ou seja, técnicas aplicadas na indústria com auxílio de novas tecnologias como IoT, *Big Data*, FA entre outras, são fundamentais para a sustentabilidade da produção.

Alves et al. [2] investigaram a sustentabilidade do *Selective Laser Melting* (SLM), um dos métodos de fabrico destacados como alternativa sustentável na indústria, por reduzir custos, simplificar a logística e otimizar o uso de energia, melhorando simultaneamente o desempenho das máquinas através da utilização de alternativas de desenho mais complexas, não possíveis de serem obtida por outros métodos.

Pereira et al. [3] estudaram a otimização do processo *Plasma Direct Energy Deposition* (PDED) utilizando técnicas robustas de *Design of Experiments* (DOE) devido às necessidades da indústria em produzir componente otimizados. Como resultado, foi possível concluir que é possível obter uma redução na produção de resíduos, o que também contribui para a sustentabilidade destes processos.

Esta tese foi realizada no Complexo Industrial de Setúbal, uma das unidades fabris do grupo The Navigator Company, organização que possui um organograma como mostram as Figuras 1.1 e 1.2. O trabalho realizado foi desenvolvido sob a Direção de Manutenção de Setúbal, como indicado na Figura 1.2.

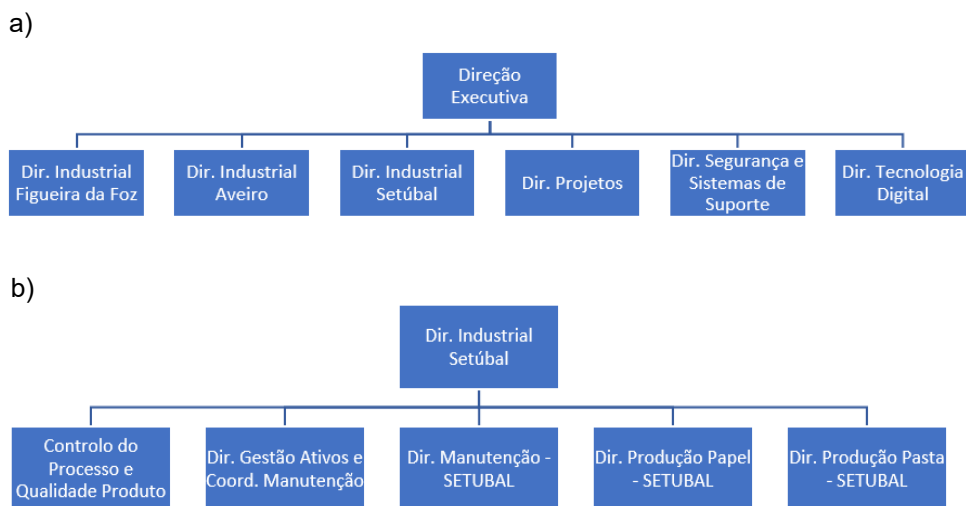


Figura 1.1 – Organograma da The Navigator Company - Setúbal: (a) Geral; (b) Complexo Industrial de Setúbal.

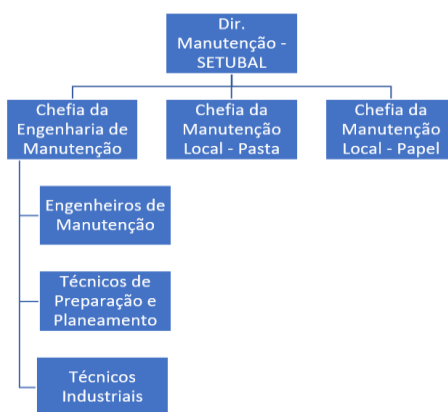


Figura 1.2 – Organograma da Direção de Manutenção de Setúbal.

1.1 Motivação

A motivação deste trabalho consiste na utilização do Fabrico Aditivo como processo auxiliar da manutenção, aumentando o ciclo de vida de sistemas complexos. Desta forma, pretende-se relacionar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU para 2030 [4], em particular os ODS 12 e 13, com uma manutenção sustentável. Os ODSs 12 e 13 podem ser descritos da seguinte forma:

- ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis: o FA minimiza o desperdício de material ao usar apenas o necessário para criar um objeto e permite a fabricação de componentes complexos numa única etapa, reduzindo o uso de energia e material.
- ODS 13 – Ação Climática: ao diminuir o transporte e os resíduos, o fabrico aditivo contribui para a redução das emissões de carbono. Isso é devido ao facto de que o fabrico aditivo produz peças sob medida com o objetivo de minimizar o stock, reduzindo a necessidade de transporte marítimo, aéreo e terrestre.

1.2 Objetivo e metodologia

O objetivo deste trabalho é desenvolver e aplicar metodologias de gestão inovadoras no contexto de Manutenção 4.0 de sistemas complexos, integrando o Fabrico Aditivo como solução para a produção de componentes de substituição utilizadas em equipamentos da indústria da celulose e do papel.

Para atingir o objetivo desta dissertação, foi desenvolvida a seguinte metodologia:

- Em primeiro apresentação de proposta de um processo de manutenção preventiva utilizando o FA através de estudos de caso;
- Para cada estudo de caso, inclusão das seguintes tarefas:
 - Verificação económica das peças selecionadas para FA.
 - Estudo técnico das peças escolhidas que deve incluir:
 - Comparação de propriedades mecânicas entre a peça convencionalmente utilizada e fabricada aditivamente;
 - Cálculo de esforços aos quais os componentes estão sujeitos, quando aplicável;
 - Estimativa do tempo de vida útil através do histórico de campo do componente convencionalmente utilizado;
 - Testes de campo para verificação da funcionalidade.

Na Figura 1.3 encontra-se o esquema representativo da metodologia de investigação desta dissertação.

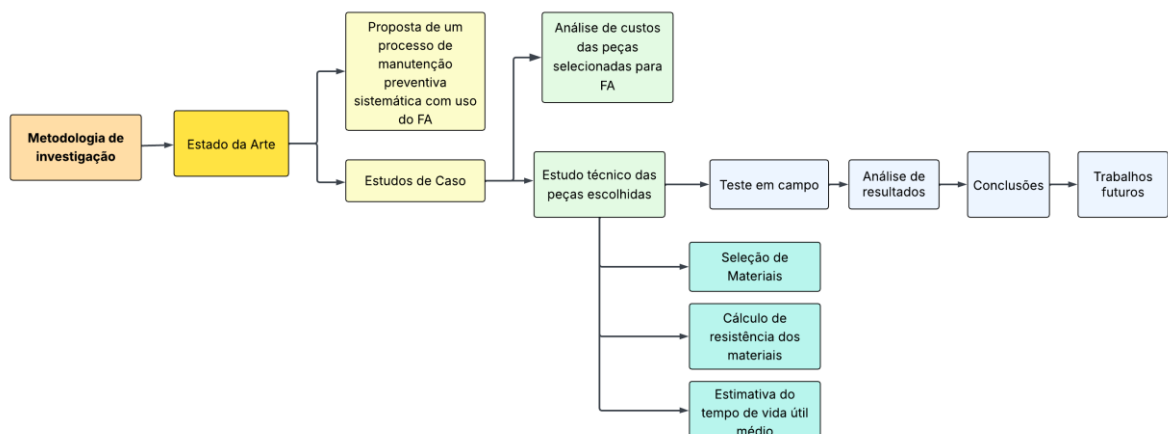


Figura 1.3 – Esquema ilustrativo da metodologia utilizada para desenvolvimento da dissertação.

1.3 Organização do Volume

O presente documento está dividido em 5 capítulos. No primeiro capítulo é feito o enquadramento à temática, apresentada a motivação e os objetivos do trabalho. No segundo capítulo é descrito o estado da arte subdividido entre a história das revoluções industriais e as ferramentas da indústria 4.0. Segue-se o terceiro capítulo, onde é proposto um modelo de manutenção preventiva sistemática utilizando o FA. Ainda neste capítulo 3, são apresentados e discutidos os estudos de casos. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos estudos de casos. Por último, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões, incluindo o impacto na comunidade científica e industrial deste trabalho. A proposta de trabalhos futuros também está incluída neste último capítulo.

2 Estado da Arte

Ao longo da história, as Revoluções industriais causaram grandes transformações nas atividades de produção e manutenção. A primeira revolução industrial, também designada por indústria 1.0, marcou o surgimento da mecanização, focando-se principalmente no uso de máquinas a vapor a partir de 1784. Posteriormente, em 1870, a indústria 2.0 caracterizou-se pela utilização da eletricidade nas linhas de montagem, tornando a produção mais eficaz e menos poluente. Em 1969 as tecnologias de automação começaram a estar presentes, dominando o cenário produtivo com a utilização dos controladores lógicos programáveis (CLPs) e outras técnicas aliadas aos sistemas eletrônicos, dando-se mais uma evolução tecnológica designada por indústria 3.0 [5, 6].

A Indústria 4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, surge no final do século XX e trouxe mudanças significativas ao cenário industrial, introduzindo tecnologias avançadas como a *Internet of things* (IoT), os sistemas ciber-físicos (CPS) e a análise de grandes volumes de dados (Big Data) [7], utilizando o fluxo destes dados através de sensores inteligentes e de outros equipamentos e dispositivos instalados nas fábricas [5]. Com esta revolução surgem novas designações como "Logística 4.0" e "Manutenção 4.0" estando ainda em desenvolvimento as suas aplicações [8,9].

2.1 Ferramentas da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 permite a interligação entre o mundo físico e digital, criando um ambiente de produção mais inteligente e conectado, onde máquinas, dispositivos e sistemas interagem de forma autónoma e em tempo real. A *Internet of Things* (IoT) é a tecnologia que permite a interconexão entre equipamentos via internet para a troca de dados globais ou locais a respeito da manutenção e do desempenho das máquinas. Além disso, a IoT pode facilitar a prática de economias circulares através do fornecimento em tempo real de dados acerca da utilização de recursos e geração de desperdícios, possibilitando um maior poder de decisão por parte das empresas [10,11]. Neste contexto, a IoT pode ser aplicada para o diagnóstico de falhas em linhas de transmissão

através da recolha e transferência de dados em tempo real, da análise colaborativa de informações provenientes de múltiplos pontos, do processamento de grandes volumes de dados, etc. Assim, é possível aumentar a precisão e a fiabilidade na deteção de falhas, diminuir a frequência de problemas nas linhas e aprimorar a estabilidade dos sistemas de transmissão [12].

O termo *Big Data* refere-se ao conjunto de dados em termos de volume, variedade e velocidade (Figura 2.1) que crescem continuamente e de forma exponencial com o tempo. O volume diz respeito a quantidade de dados que são processados e armazenados, além da capacidade de identificar padrões que antes não eram possíveis. A variedade está relacionada com a gama de tipos dos dados analisados como folhas de cálculo ou bancos de dados e também dados não estruturados, como fotos, vídeos, e até registos de sensores em dispositivos. Desta forma, amplia-se as formas de como se pode explorar a informação. Por fim, a velocidade faz referência ao facto de que os dados são processados de forma rápida e eficiente. Atualmente, com as tecnologias avançadas (maior capacidade de armazenamento de dados, processadores mais rápidos e algoritmos mais eficientes), os dados podem ser capturados e analisados em tempo real, permitindo decisões imediatas, o que é essencial, por exemplo para os setores financeiro e logístico [13, 14].

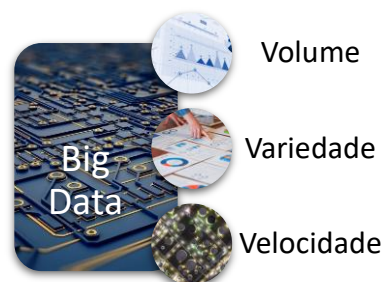


Figura 2.1 – Representação Ilustrativa da *Big Data*.

Um Sistema Ciberfísico (CPS) é uma configuração projetada para o controlo de sensores, atuadores, computadores e componentes de rede. É caracterizado como uma tecnologia de ponta que facilita o controlo, a sensorização, a computação e a comunicação. O CPS desempenha um papel crucial em várias infraestruturas críticas, como cuidados de saúde, estações de tratamento de esgotos, sistemas de transporte, telecomunicações e redes elétricas, devido ao seu elevado desempenho, custos reduzidos e operação fiável. Com características como a gestão inteligente de dados e capacidades computacionais avançadas, o CPS tem sido reconhecido como uma tecnologia fundamental para impulsionar a implementação da Indústria 4.0. Este reconhecimento foi enfatizado durante o primeiro simpósio internacional sobre CPS, organizado pela *National Science Foundation* dos EUA em 2006, e posteriormente apoiado pelas recomendações alemãs em 2013 [15].

Em termos mais simples, o CPS representa uma integração sólida de processos físicos, comunicação fiável, computação precisa e controlo eficaz, demonstrado na Figura 2.2 [16]. Trata-se de um conceito multidisciplinar que revolucionou a forma como os sistemas de rede atuais e os sistemas embutidos clássicos são convertidos e integrados. O CPS é utilizado para organizar o controlo de feedback em sistemas de computação embutidos amplamente distribuídos, permitindo interações seguras, fiáveis e eficientes com os sistemas físicos através desta sinergia.

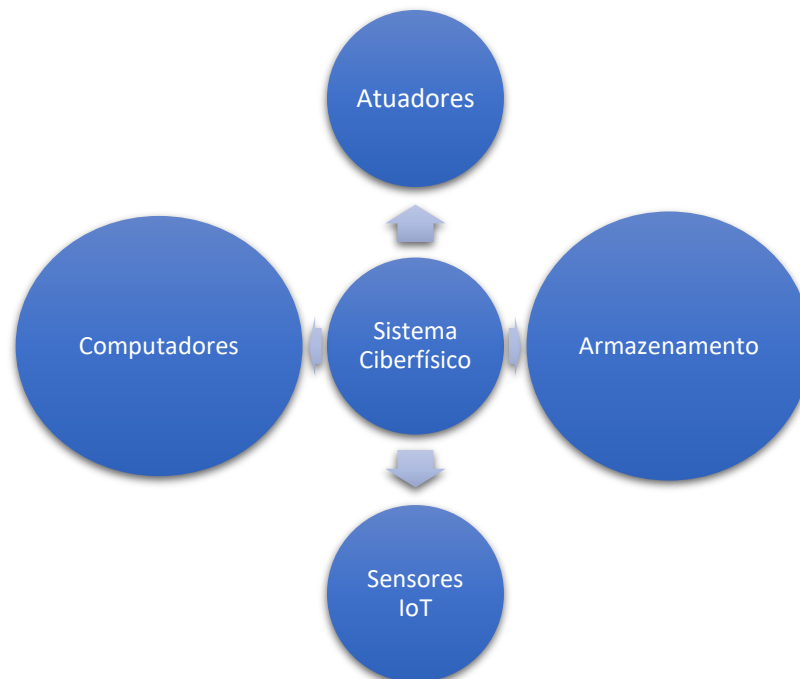


Figura 2.2 – Infraestrutura de um Sistema Ciberfísico.

Outra importante ferramenta da indústria 4.0 é o fabrico aditivo (FA), que permite fabricar objetos camada a camada, utilizando uma vasta variedade de materiais, como polímeros, metais e compósitos. Ao contrário das máquinas tradicionais de remoção de aparas, como tornos e fresas, o FA oferece uma abordagem alternativa, na qual diversas técnicas foram desenvolvidas nos últimos anos. Essas técnicas podem ser classificadas com base no estado da matéria-prima empregada: líquida, como no caso da Estereolitografia (SLA); partículas discretas, como pós usados na Sinterização Seletiva por Laser (SLS) ou na Fusão por Feixe de Elétrons (EBM); e folhas sólidas, como na Modelagem de Objetos Laminados (LOM), entre outros [17,18].

Segundo Ceruti et al. [18], a Indústria 4.0 impulsiona inovações significativas nos processos de fabrico industrial, como o Fabrico Aditivo (FA) e a Realidade Aumentada, aplicáveis em áreas como a indústria aeronáutica. O FA desempenha um papel fundamental, sendo amplamente estudado para produzir produtos homogêneos e heterogêneos com formas geométricas complexas. De acordo com Butt J. [19], o projeto personalizado é uma vantagem chave do FA, tornando essa tecnologia crucial para a Indústria 4.0, sendo preferido em setores como o aeroespacial, automóvel e médico.

Ainda no contexto do Fabrico Aditivo, Devito et al. [20] discutiram o impacto desta técnica em modelos de negócio e na sustentabilidade industrial. Neste estudo, existe a ênfase da importância de alinhar as inovações da tecnologia com os objetivos da sustentabilidade, cujas dimensões tem relação com o conceito dos 6Rs: repensar, recusar, reduzir, reutilizar, reparar e reciclar. Todos esses fatores, incluindo a sociedade, ambiente e economia estão diretamente relacionados com o conceito de Sustentabilidade do Fabrico Aditivo, cuja representação e exemplo de alguns fatores relacionados estão presentes na Figura 2.3.

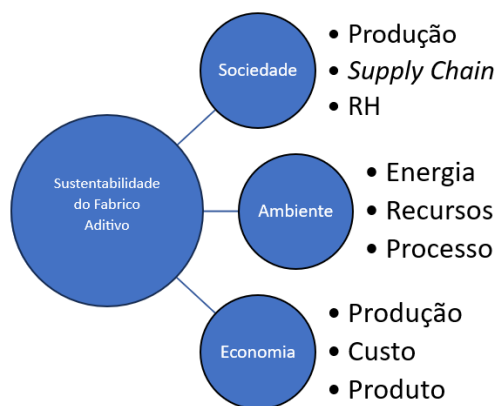


Figura 2.3 – Representação da Sustentabilidade do Fabrico Aditivo.

Dentro deste contexto, é possível dividir a Indústria 4.0 em três principais categorias: (i) produtos inteligentes, (ii) processos inteligentes e (iii) máquinas inteligentes. Nos produtos inteligentes, as soluções da Indústria 4.0 controlam todas as informações relacionadas aos produtos e aos processos de fabrico. Já os processos inteligentes focam nos resultados de desenvolvimento de novos produtos, incluindo também a gestão de dados sobre ativos, entre outros. Os cenários de máquinas inteligentes envolvem o desempenho de máquinas industriais, contemplando aplicações como a previsão de falhas, a deteção de problemas de qualidade e a necessidade de manutenção preventiva. Dentre esses, o caso de uso mais destacado é a manutenção preventiva condicionada, também chamada de *Predictive Maintenance* (PdM) ou manutenção preditiva [21].

A manutenção “é a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou a repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida” [22]. A manutenção corretiva, também conhecida como manutenção imediata ou *run-to-failure*, é uma abordagem que se foca na reparação após a ocorrência de uma falha [5], sendo definida pela norma NP EN 13306:2007 [22] como a manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria, e destinada a repor o bem num estado que possa realizar uma função requerida.

Por outro lado, a Manutenção Preventiva é a “manutenção efetuada a intervalos de tempo pré-determinados ou de acordo com critérios prescritos, com a finalidade de

reduzir a probabilidade de avaria ou degradação do funcionamento de um bem”. Esta pode ser Preventiva Sistemática, que é efetuada a intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controle prévio do estado do bem; ou Preventiva Condicionada, “baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes” [22]. Esta organização foi ilustrada conforme Figura 2.4.

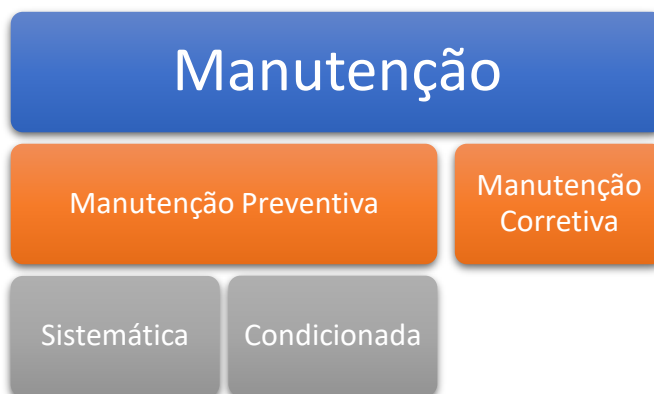


Figura 2.4 – Representação Esquemática da Estrutura de Manutenção segundo a NP EN 13306:2007 [19].

É relevante mencionar que uma estratégia avançada de manutenção, chamada manutenção prescritiva, foi recentemente adotada como uma extensão da PdM. A manutenção prescritiva melhora e otimiza as informações fornecidas pelos sensores e processos de manutenção, controlando a ocorrência de eventos específicos [5].

A sustentabilidade, quando em contexto industrial, é um conceito multidimensional que busca equilibrar o desenvolvimento económico, a responsabilidade ambiental e o bem-estar social, de forma a minimizar os impactos negativos das atividades industriais no meio ambiente e nas comunidades. A ideia central é que as indústrias devem adotar práticas que garantam sua viabilidade económica a longo prazo, sem comprometer a capacidade do meio ambiente sustentar as gerações futuras [23]. Nesse contexto, a sustentabilidade industrial também deve procurar uma sinergia entre eficiência económica e proteção ambiental, com ênfase na redução de emissões, reaproveitamento de materiais e inovação tecnológica [24].

A relação entre a Indústria 4.0 e a sustentabilidade tem sido amplamente discutida na literatura académica, Jamwal et al. [25] identificaram sinergias significativas entre estas duas áreas. As tecnologias da Indústria 4.0, como a *Internet of Things* (IoT), *Big Data*, Inteligência Artificial (IA) e automação avançada, permitem uma integração digital e conectada das operações industriais, promovendo uma gestão mais eficiente dos recursos e processos produtivos. Essas inovações digitais têm o potencial de aumentar a eficiência energética, reduzir resíduos e otimizar o uso de materiais, o que, por sua vez, contribui diretamente para a redução dos impactos ambientais das atividades industriais. Ao digitalizar e automatizar as cadeias de abastecimento e operações fabris,

a Indústria 4.0 facilita a economia circular e a gestão sustentável dos recursos, melhorando a capacidade das empresas de monitorizar e reduzir as suas emissões de carbono e outros impactos ecológicos [25]. Na Figura 2.5, é exemplificada a cadeia IoT.

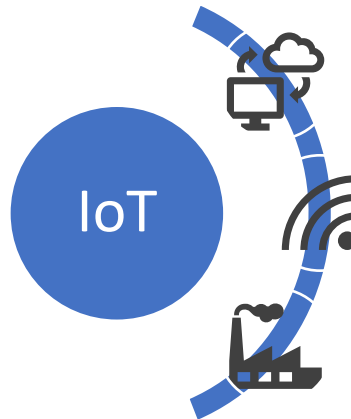


Figura 2.5 – Exemplificação da IoT.

Além disso, Zhong et al. [26] apontam que a Indústria 4.0 pode não só promover a eficiência ambiental, mas também contribuir para a viabilidade económica das indústrias, criando uma sinergia entre sustentabilidade e competitividade. A conectividade digital e a automação permitem que as empresas adaptem rapidamente os seus processos, reduzindo o desperdício de tempo e materiais e melhorando a flexibilidade operacional. Ao integrar tecnologias como a IA e o Big Data, as indústrias podem prever demandas e ajustar as suas operações de forma mais sustentável, reduzindo excessos de produção e consumo de energia. No entanto, Zhong et al. [26] também alertam que a plena implementação destas práticas sustentáveis depende de fatores como o investimento em infraestruturas tecnológicas e a capacitação da força de trabalho, o que representa um desafio para muitas empresas, especialmente pequenas e médias.

Os estudos de Chiara Franciosi et al. [27] e Małgorzata Jasiulewicz et al. [28] destacam a importância da evolução e transição das práticas de manutenção tradicionais para abordagens mais proativas e inteligentes, que utilizam tecnologias digitais emergentes para promover um desempenho sustentável, com uso de dados e partilha de informações.

A implementação de práticas de manutenção, através das ferramentas da I4.0, não apenas melhora a eficiência operacional, mas também reduz os desperdícios e o consumo de energia. Estas práticas ajudam a prolongar a vida útil dos ativos, permitindo muitas vezes que os produtos e componentes sejam reparados e reutilizados, em vez de descartados, alinhando-se com os princípios da economia circular. Além disso, com as técnicas de controlo de condição, as empresas podem identificar rapidamente perdas de eficiência e outros parâmetros, agindo antes que problemas se tornem críticos, contribuindo para um ambiente de produção mais sustentável [27].

Ainda no contexto da manutenção e sustentabilidade, a transição para a PdM não só resulta em menos paragens não programadas, mas também permite uma gestão e controlo mais eficiente dos recursos, contribuindo, por exemplo, para a eficiência energética e para a redução das emissões de carbono, por exemplo [28]. Essas tecnologias permitem um alinhamento e progressão cada vez mais sustentável face ao que era utilizando em períodos anteriores.

Portanto, a manutenção, quando aliada à Indústria 4.0 e suas ferramentas, torna-se um ponto vital para impulsionar a sustentabilidade em contexto industrial, assim, deve ser vista como uma oportunidade para alinhar as operações industriais com as metas de desenvolvimento sustentável, através da redução do impacto das diversas atividades ali realizadas [27,28].

Face a isto, é necessária uma boa gestão da manutenção. Considera-se que a gestão da manutenção é uma “atividade de planeamento, organização, coordenação e controlo das atividades de manutenção, com o objetivo de garantir que os ativos mantenham o seu desempenho desejado em condições seguras e económicas” [22]. O alinhamento estratégico entre a gestão da manutenção e os objetivos de negócios mais amplos, incluindo a sustentabilidade são de extrema importância. A gestão eficaz da manutenção, quando bem implementada, pode contribuir para a longevidade dos ativos e para a redução da pegada ambiental das operações, promovendo um ciclo de vida mais sustentável para os produtos e serviços oferecidos pelas empresas na era da Indústria 4.0 [29].

Aliado à gestão da manutenção, o conceito de MRO, que significa Manutenção, Reparação e Operações, é de grande importância. Esta técnica descreve ações, mão de obra, materiais e outros requisitos para manter um equipamento funcionando de maneira correta [30].

No MRO estão incluídas atividades que compreendem estratégias de gestão de inventário, de manutenção preventiva sistemática ou condicionada, e de manutenção corretiva. Além disso, a utilização desta ferramenta pode ajudar as organizações a atingirem seus KPIs, possibilitar ambientes de trabalho mais seguros e sustentáveis, aumentar a fiabilidade dos equipamentos e reduzir a rotura de estoque [31].

Alguns exemplos de MRO incluem equipamentos (por exemplo, bombas, motores, e compressores), consumíveis (por exemplo, produtos de limpeza e material de escritório) e suprimentos de manutenção (por exemplo, lubrificantes, juntas e ferramentas) [32]. A melhor forma de gerir adequadamente esta técnica, é através da utilização de um CMMS (*Computerized Maintenance Management System*), ou em Português: Sistema de Gestão de Manutenção Computacional.

O CMMS [33,34] é uma ferramenta de software usada por técnicos operacionais, técnicos de planeamento, engenheiros e programadores para facilitar a gestão da manutenção na organização. Normalmente, um software CMMS consolida a gestão, o

monitoramento e a melhoria das atividades de manutenção, possibilitando às empresas aumentarem a fiabilidade e a eficiência no uso de ativos físicos, como máquinas, veículos, equipamentos e infraestrutura. Alguns exemplos de recursos de um software CMMS, que também podem ser visualizados na Figura 2.6 [33]:

- 1) Gestão de ordens de serviço: automatiza e simplifica o processo de criação, atribuição e rastreamento de tarefas de manutenção.
- 2) Gestão/programação de recursos e mão de obra: ajuda suas equipas a alocarem recursos humanos e materiais de forma eficaz, resultando em maior eficiência e produtividade.
- 3) Registo de ativos: fornece um banco de dados centralizado para todos os seus ativos, facilitando a gestão e o rastreamento deles na empresa.
- 4) Monitoramento de condições: usa sensores de IoT para rastrear continuamente o status de seus ativos e equipamentos, alertando as equipas de manutenção sobre anomalias o mais cedo possível.
- 5) Manutenção preditiva: reúne e analisa dados históricos e em tempo real para prever quando o equipamento precisará de manutenção e atenção - antes de uma falha ou avaria.



Figura 2.6 – Principais funções de um CMMS.

Wits et al [35] estudaram a relação do MRO com o FA, de forma a otimizar a primeira estratégia utilizando a última. Neste estudo, é possível perceber que esta técnica de fabrico já é considerada uma atividade de MRO no setor aeroespacial, automóvel, marítimo e ferroviário, onde se regista desgaste excessivo de peças. Assim, os autores estabeleceram o *process flow* do MRO, que teriam dois principais processos: *Standard process flow*, e o *End-user optimized process flow*. Este fluxo teria como função permitir aos utilizadores finais encurtar o *loop* da economia circular e otimizar as peças e a utilização do equipamento. Ao seguir estas estratégias, de acordo com o autor, os utilizadores finais tiram partido do FA na área MRO para restaurar/refabricar componentes padrão ou substituir uma peça avariada/quebrada por uma impressa. O Fabrico Aditivo, embora amplamente utilizado para produção de baixo volume ou peças personalizadas, pode ser uma alternativa económica para a produção em larga escala, conforme discutido por Slama et al. [36]. No estudo de caso analisado pelos autores no domínio da moldação por injeção de plástico, foi demonstrado que a técnica possibilita o desenvolvimento de estruturas com design ilimitado para canais de

arrefecimento de formas altamente complexas, anteriormente produzidos por meio de técnicas convencionais de maquinagem. Assim, houve ganhos tanto no tempo de arrefecimento, que impacta diretamente a qualidade, quanto na facilidade de manutenção deste sistema.

Oyesola et al [37] abordaram a aplicação de um modelo de custo para o fabrico híbrido-aditivo, que seria a junção de um processo comum de maquinagem (remoção de material) com um processo de fabrico aditivo (adição de material), ilustrado na Figura 2.7. Segundo Oyesola et al [37], este modelo teria como benefício a sustentabilidade da engenharia, ao longo do ciclo de vida, para o MRO na indústria aeroespacial. Outra vantagem seria a flexibilidade de design, redução de desperdício de material e reparações eficientes de componentes complexos. O modelo de custo estimado que foi proposto pelo estudo visa avaliar a viabilidade económica desta abordagem, considerando fatores como custo de produção, tempo de ciclo, consumo de energia e impacto ambiental. Os autores demonstraram o modelo, através do estudo de caso, de um suporte aeroespacial em titânio, e basearam-se na análise crítica de como atribuir corretamente os custos relacionados às atividades associados ao processo híbrido de fabrico. Dessa forma, seria possível permitir ao fabricante identificar as maiores alavancas de custos antes do fabrico, impulsionando a eficiência do processo.



Figura 2.7 – Fabrico Híbrido-Aditivo como resultado da junção de outros dois processos.

Lastra et al [38] estudaram os benefícios e impactos da utilização fabrico aditivo para a fabricação de peças de reposição, aliadas à manutenção preventiva. Neste trabalho, foram destacados os desafios da gestão de materiais em stock e custos associados, tempos de entrega demasiadamente longos e a obsolescência destas peças. Desta forma, numa fábrica automóvel localizada em Vigo, na Espanha, foi realizado um estudo de caso em que, peças de reposição foram projetadas e fabricadas utilizando técnicas de fabrico aditivo. Diferentes materiais e tecnologias de impressão 3D foram utilizadas para garantir que as peças cumprissem os requisitos técnicos e de desempenho. As peças elegíveis foram selecionadas após passar por critérios como: compatibilidade de material, complexidade geométrica, impacto na manutenção, capacidade de impressão, rigidez e funcionalidade. Como conclusão, foi observado que no FA de polímeros, os custos e o tempo de fabrico diminuíram drasticamente em comparação com o fabrico convencional. No entanto, a tecnologia utilizada de FA de metal para peças

sobresselentes é dispendiosa e ainda não é economicamente rentável, uma vez que não atinge as taxas de produção necessárias. Ainda no contexto do FA de polímeros, constatou-se que a impressão com sistema *multi-jet* é mais económica do que com o sistema SLS, e que o fabrico aditivo de peças sobresselentes neste material desempenha um papel crucial na manutenção preventiva e tende a ganhar ainda mais relevância no futuro. Além disso, é essencial considerar o tempo de fabrico no planeamento da manutenção, garantindo que esta tecnologia seja uma ferramenta eficaz.

Das várias técnicas de I3D existentes no mercado, podemos destacar a FDM e a DLP. A FDM (*Fused Deposition Modeling*) é uma das tecnologias de fabrico aditivo mais populares e consolidadas, desenvolvida há cerca de 30 anos [39]. Destaca-se por ser um método seguro, eficiente e acessível, permitindo a produção rápida de peças com elevada liberdade de personalização [39,40].

O processo consiste na extrusão de termoplásticos aquecidos que são depositados camada por camada por um bocal móvel, formando o objeto tridimensional com base num modelo digital dividido em camadas bidimensionais [40]. A FDM é amplamente utilizada na prototipagem funcional e em setores como o aeroespacial, automóvel e biomecânico [39]. Pode-se visualizar uma configuração comum do equipamento responsável por este tipo de fabrico na Figura 2.8 [41].

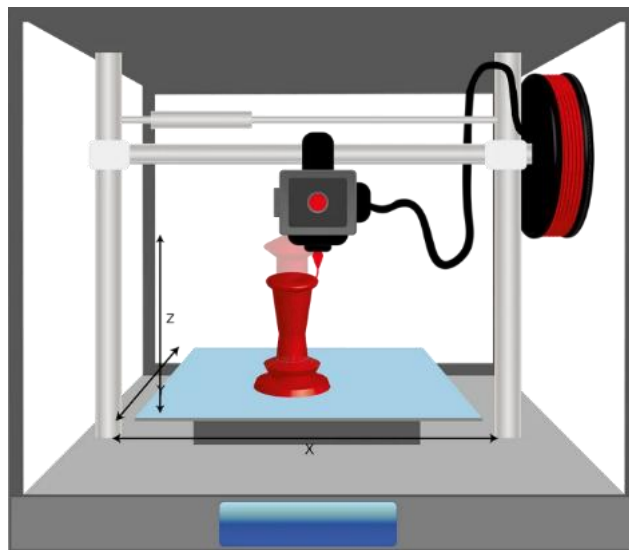


Figura 2.8 – Representação gráfica do processo de FDM [41].

A *Digital Light Processing* (DLP), por sua vez, é uma tecnologia que utiliza a luz projetada de forma a transformar materiais líquidos em sólidos, criando estruturas precisas a partir de modelos digitais [42], que é dividido em camadas finas, representando cortes horizontais do objeto. Essas camadas são projetadas na superfície de uma resina líquida por um projetor DLP. Quando a luz incide sobre a resina, ela solidifica, formando uma camada rígida. A plataforma de construção move-

se para que uma nova camada de resina cubra a anterior, repetindo o processo até a peça ser formada camada por camada [43], ilustrado na Figura 2.9.

Além disso, o DLP, de acordo com estudo desenvolvido em Coimbra, Portugal [44] pode ser utilizado para impressão 3D de hidrogéis com boa resolução e fidelidade de forma através de uma resina 100% feita de celulose. Desta forma, devido às suas propriedades como alta estabilidade estrutural, é uma alternativa a ser pensada para, no futuro, diminuir a dependência das resinas comuns, produzidas com material de origem fóssil [44].

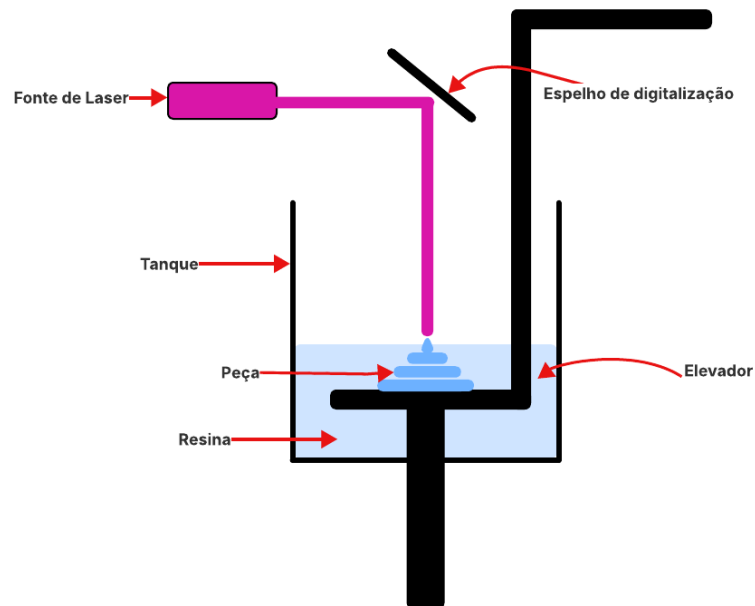


Figura 2.9 – Representação gráfica do processo de DLP.

3 Estudos de casos

O objetivo principal da utilização do Fabrico Aditivo, neste projeto da The Navigator Company - Setúbal, é a seleção, produção e aplicação de peças impressas em 3D, de forma a serem utilizadas na manutenção. Além disto, gerar uma redução de níveis de stock do armazém através da futura criação de uma biblioteca digital, conforme apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Principais objetivos do FA relativamente à peças de substituição.

O FA dentro da empresa possui vantagens, tanto no domínio técnico tanto no económico (Figura 3.2), uma vez que, como já apresentado, poderá mitigar diversos problemas comuns à outras técnicas de fabrico como fundição e usinagem, além de possibilitar o fabrico de peças com desenhos mais desafiadores e possibilitar melhorias no mesmo.

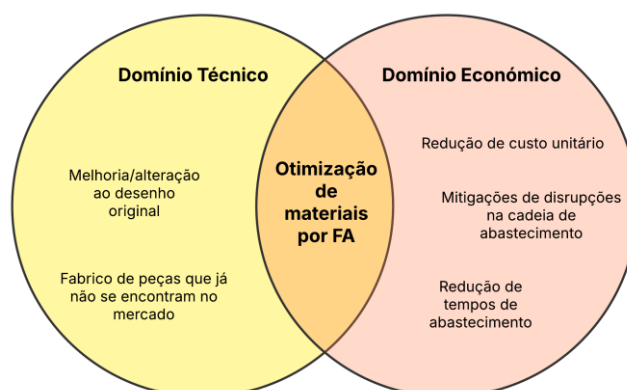


Figura 3.2 – Vantagens do domínio técnico e económico do FA.

A aplicação deste estudo de caso realizou-se numa fábrica de papel e celulose localizada em Setúbal - Portugal, (ver Figura 3.3) que possui 4 armazéns para os mais diversos tipos de peças sobresselentes.

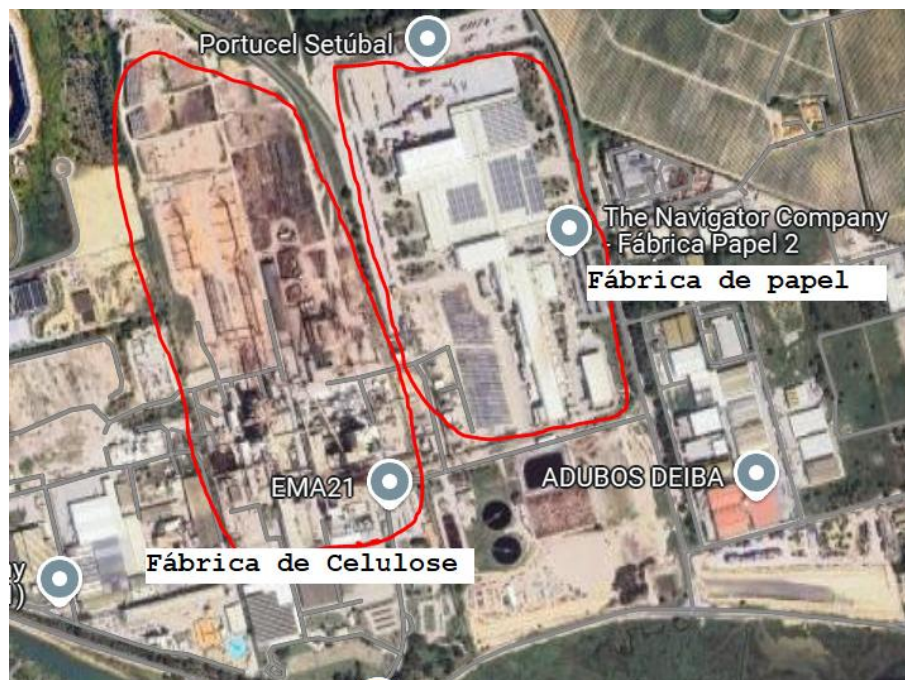


Figura 3.3 – Localização da Fábrica de Papel e Celulose na The Navigator Company - Setúbal

3.1 Proposta de um processo de manutenção preventiva utilizando o Fabrico Aditivo

Numa planta industrial, como discutido no Capítulo 2, a manutenção preventiva assume um papel de crucial importância para garantir o bom funcionamento e a fiabilidade dos equipamentos. Quando a avaria de uma máquina está relacionada com uma peça sobresselente, é essencial que a sua substituição ocorra num curto intervalo de tempo, de forma a evitar paragens na produção e consequentemente perdas financeiras.

Neste contexto, no processo de substituição de peças na The Navigator Company - Setúbal, a requisição do item é efetuada através do software SAP MM 770, verificando a sua disponibilidade em stock. Caso o material esteja disponível, ele é levantado por pessoal autorizado e a sua respetiva substituição é efetuada. No entanto, caso a peça não esteja disponível, por já não ser fabricada, por possuir prazos de entrega ou custos elevados, pode recorrer-se ao fabrico aditivo (impressão 3D), com o apoio de uma empresa parceira especializada. A Figura 3.4a ilustra como o processo convencional de tomada de decisão é realizado no momento da deteção de uma avaria na The Navigator Company – Setúbal, enquanto a Figura 3.4b ilustra como é feito o estudo de seleção para peças sobresselentes serem fabricados por FA.

A identificação e estudo de possíveis peças para o fabrico aditivo, como ilustrado na Figura 3.4b, é realizado através do *know-how* e sugestão do responsável de área em conjunto com os colaboradores de manutenção e produção. Muitos dos itens fornecidos para a fábrica de papel são importados de uma empresa americana, que contém o monopólio, refletindo-se nos elevados custos de substituição de peças.

Para a seleção destas peças sobresselentes, a The Navigator Company utilizou critérios preliminares como custo, indisponibilidade de peças originais, *Lead Time* (LT) e a quantidade de peças a substituir. Através da utilização do SAP 770, nos módulos *Materials Management* e *Plant Maintenance*, foram extraídas as informações correspondentes, que foram organizadas numa Tabela. De seguida, o responsável de área entra em contacto com a empresa parceira para verificar a viabilidade da produção dos itens através do FA. Uma vez validado, o projeto é submetido à Gestão de Topo, nomeadamente à Direção de Produção e Manutenção (ver Figura 1.1b da Secção 1.1), para análise e aprovação de investimento. Nesta fase, está prevista a requisição de verbas para a execução de um projeto de melhoria que traga benefícios à empresa. Por fim, estas peças são testadas em serviço e, caso apresentem um desempenho satisfatório, são adicionadas a uma lista final.

Através do FA, todo o processo que consiste na verificação do material impresso, sua produção e instalação, leva um determinado tempo que poderá ser calculado através da Equação (3.1).

$$TMSFA = T_F + LT + T_I \quad (3.1)$$

onde $TMSFA$ é o tempo médio de substituição com o Fabrico Aditivo, T_F é o Tempo Médio de Fabrico, LT é o Tempo de Entrega e T_I é o Tempo de Instalação. O Tempo Médio de fabrico T_F tem em consideração o tempo individual de fabrico e o número peças. Este tempo, T_F , é calculado através da Equação (3.2).

$$T_F = \frac{\sum_i t_i}{n} \quad (3.2)$$

onde t_i é o tempo de fabrico individual da peça e n é o número de peças encomendadas. Além disso, deve considerar-se o tempo de vida médio de cada peça sobresselente, TMS , neste caso produzida por fabrico aditivo, que irá depender das solicitações em serviço, ambiente e material.

Desta forma, a Figura 3.5 ilustra a aplicação da Equação (3.1) e (3.2) num determinado momento em que é gerada uma avaria na fábrica e necessário o fabrico aditivo de uma peça. Nesta representação, verificam-se duas etapas:

- a) O Tempo médio de substituição, $TMSFA$, com fabrico aditivo, composta pelo somatório dos tempos presentes na Equação (3.1);
- b) Aplicação da manutenção preventiva sistemática através de um plano de manutenção criado em SAP que irá encomendar a peça sobresselente produzida por fabrico aditivo, num tempo pré-determinado antes do tempo de vida médio.

Assim, quando a peça já instalada chegar ao fim de sua vida útil, uma substituta já estará disponível para recolha em armazém.

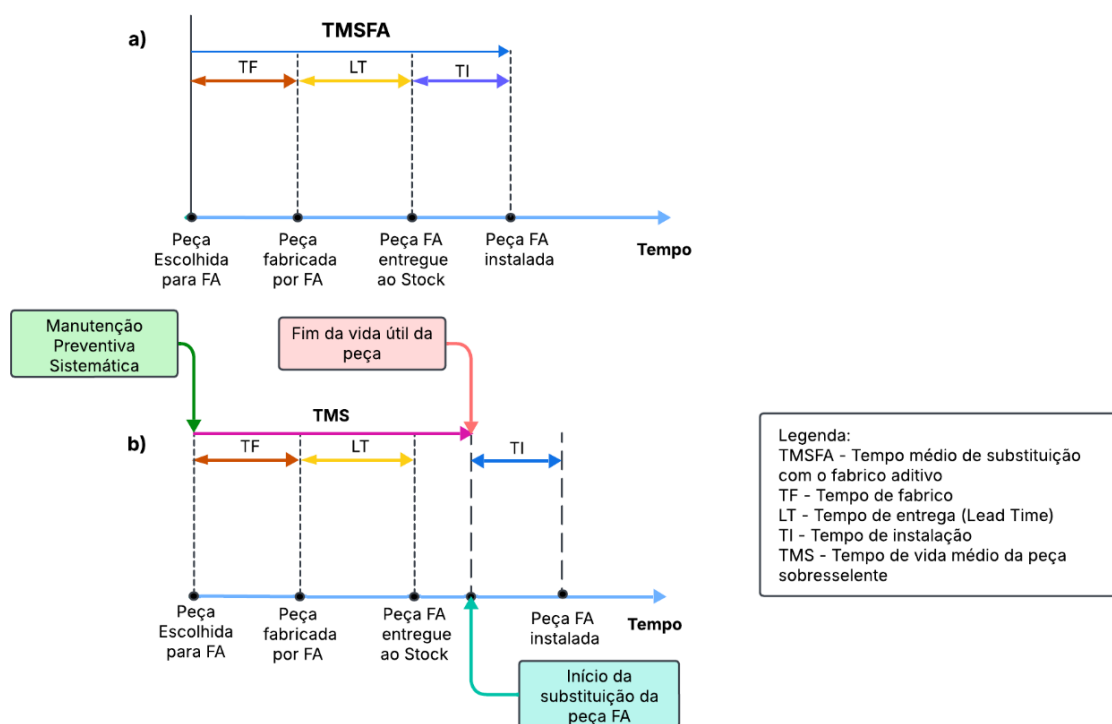


Figura 3.5 – Proposta de Manutenção Preventiva Sistemática utilizando o FA: a) Tempo médio de substituição; b) estratégia para aplicação da Manutenção Preventiva Sistemática de forma a levantar a peça no tempo correto (fim da vida útil da peça).

A Manutenção Preventiva Sistemática tem impacto significativo no desempenho dos equipamentos e, conseqüentemente, na produção. Ao estabelecer um plano de manutenção que contemple a substituição das peças sobresselentes, produzidas por fabrico aditivo, antes do fim da vida útil estimada, cria-se um ambiente mais fiável e com maior controlo sobre a produção.

3.2 Verificação Económica das peças escolhidas pela fábrica para serem fabricadas via FA

Toda verificação económica realizada neste trabalho teve início com a consulta do SAP PM 770. A partir da informação extraída, elaborou-se uma Tabela, com os seguintes dados: código de material, texto breve do material, local de armazém, quantidade em stock, tempo de entrega (LT), consumo total, preço médio móvel e custo total.

3.2.1 Fábrica de Papel

No caso da unidade fabril de produção de papel, os dados importados do SAP 770 foram filtrados para o período compreendido entre 2009 e 2025. O custo total (CT) foi calculado através da Equação (3.3), onde o preço médio móvel (PMM) é apurado com base nesse

intervalo temporal, para a peça convencional. Como resultado, foi possível aferir o impacto monetário de cada peça sobresselente na fábrica, onde CST é o consumo total.

$$CT = CST \times PMM \quad (3.3)$$

Para a empresa parceira responsável pelo fabrico aditivo, é fundamental fornecer informações sobre as condições de operação e o ambiente em que as peças irão funcionar. Com base nesses dados, é possível recomendar o material mais adequado para a produção das peças por FA. A seleção desses componentes do estudo de caso encontra-se na Tabela 3.1, onde constam o nome de cada componente, a técnica de fabrico, o material utilizado, o LT, o valor unitário e a percentagem de redução de custos obtida com o fabrico aditivo em comparação com o método convencional.

Tabela 3.1 – Comparação económica entre peças fabricadas por FA e de forma convencional.

Peça e técnica I3D	Finger Plate (FDM)		Rolete (DLP)	
	FA	Convencional	FA	Convencional
Material	PPA-CF	Aço Inox	Resina UV	POM-H
LT (dias)	15	15	15	15
Valor Unitário móvel	78,00€	665,43€	15,75€	35,00€
Redução de custo (€) $\frac{C_{convencional} - C_{FA}}{C_{convencional}}$	88,27%		55%	

3.2.2 Fábrica de celulose

Na fábrica de celulose, não há uma grande quantidade de peças de desgaste de pequenas ou médias dimensões que sejam consideradas prioritárias pela Direção para substituição através do fabrico aditivo. Neste contexto, foi sugerido o estudo de viabilidade da impressão 3D do rotor de uma bomba centrífuga de câmara bipartida (*Horizontal Split-Case Centrifugal Pump*), cujo valor e prazo de entrega são particularmente elevados.

Os modelos dessa bomba, atualmente em operação na fábrica de celulose de Setúbal, estão listados na Tabela 3.2. Para a construção desta Tabela, recorreu-se novamente ao SAP 770, tendo sido agrupadas informações relevantes, tais como:

1. TAG do equipamento: código de identificação único do equipamento na fábrica, levando em consideração primeiramente o seu local de instalação;
2. Local de Instalação;
3. Código do equipamento;
4. Descrição do equipamento.

Tabela 3.2 – Informações das bombas centrífugas dentro da fábrica de acordo com o SAP PM 770.

TAG	Local Instalação	Código do Equipamento	Descrição Equipamento
140P014	D140-03-03-05	D30239	BB CENT HORIZ LAVAL Z-K20R15 (Modelo 4)
240P111	D240-02-04-05	D30265	BB CENT HORIZ WORTHINGT 6L2 SIMPSON (Modelo 2)
240P125	D240-03-03-05	D30263	BB CENT HORIZ WORTHINGT 12LA2 SIMPSON (Modelo 3)
240P128	D240-03-05-05	D30269	BB CENT HORIZ WORTHINGT 8L1 SIMPSON (Modelo 1)

Os principais critérios definidos para a seleção da bomba incluíram a exclusão de equipamentos utilizados no circuito de incêndio e a preferência por bombas dimensão média, com diâmetro do rotor inferior a 500 milímetros. Para garantir a segurança da aplicação, considerou-se ainda que a bomba selecionada deveria operar com água, evitando, assim, fluidos corrosivos, e dispor de sistema redundante. Os dados recolhidos referem-se, portanto, a todas as bombas que cumpriam estes requisitos bem como os respetivos rotores.

Com a exclusão do Modelo 3 e 4, devido aos critérios definidos anteriormente, restaram apenas os Modelos 1 e 2. No entanto, com uma menor existência em armazém e a maior quantidade de aplicações deste modelo na fábrica, o Modelo 2 foi escolhido para ser caso de estudo no presente trabalho.

Embora a ausência total da peça em armazém pudesse justificar, de forma mais clara, a escolha para estudo, tal situação exigiria a autorização da Produção, abertura do equipamento, desmontagem e limpeza para recolha e desenho do rotor, etapas que implicariam maior tempo e custos. A existência de uma peça reserva, por outro lado, facilitou a modelação digital por parte da empresa parceira. Estes critérios de seleção encontram-se descritos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Tabela de apoio à decisão da bomba cujo rotor seria estudado.

Equipamento	Dimensão	Circuito de Incêndio	Quantidade em Armazém (Rotor)	Quantidade aplicada na Fábrica
Modelo 1	Média	Não	2	1
Modelo 2	Média	Não	1	3
Modelo 3	Grande	Não	0	4
Modelo 4	Pequena	Sim	0	4

Devido a durabilidade estabelecida para esta dissertação, a análise económica do rotor encontra-se ainda numa fase muito inicial, sem proposta de materiais via fabrico aditivo.

3.3 Estudo técnico dos componentes alvo de estudo

Este subcapítulo dedicou-se ao estudo comparativo das propriedades mecânicas e tribológicas dos materiais que constituem os componentes obtidos por via convencional e por fabrico aditivo. Sempre que aplicável, procedeu-se, à análise do principal esforço que a peça estava sujeita, bem como à estimativa do seu tempo de vida útil, com base no histórico de utilização em fábrica. Essa análise foi feita após a verificação do benefício económico.

3.3.1 Rolete

O rolete tem como função principal tracionar correias transportadoras e movimentar resmas de papel de 2.5 kg. Cada "cassete" (ver Figura 3.6), onde são encaixados os roletes, possui 22 roletes fabricados, convencionalmente, em POM-H.

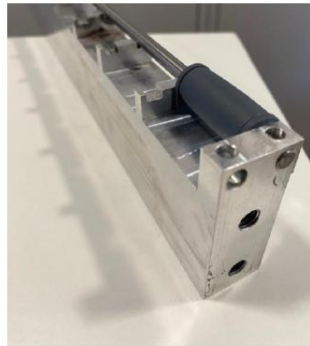


Figura 3.6 – "Cassete" com 1 rolete em Resina UV apoiado sobre o varão.

Internamente, cada rolete possui 3 casquilhos metálicos, Figura 3.7c. Apenas os 7 roletes da parte de cima da estrutura (ver seta da Figura 3.7b) suportam o peso da resma de papel. Todos os roletes sofrem desgaste devido à correia (correias verdes da Figura 3.7a e 3.7b). A produção é contínua, o que significa que estas peças trabalham durante 24 horas.

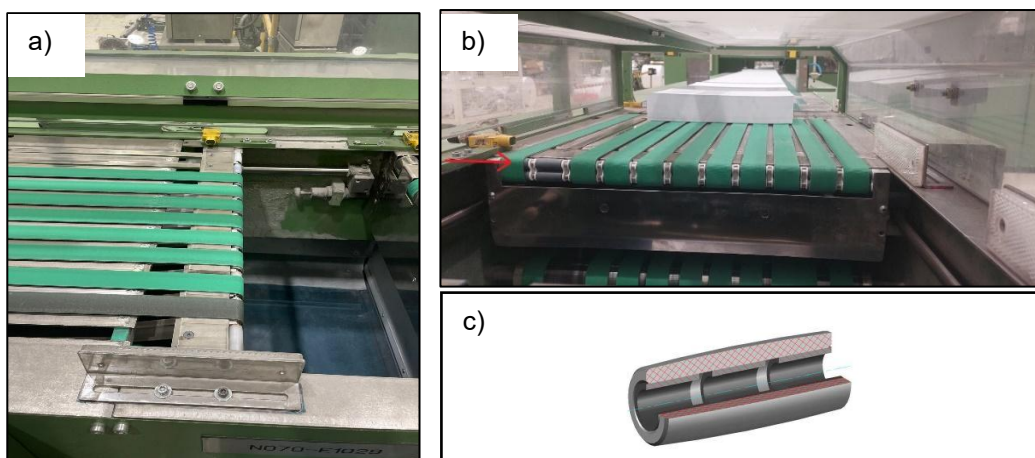


Figura 3.7 – Transportador de resmas: (a) Vista lateral; (b) Vista frontal das 2 cassetes; (c) Corte parcial do rolete em POM-H.

Os roletes do transportador estão sujeitos a esforços de flexão (por estarem bi-apoiados com uma carga centrada) e rotação. Nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6 são apresentadas as principais propriedades mecânicas dos materiais Aço Inoxidável AISI 304 (casquilho e varão), Resina UV Igus i3000 (material de FA para substituição do original) e do POM-H (material de fabrico convencional, original), respetivamente.

Tabela 3.4 – Propriedades do aço inoxidável AISI 304 [45].

Aço Inoxidável AISI 304		
Propriedade	Valor	Norma
Densidade (g/cm ³)	7,85 – 8,06	-
Temperatura de Fusão (K)	1.673-1.723	-
Módulo de Young (GPa)	190–200	ASTM A240
Resistência à Tração (MPa)	505	ASTM A240
Módulo de Flexão (GPa)	-	-
Resistência à Flexão (MPa)	257,50 MPa	ASTM A240

Tabela 3.5 – Propriedades da Resina UV Igus i3000 [46].

Resina UV Igus i3000	
Propriedade	Valor
Densidade (g/cm ³)	1,30
Módulo de Young (MPa)	1.750
Módulo de Flexão (MPa)	3.010
Resistência à Flexão (MPa)	90
Resistência à Tração (MPa)	43
Dureza Shore D	78
Coefficiente de fricção (V2A, 0.3m/s, 1MPa)	0,22

Tabela 3.6 – Propriedades do POM-H [47].

POM-H		
Propriedade	Valor	Norma
Densidade (g/cm ³)	1.43	ASTM D792
Módulo de Young (MPa)	3.400	DIN EN ISO 527-2
Módulo de Flexão (MPa)	3.450	ASTM D790
Resistência à Flexão (MPa)	106	DIN EN ISO 178
Resistência à Tração (MPa)	79	DIN EN ISO 527-2
Dureza Shore D	85	DIN EN ISO 868
Coefficiente de fricção	0,25 ~ 0,45	QTM 55007 / ISO 7148-2

O presente estudo de caso investiga a possível substituição de roletes convencionais de POM-H por roletes fabricados por DLP com a Resina UV Igus i3000, Figura 3.8. Para tal, recorre-se a uma análise comparativa detalhada das diferenças fundamentais entre as propriedades físico-mecânicas dos dois materiais. Assim, é fornecida uma base sólida para a análise do comportamento esperado referente à substituição do rolete em POM-H fabricado por moldagem por injeção, pelo rolete em Resina UV.

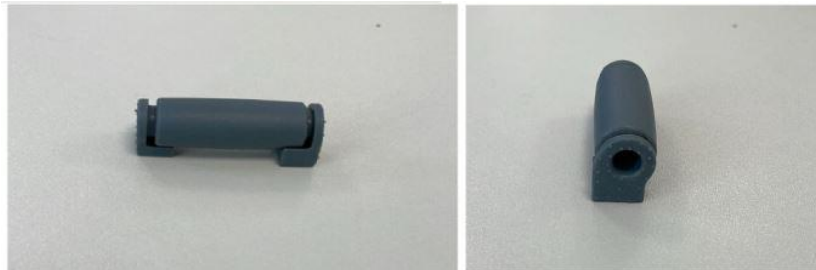


Figura 3.8 – Rolete em Resina UV Igus i3000.

Os roletes possuem as dimensões apresentadas na Tabela 3.7. A Resina UV foi selecionada pela empresa parceira devido às suas propriedades mecânicas (descritas na Tabela 5). Nomeadamente o baixo coeficiente de fricção com Aço Inoxidável (0.22) e características autolubrificantes.

Tabela 3.7 – Dimensões e Momento de Inércia do Rolete.

Nome	Valor	Unidade
Comprimento (L)	31,63	mm
Diâmetro Externo (De)	14,26	mm
Espessura (d)	2,22	mm
Diâmetro Interno (Di)	9,82	mm
Área do tubo (A)	84,02	mm ²
Momento de Inércia (I)	1.573,30	mm ⁴

3.3.1.1 Cálculo da Carga Máxima por Flexão

O cálculo da carga máxima por flexão é útil para ter uma noção de um dos principais esforços ao qual os roletes estão sujeitos. Desta forma, é possível avaliar se a carga aplicada aos transportadores excede a que o material consegue suportar.

Após calcular momento de inércia "I", através da Equação (3.4) [45], apoiada pelas Equações (3.5) e (3.6) [45], procede-se ao cálculo da carga máxima por unidade de comprimento "q" na Equação (3.7) [45]. Posto isto, a carga máxima por rolete "P" poderá ser calculada através da Equação (3.8).

$$I = \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4) \quad (3.4)$$

$$\sigma_{lim_{flexão}} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (3.5)$$

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8} \quad (3.6)$$

$$q = \frac{8 \cdot \sigma_{\text{lim flexão}} \cdot I}{L^2 \cdot c} \quad (3.7)$$

$$P = q \cdot L \quad (3.8)$$

onde $\sigma_{\text{lim flexão}}$ é a tensão máxima de flexão, M é o momento fletor máximo, c é a distância do eixo neutro ao limite do rolete, I é o momento de inércia do material de secção tubular, L é o comprimento do rolete, q é carga distribuída uniforme por unidade de comprimento e P é a carga máxima suportada pelo rolete.

O valor acima calculado desconsidera fatores de segurança (f_s), portanto, para um cálculo mais realista considera-se este fator como 4 [49]. Desta forma, tendo como principal característica de performance a resistência à deformação, calcula-se através da Equação (3.9) a carga máxima por rolete.

$$q_{\text{seg}} = \frac{q}{f_s} \quad (3.9)$$

3.3.1.2 Cálculo do tempo de vida útil média estimada

Devido à existência de um histórico de ruína de 31 unidades de roletes no período de 2018 até 2025, a The Navigator Company consultou a empresa parceira para apresentar uma alternativa ao material dos roletes. Esta consultadoria deveu-se ao facto do fornecimento dos roletes de substituição, pela empresa fabricante da máquina, estar a ser demasiado dispendioso. Isto porque os roletes não são vendidos individualmente, obrigando à aquisição de todo do sistema complexo "cassete" com 22 roletes.

Na Figura 3.9, é apresentada a fotografia da ruína de um rolete. Como se pode verificar, a causa da ruína deve-se ao atrito do rolete em POM-H com o casquilho em aço inoxidável.



Figura 3.9 – Ruína do Rolete de POM-H devido ao desgaste.

O interesse em calcular o tempo de vida útil médio estimado é estabelecer uma manutenção preventiva sistemática como proposta na Secção 3.1. Desta forma, este tempo poderá servir de parâmetro para futura comparação com o rolete em Resina UV quando o mesmo gerar dados suficientes para análise do histórico.

Para prosseguir com o cálculo, foi obtido através da utilização do SAP PM 770, o tempo entre substituições ao longo dos anos. Através do CMMS citado, foram identificadas 31 substituições desde 2018 até abril 2025 de roletes em POM-H, o material utilizado convencionalmente. Todos os dados foram inseridos na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Dados operacionais do rolete em POM-H.

Dado	Valor
Tempo de operação (anos)	8
Total de substituições	31

O motivo principal para esta substituição, como discutido, é a gripagem, reforçando ainda mais o modo de falha por fadiga devido ao contacto com o varão de Aço Inox e os casquilhos. Assim, realizou-se um cálculo do tempo total de operação em horas para todos os roletes, de acordo com a Equação (3.10), considerando o período indicado.

$$\text{Tempo de operação} = 24 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} \cdot 365,25 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \cdot 8 \text{ anos} \quad (3.10)$$

Para dar continuidade ao cálculo, foi necessário calcular o tempo médio entre falhas (MTTF) por rolete ao longo dos 8 anos, de acordo com as equações (3.11) e (3.12), em horas e dias, considerando uma taxa de falhas constante. Estes valores representam a vida útil média estimada do rolete.

$$\text{MTTF (horas)} = \frac{\text{Tempo de operação}}{\text{Total de substituições}} \quad (3.11)$$

$$\text{MTTF (dias)} = \text{MTTF(horas)} \cdot \frac{1 \text{ dias}}{24 \text{ horas}} \quad (3.12)$$

3.3.2 Finger Plate

O Finger Plate, também chamado de "braço esquerdo" ou "empurrador" é uma peça sobresselente em Aço Inoxidável (Figura 3.10a, peça à esquerda) fabricada por laminagem a quente, aparafusada (Figura 3.10c e ver seta da Figura 3.10b) e que tem como principal objetivo segurar uma caixa de resmas de papel e transportá-la para o próximo estágio da expedição (Figura 3.10d).

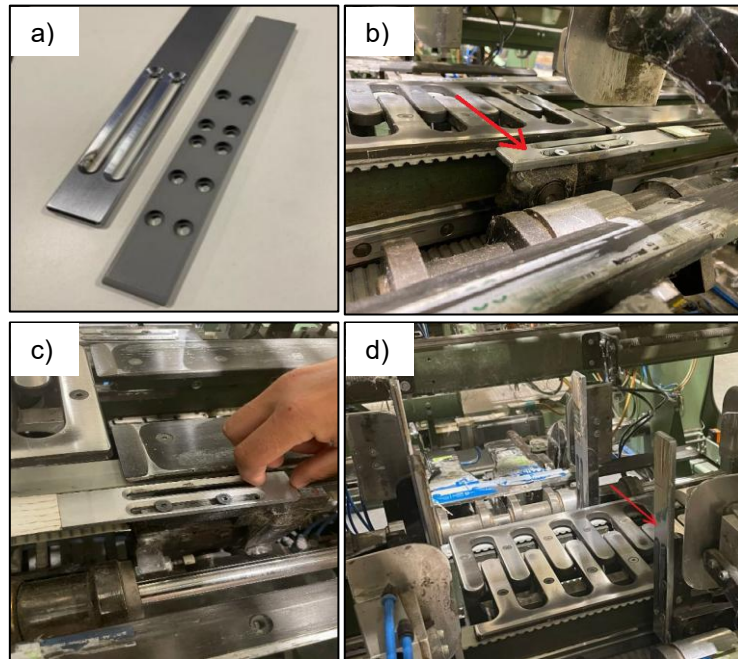


Figura 3.10 – Finger Plate: (a) Componente convencional à esquerda e fabricado por fabrico aditivo à direita; (b) Componente aparafusado; (c) Componente aparafusado visto de cima; (d) Componente na posição de suporte à caixa.

Este componente, após a chegada da caixa com resmas de papel, que variam de 12,5 kg (papel A4) até 25 kg (papel A3), levanta-se rapidamente, choca-se com o produto, e empurra-o por um determinado instante de tempo. Após este movimento, a peça volta à posição inicial. Nesta última etapa, devido ao seu peso, a peça muitas vezes não se alinha com a estrutura e acabar por chocar com a estrutura do equipamento ou receber a caixa de forma irregular. Isto acontece devido à falta de calibração e resistência do atuador em suportar o peso do material em aço inoxidável.

A substituição deste componente foi realizada com o principal objetivo, conforme discutido na Secção 3.2, de reduzir os custos associados aos elevados encargos de substituição do mesmo. A principal preocupação relativamente ao novo material prende-se com a sua resistência ao impacto e o seu peso próprio, uma vez que, como mencionado, este provoca a perda de calibração do atuador responsável pelo seu movimento. A empresa parceira sugeriu o uso do material PPA-CF, cujas principais propriedades estão apresentadas na Tabela 3.9 [50]. O material convencional, conforme referido anteriormente, é o aço inoxidável AISI 304, cujas propriedades estão descritas na Tabela 3.4 [45].

Tabela 3.9 – Propriedades do PPA-CF da BambuLab [50].

PPA-CF BambuLab		
Propriedade	Valor	Norma
Densidade	1,25 g/cm ³	ISO 1183
Temperatura de Fusão	258 °C	-
Módulo de Young (X-Y)	11.800 ± 670 MPa	ISO 527, GB/T 1040
Módulo de Young (Z)	4.300 ± 340 MPa	ISO 527, GB/T 1040
Resistência à Tração (X-Y)	168 ± 4 MPa	ISO 527, GB/T 1040
Resistência à Tração (Z)	57 ± 5 MPa	ISO 527, GB/T 1040
Módulo de Flexão (X-Y)	9.860 ± 480 MPa	ISO 178, GB/T 9341
Módulo de Flexão (Z)	57 ± 5 MPa	ISO 178, GB/T 9341
Resistência à Flexão (X-Y)	208 ± 6 MPa	ISO 178, GB/T 9341
Resistência à Flexão (Z)	63 ± 4 MPa	ISO 178, GB/T 9341

Nas secções seguintes estuda-se através de uma análise comparativa, as diferenças fundamentais entre as propriedades físico-mecânicas do PPA-CF e da Aço inoxidável.

3.3.2.1 Cálculo do tempo de vida útil média estimada

Estimou-se a vida útil do *Finger Plate* convencional (em aço inoxidável) para servir de referência na avaliação do comportamento deste componente em PPA-CF, cuja durabilidade será analisada ao longo do seu funcionamento. Esta peça tem como principal causa de substituição o empeno da estrutura ou fissura na região do rasgo, onde é fixado o parafuso, conforme desenho da Figura 3.11.

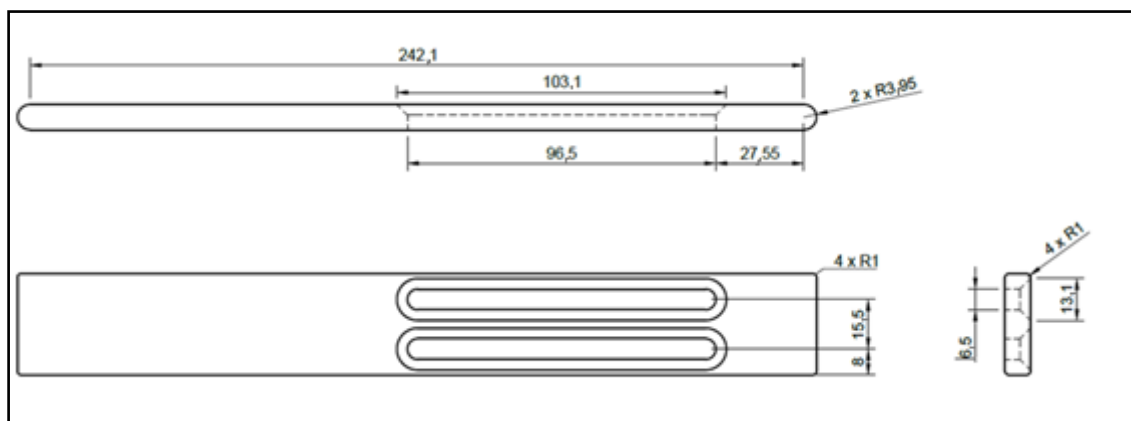


Figura 3.11 – Desenho do componente Finger Plate por fabrico convencional, unidades em mm.

Assim, realizou-se uma alteração no desenho para que a troca de material fosse mais eficiente, conforme o desenho da Figura 3.12. A peça deixou de possuir os 2 rasgos para parafuso sextavado de embeber (onde apenas dois parafusos eram utilizados) e passou a ter 10 furos convencionais que abrangessem as possibilidades de posicionamento do Finger Plate (passou a ser fixado com 3 parafusos), concedendo mais rigidez e estabilidade.

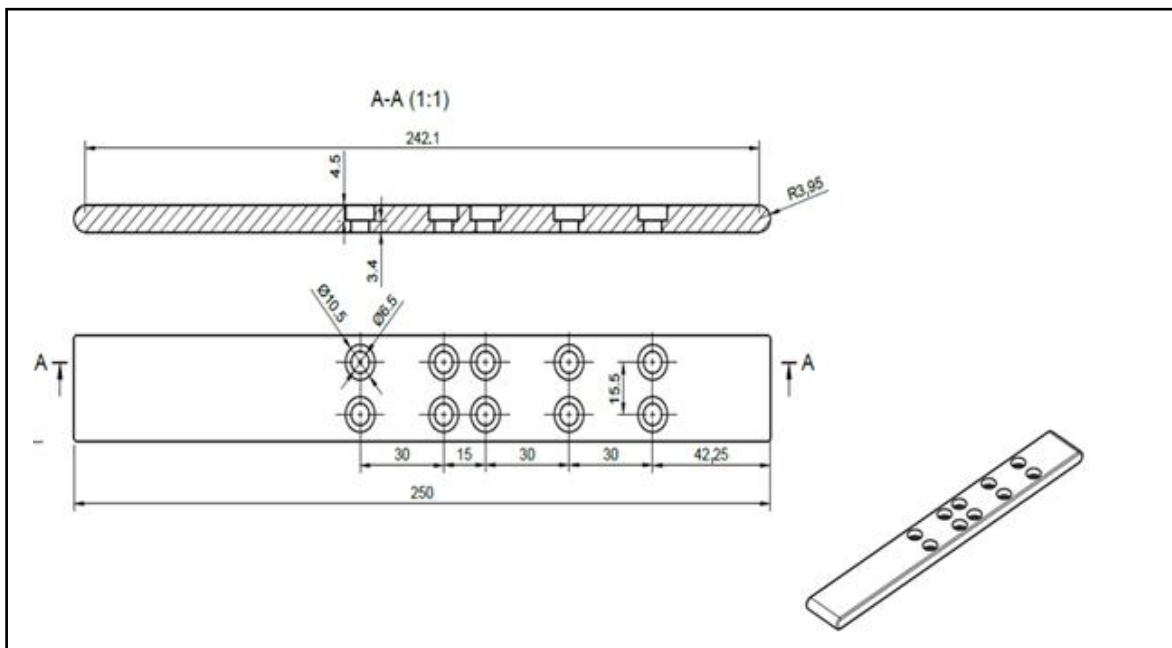


Figura 3.12 – Desenho do componente Finger Plate fornecido pela empresa parceira por fabrico aditivo, unidades em mm.

Com a utilização do SAP PM 770, constatou-se que a peça foi substituída 32 vezes desde 2012 até abril de 2025 devido a fissuras ou empenos. Os dados relativos à operação estão na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Dados operacionais do Finger Plate em aço inoxidável (material convencional).

Dado	Valor
Tempo de operação (anos)	13
Total de substituições	33

Para o cálculo da vida útil, calcula-se através da Equação (3.13) o tempo de operação total:

$$\text{Tempo de operação} = 24 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} \cdot 365,25 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \cdot 13 \text{ anos} \quad (3.13)$$

O tempo médio entre falhas (MTTF) por Finger Plate ao longo dos 13 anos é calculado de acordo com as equações (3.11) e (3.12) da Secção 3.3.1.1.2 em horas e dias. Estes valores representam a vida útil média estimada do Finger Plate.

3.3.3 Rotor

Relativamente ao rotor, alvo de estudo desta tese, o mesmo é utilizado na fábrica de celulose. O local de instalação deste componente é a Captação, Armazenagem e Distribuição de Água 2, o equipamento é a Bomba Centrífuga (Figura 3.13b) e o material é um impulsor fechado de diâmetro 12 1/8" em ferro fundido (Figura 3.13a). Estes dados estão na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Características operacionais da Bomba Centrífuga.

Equipamento	Bomba Centrífuga
Fluído	Água Crua
Carga média [l/s]	30
Rotação [rpm]	1.450
LT [dias]	100
Custo médio do rotor [€]	6.300,90 + IVA
Material do rotor	Ferro fundido

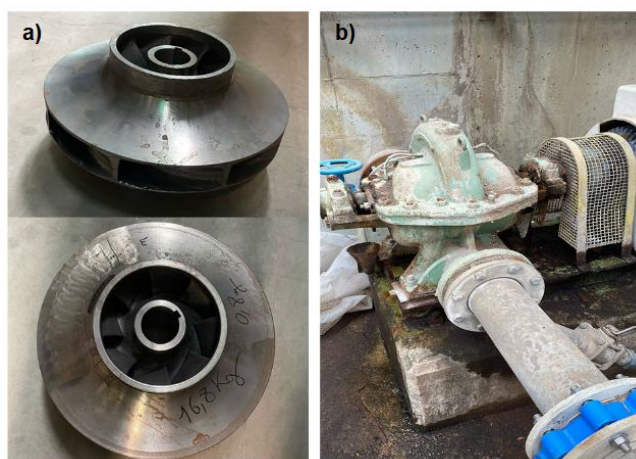


Figura 3.13 – Equipamento de estudo: (a) Rotor; (b) Bomba Centrífuga.

O desenho digital do rotor foi feito pela empresa parceira com a utilização do Scanner 3D Calibry da Thor3D, que utiliza luz estruturada para capturar as deformações dos padrões projetados na superfície da peça, reconstruindo a geometria através de algoritmos complexos [51], conforme Figura 3.14a e 3.14b. É importante ressaltar que, na Figura 3.14a e 3.14b, a coloração verde indica que o erro está dentro do admissível (0,75 mm estabelecido pela empresa parceira), a coloração azul indica que o modelo CAD tem material a menos que a peça física e a coloração vermelha indica que o modelo CAD possui mais material que a peça física.

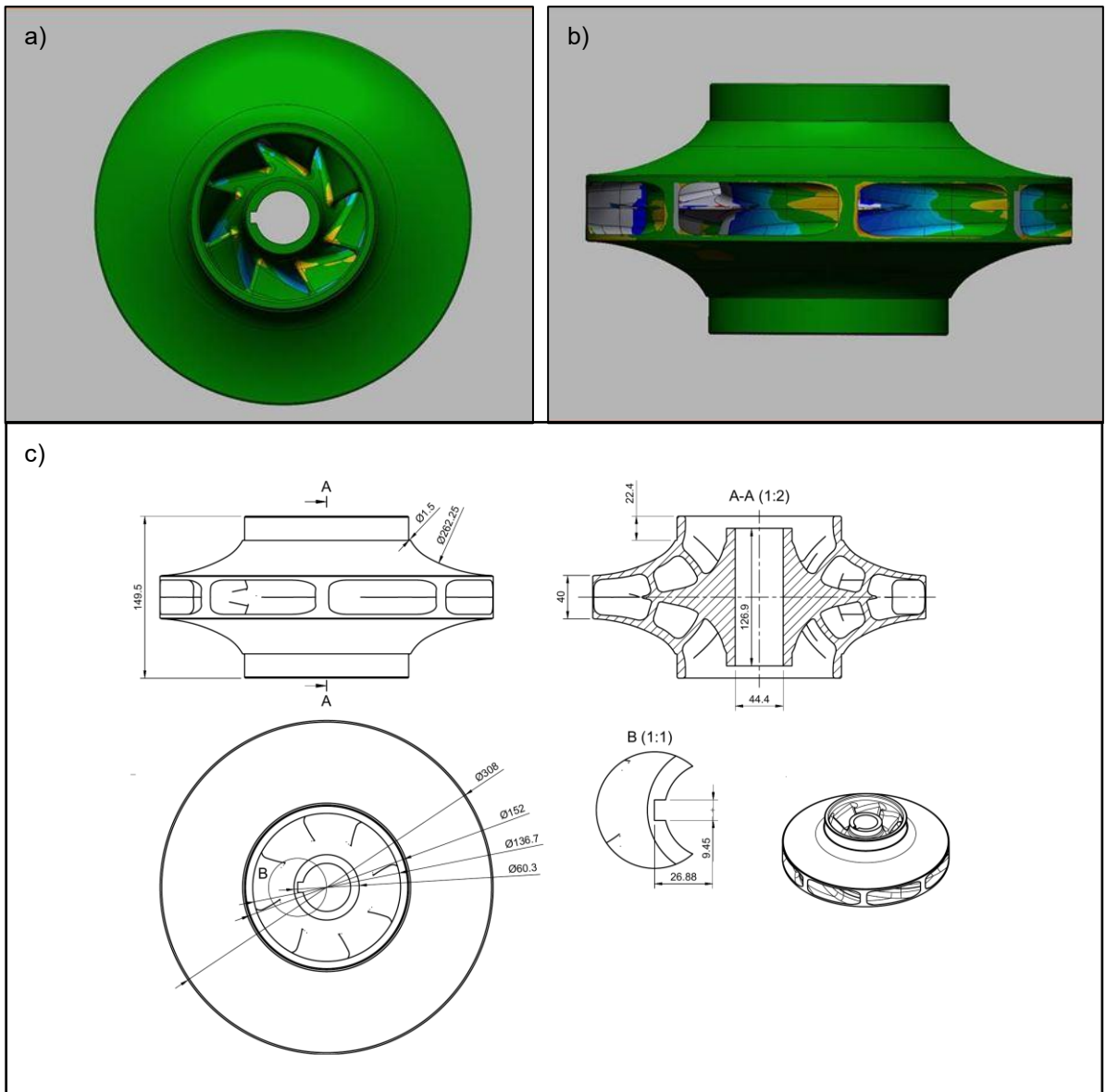


Figura 3.14 – Modelo do rotor para estudo obtido pelo Scanner 3D Calibry Thor: (a) vista de topo a 3D; (b) vista lateral a 3D; (c) dimensões geométricas da vista de tipo, lateral e em cortes.

Para que fosse verificada a possibilidade de substituição do rotor em ferro fundido por outro de material, primeiramente foram verificadas as principais propriedades mecânicas do ferro fundido (Tabela 3.12).

Tabela 3.12 – Propriedades do Ferro Fundido Cinza ASTM 20 [45].

Ferro Fundido Cinza ASTM 20		
Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	7,2	g/cm ³
Módulo de Young	67	GPa
Módulo de Elasticidade Transversal (G)	27	GPa
Resistência à tração	179	MPa
Resistência à compressão	669	MPa
Coefficiente de dilatação térmica	12	10 ⁻⁶ /°C

O presente estudo tem como principal metodologia, para o caso do rotor, a comparação de propriedades entre a proposta sugerida pela empresa parceira de fabrico aditivo e o material convencional de fabricação do rotor já em funcionamento na fábrica. No entanto, devido a durabilidade estabelecida para esta dissertação, o desenvolvimento deste estudo de caso encontra-se ainda numa fase muito inicial.

4 Resultados e discussão

Para o estudo de caso "Roleta" foram comparados os materiais Resina UV Igus i3000 e POM-H. Verificou-se que a Resina UV Igus i3000 apresenta uma densidade de $\rho = 1,30 \text{ g/cm}^3$, enquanto o POM-H possui uma densidade ligeiramente superior, de $\rho = 1,43 \text{ g/cm}^3$ (Figura 4.1). Esta diferença indica que, para um mesmo volume, um componente fabricado em POM-H será aproximadamente 10% mais pesado do que um componente idêntico fabricado com a Resina UV Igus i3000.



Figura 4.1 – Gráfico comparativo da densidade entre a Resina UV Igus i3000 e o POM-H

A Resina UV Igus i3000 possui um Módulo de Young de $E=1.750 \text{ MPa}$, enquanto o POM-H exibe um Módulo de Young consideravelmente maior $E=3.400 \text{ MPa}$ (Figura 4.2). Esta diferença indica que o POM-H é aproximadamente duas vezes mais rígido que a Resina UV Igus.

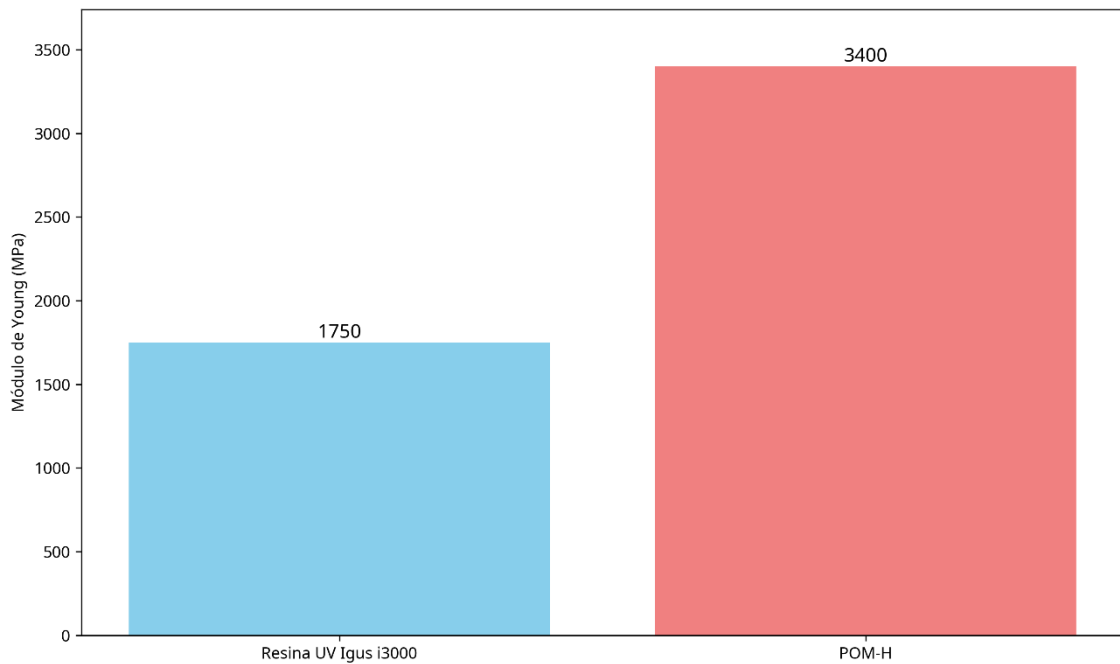


Figura 4.2 – Gráfico comparativo do Módulo de Young entre a Resina UV Igus i3000 e o POM-H.

Para a Resina UV Igus i3000, o Módulo de Flexão é $W = 3.010$ MPa. O POM-H, por sua vez, apresenta um Módulo de Flexão de $W = 3.450$ MPa (Figura 4.3). Estes valores apontam o POM-H como o material mais rígido sob flexão. O POM-H é aproximadamente 14,6% mais rígido em flexão do que a Resina UV Igus i3000. Um rolete feito de POM-H tenderá a fletir menos sob a mesma carga em comparação com um rolete de Resina Igus i3000.

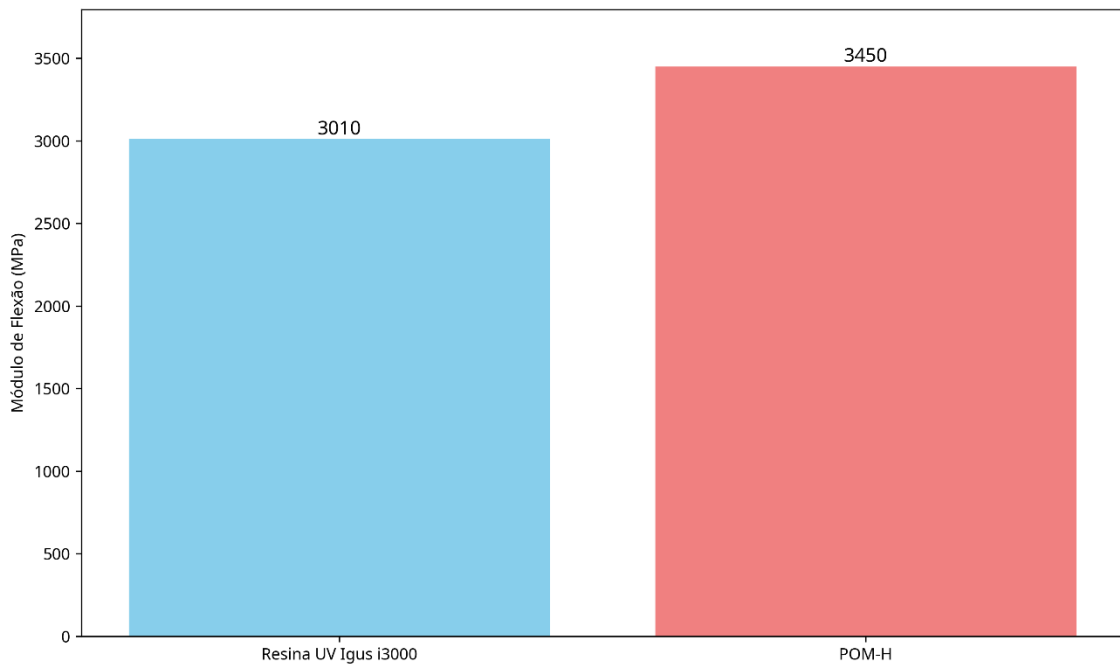


Figura 4.3 – Gráfico comparativo do Módulo de Flexão entre a Resina UV Igus i3000 e o POM-H.

No caso da Resina UV Igus i3000, a resistência à flexão é $\sigma_{lim_{flexão}} = 90$ MPa. O POM-H, por sua vez, apresenta uma resistência à flexão superior, $\sigma_{lim_{flexão}} = 106$ MPa (Figura 4.4). Isso significa que o POM-H pode suportar aproximadamente 17,8% mais tensão de flexão antes de falhar em comparação com a Resina UV Igus i3000.

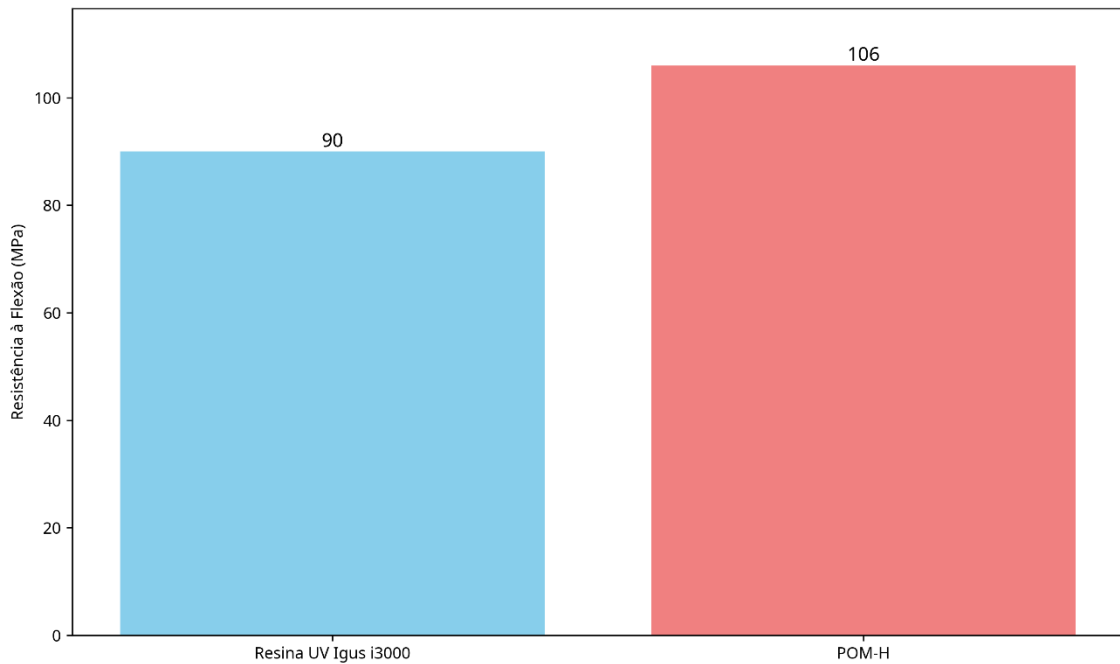


Figura 4.4 – Gráfico comparativo da Resistência à Flexão entre a Resina UV Igus i3000 e o POM-H.

A Resina UV Igus i3000, ASTM D2240-15 [48], apresenta uma dureza D=78 Shore D. O POM-H apresenta uma dureza D=85 Shore D, indicando que é um material mais duro em comparação com a Resina Igus i3000 (Figura 4.5).

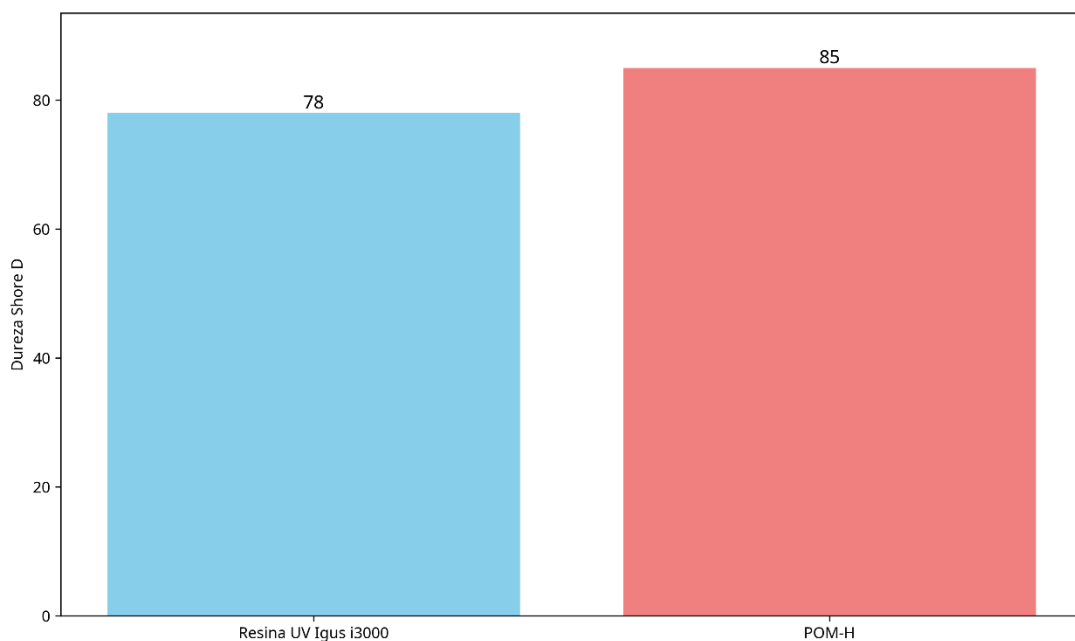


Figura 4.5 – Gráfico comparativo da Dureza Shore D entre a Resina UV Igus i3000 e o POM-H.

O coeficiente de fricção para a Resina UV Igus i3000 em aço inoxidável é $\mu = 0,22$. O POM-H por sua vez possui coeficiente de fricção $\mu = 0,25$ (Figura 4.6). Estes valores

sugerem que a Resina Igus i3000 se comporta melhor face ao atrito com o aço inoxidável presente na estrutura do transportador.

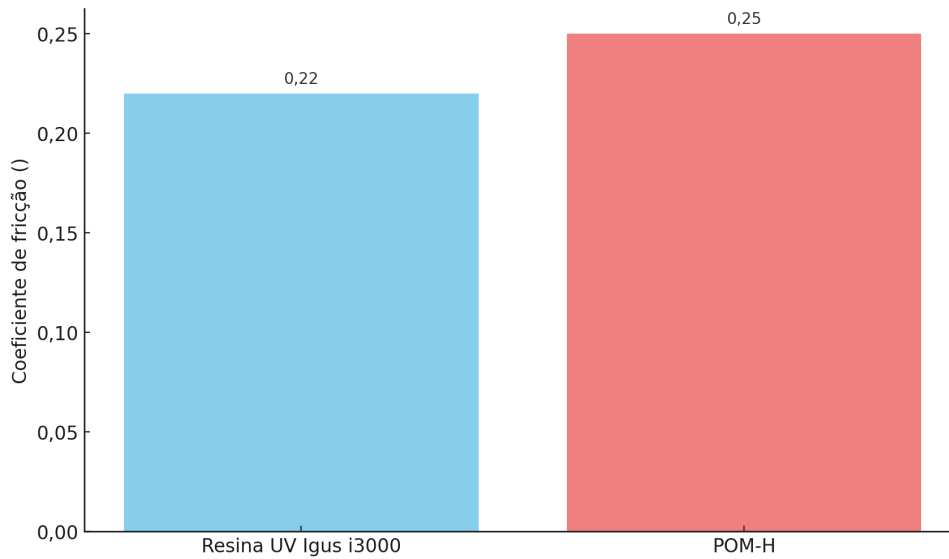


Figura 4.6 – Gráfico comparativo do coeficiente de fricção entre a Resina UV Igus i3000 e o POM-H.

4.1 Carga a flexão do rolete

Os resultados obtidos para ambos os materiais referentes máximo de carga que suportam à flexão estão na Tabela 4.1. Ao considerar o fator de segurança $f_s = 4$ [49], para uma maior margem, o resultado é disposto na Tabela 4.2 e poderá ser visto na Figura 4.7.

Tabela 4.1 – Resultados da Carga Máxima à Flexão por rolete P em kgf sem o fator de segurança.

Variável	Resultado POM	Resultado Resina UV
q (N/mm)	187,03	158,80
P (N)	5.915,88	5.022,91
P (kgf)	603,05	512,02

Tabela 4.2 – Resultados da Carga Máxima à Flexão por rolete P em kgf com o fator de segurança 4.

Variável	Resultado POM	Resultado Resina UV
q (N/mm)	46,76	39,70
P (N)	1.478,97	1.255,73
P (kgf)	150,76	128,00

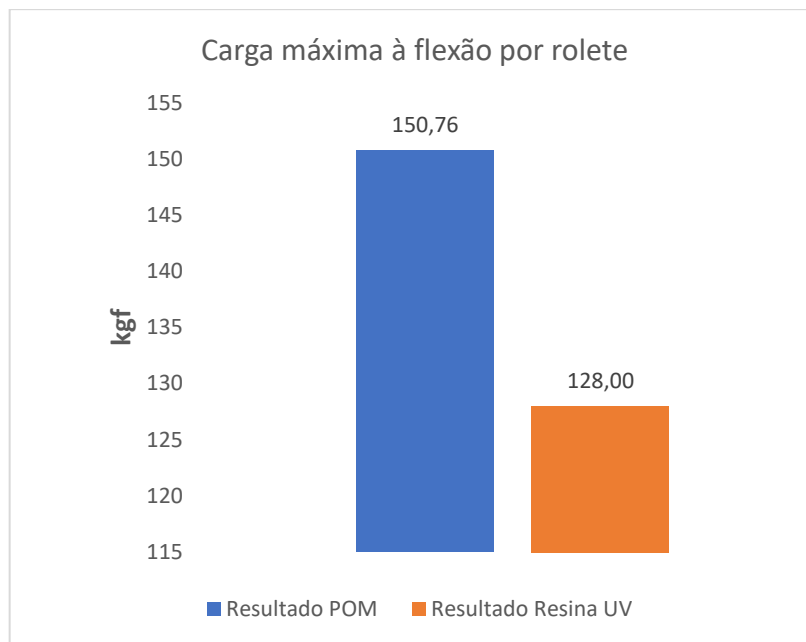


Figura 4.7 – Carga máxima à flexão calculada para o POM-H e para a Resina UV (fator de segurança 4).

Considerando que as resmas de papel pesam 2,5 kg (gramagem de $80 \frac{g}{m^2}$, 500 folhas), ambos os materiais cumprem com grande folga os requisitos necessários para suportar a carga citada sem falhar.

4.2 Tempo de vida útil média estimada do rolete em POM-H

Como resultado dos cálculos relativos à vida útil média de cada rolete em POM-H, ao longo do período de 2018 até abril de 2025, obteve-se um valor médio de 91,31 dias entre falhas (Tabela 4.3). Este é o tempo estimado durante o qual se espera que um rolete convencional utilizado na fábrica permaneça em operação antes de falhar por gripagem/agarramento, com base no histórico de campo. Esse problema manifestava-se através do bloqueio ou da dificuldade de rotação do rolete sobre o varão de aço inoxidável interno e sobre os casquilhos, resultando em paragens não planeadas frequentes da linha de produção para realização de intervenções.

Tabela 4.3 – Resultados dos cálculos referentes ao tempo de vida útil média estimada do rolete em POM-H.

Nome	Valor
Tempo de operação (horas)	70.128
MTTF (horas/falha)	2.191,50
MTTF (dias/falha)	91,31

Assim, com o objetivo de mitigar os custos de substituição do rolete convencional em POM-H, espera-se que o mesmo componente em Resina UV Igus i3000 apresente uma vida útil igual ou superior, dado que o custo do material é inferior. Para a Resina UV,

devido à lacuna de dados como a curva S-N, será necessário continuar a realizar o acompanhamento de sua atividade, para que, com o histórico, seja realizada, da mesma forma que foi feito com o POM-H, uma estimativa do ciclo de vida.

4.3 Resultados da Implementação dos Roletes de Resina UV Fabricados por Fabrico Aditivo

Conforme justificado detalhadamente na Metodologia (Secção 3), o foco principal deste capítulo está na apresentação e discussão dos resultados obtidos através da implementação e observação dos roletes de Resina UV em condições de operação real na fábrica de papel da The Navigator Company - Setúbal. Assim, a análise que foi feita é predominantemente qualitativa e comparativa, baseada no desempenho funcional observado.

Os roletes em POM-H foram substituídos pelos de Resina UV e, durante o período de avaliação, a montagem dos roletes foi modificada substituindo os casquilhos em aço inoxidável por suportes também em resina. De imediato, a peça não demonstrou uma boa capacidade no que diz respeito ao problema de gripagem. Observou-se que os suportes (Figura 4.8) se aderiam, dificultando o movimento. Além disso, o rolete não girava com a devida facilidade em volta do suporte. Com isso, concluiu-se que o par cinemático Resina UV vs. Resina UV não funciona de forma eficiente.



Figura 4.8 – Rolete em Resina UV e suportes em Resina UV.

Após esta análise, foram adicionadas anilhas de Aço Inoxidável (ver seta na Figura 4.9a) nas extremidades dos roletes, além da remoção do suporte de resina, havendo a necessidade, portanto, do aumento de espessura do componente (ver Figura 4.9b e Figura 4.9c). Dessa forma, o rolete gira livremente sobre o varão também de Aço Inoxidável, diminuindo o atrito com a superfície do mesmo e com as paredes da cassete (visto que seu coeficiente de fricção para com este material é baixo). Esta melhoria funcional foi o resultado mais imediato e positivo da substituição, alinhando-se com as

expectativas geradas pelas propriedades de baixo atrito e autolubrificação da Resina UV.

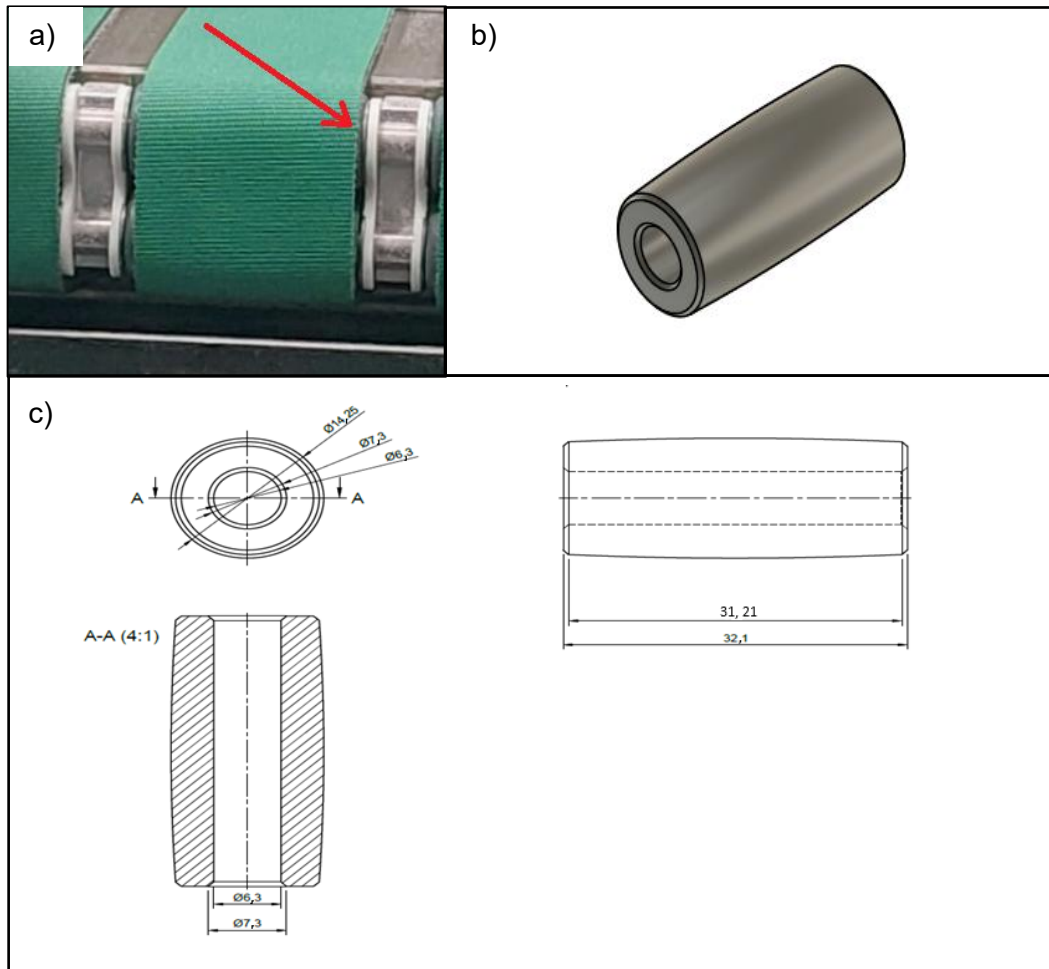


Figura 4.9 – Modificação do rolete: (a) Anilha metálica nas extremidades; (b) Novo rolete com aumento de espessura; (c) Desenho do rolete alterado.

Até à data de conclusão deste relatório, os roletes de Resina UV operaram por aproximadamente 6 semanas sem necessidade de substituição por falha catastrófica. Diferente do POM-H, não foi possível estimar uma vida útil para a Resina UV baseada no histórico de substituições do SAP, devido a ser um material novo em fábrica. O feedback recolhido junto dos operadores da máquina foi predominantemente positivo. Relatou-se que não houve nenhum caso de gripagem nem bloqueio do movimento do rolete face ao varão.

4.4 Finger Plate

O PPA-CF possui uma densidade $\rho = 1,25 \text{ g/cm}^3$, significativamente menor que a do aço inoxidável, que é $\rho = 7,95 \text{ g/cm}^3$ (Figura 4.10). Isso indica que o PPA-CF é um material cerca de 84% mais leve.

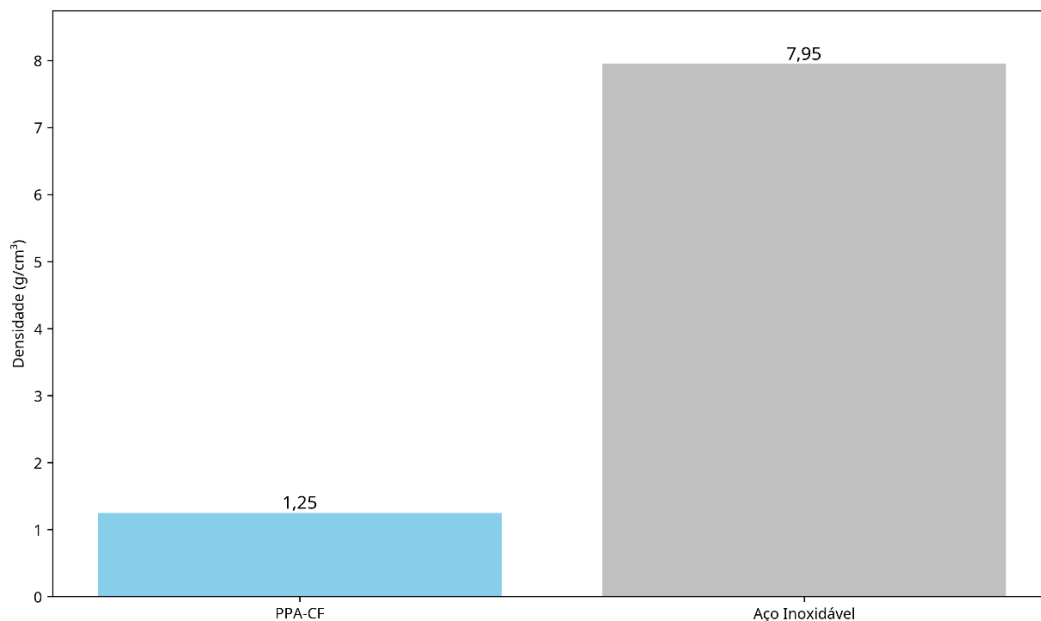


Figura 4.10 – Resultado da comparação da densidade entre o PPA-CF e do aço inoxidável.

O aço inoxidável é mais rígido que o PPA-CF, seu Módulo de Young é $E=195.000$ MPa, aproximadamente 16,5 vezes maior que o do PPA-CF na sua direção mais rígida (X-Y), $E=11.800$ MPa e cerca de 45 vezes maior que na direção Z do PPA-CF, $E= 4.300$ MPa (Figura 4.11). A menor rigidez do PPA-CF significa que, sob a mesma carga, ele se deformará mais que o aço inoxidável.

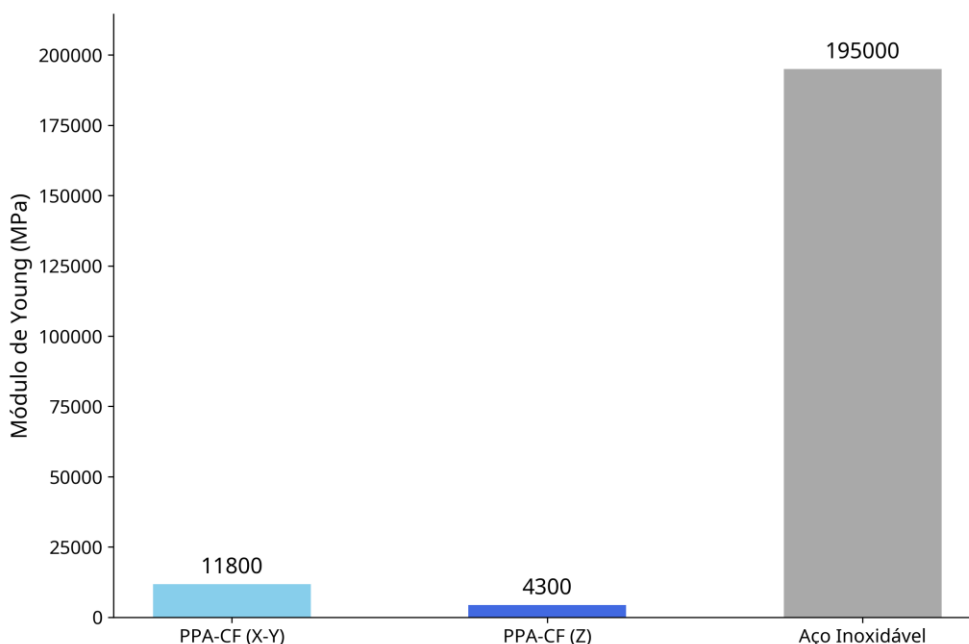


Figura 4.11 – Resultado da comparação do Módulo de Young entre o PPA-CF e do aço inoxidável.

O aço inoxidável possui uma resistência à tração $\sigma_{lim_{tração}} = 505$ MPa que é significativamente maior que o PPA-CF, que possui $\sigma_{lim_{tração}} = 168$ MPa na direção X-Y e $\sigma_{lim_{tração}} = 57$ MPa na direção Z (Figura 4.12). A resistência do aço inoxidável, desta forma, é cerca de 3 vezes maior que a do PPA-CF na direção X-Y e 8,9 vezes maior na direção Z.

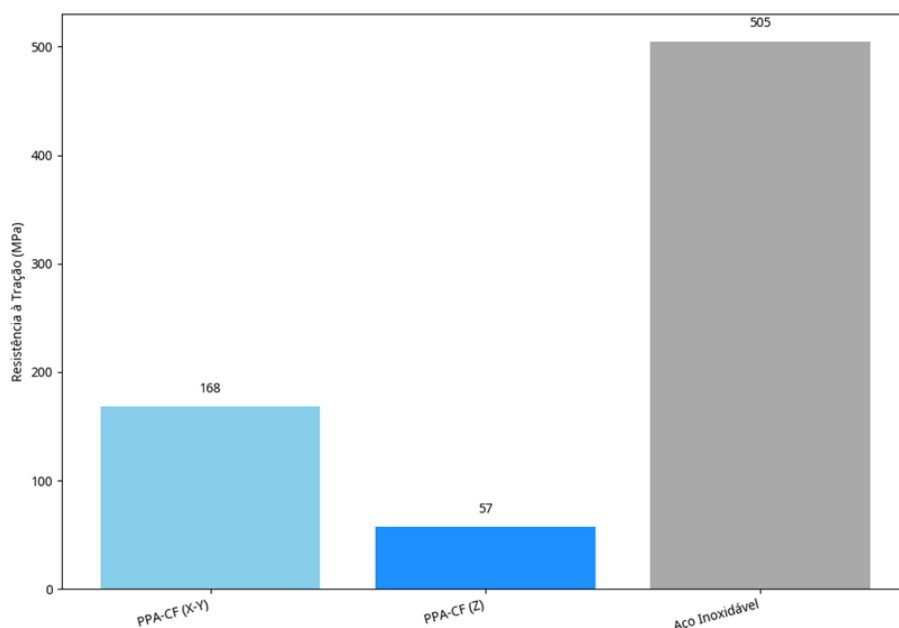


Figura 4.12 – Resultado da comparação da Resistência à Tração entre o PPA-CF e do aço inoxidável.

A resistência à flexão do aço inoxidável é $\sigma_{lim\ flexão} = 257,50$ MPa, que é aproximadamente 1,23 vezes maior que a do PPA-CF na direção X-Y e cerca de 4 vezes maior que na direção Z, que é $\sigma_{lim\ flexão} = 63$ MPa, conforme Figura 4.13.

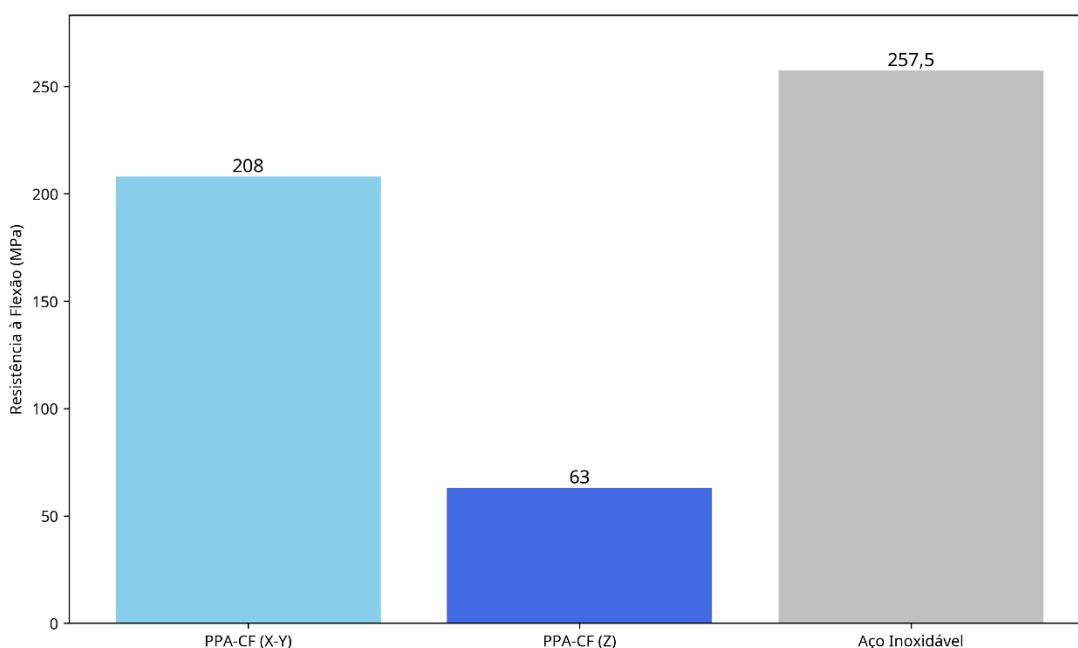


Figura 4.13 – Resistência à flexão do PPA-CF vs aço inoxidável.

4.5 Tempo de vida útil média estimada do Finger Plate em PPA-CF

Como resultado dos cálculos relativos ao tempo de vida do Finger Plate, obtêm-se a Tabela 4.4, na qual se verifica que a vida útil média do componente em aço inoxidável, ao longo de 13 anos, foi de 148,38 dias. Este é o tempo médio de operação do Finger

entre substituições motivadas por fissuras ou empenos (problemas recorrentes) baseando-se no histórico de campo.

Tabela 4.4 – Resultados dos cálculos referentes ao tempo de vida útil média estimada do Finger Plate em aço inoxidável.

Nome	Valor
Tempo de operação (horas)	113.958
MTTF (horas/falha)	3.561,19
MTTF (dias/falha)	148,38

Assim, com o objetivo de mitigar os custos de substituição do Finger Plate convencional em aço inoxidável, espera-se que o mesmo componente em PPA-CF apresente uma vida útil igual ou superior, dado que o custo do material é menor. Para este material, será necessário continuar a monitorizar sua performance, de modo que, com o histórico deste novo componente em campo, seja possível realizar uma estimativa do seu ciclo de vida através do SAP 770 PM e, por fim, estabelecer uma manutenção preventiva sistemática como proposto na Secção 3.1.

4.6 Resultados da Implementação do Finger Plate em PPA-CF Fabricados por fabrico aditivo

Assim como para o Rolete em Resina UV, o Finger Plate em PPA-CF foi instalado e os operadores, no âmbito da filosofia TPM, *Total Productive Maintenance*, observam e se detetarem qualquer anomalia ao longo do tempo de operação, contactam a gestão da manutenção e o responsável do projeto. O primeiro conjunto fabricado não foi testado, visto possuir muita rugosidade à superfície (Figura 4.14) para a aplicação (deverá ser lisa para não marcar as caixas). Desta forma, o Finger Plate foi enviado novamente para a empresa parceira de forma a ser lixado. Após o acabamento, a peça ficou mais lisa e foi instalada para primeiro teste (Figura 4.15a). Foi necessário calibrar o atuador (ver seta da Figura 4.15b) com auxílio de um esquadro (Figura 4.15c) uma vez que a peça se encontrava desalinhada (Figura 4.15d). Caso a peça fosse mantida sem o devido alinhamento, a caixa de resmas iria raspar por baixo, causando danos no produto, podendo, até mesmo, chocar com a estrutura, danificando-a conforme indicação na Figura 4.16. Este dano ocorria com muita frequência quando a peça era produzida no material original (aço inoxidável).



Figura 4.14 – Finger Plate com rugosidade notória antes do acabamento final (lixamento).

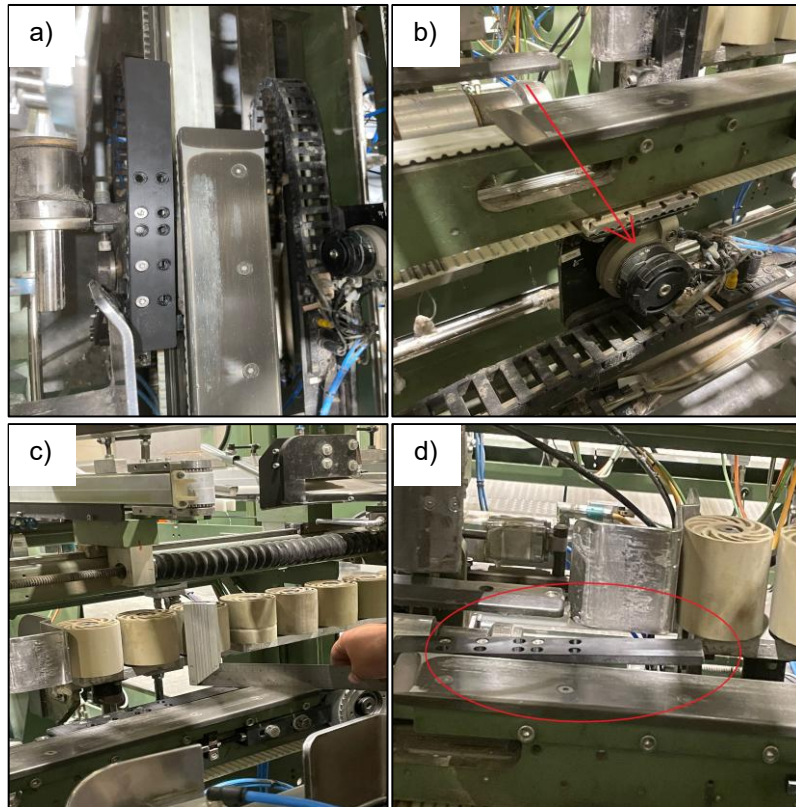


Figura 4.15 – Finger Plate pós-acabamento: (a) instalado na estrutura; (b) atuador rotativo pneumático em calibração; (c) esquadro para auxiliar o alinhamento; (d) Finger Plate desalinhado.

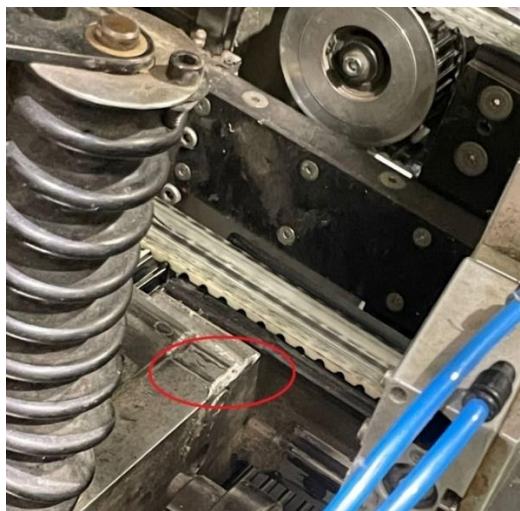


Figura 4.16 – Marcas dos impactos frequentes da peça convencional em aço com a estrutura.

Até à data de conclusão deste relatório, o Finger Plate em PPA-CF opera por aproximadamente 5 semanas sem necessidade de substituição por falha catastrófica. Os operadores, observam o componente diariamente e relatam seu funcionamento aos

técnicos e responsáveis do projeto. Diferente do aço inoxidável (peça convencional), não foi possível estimar uma vida útil para o PPA-CF baseada no histórico de substituições do SAP, devido a ser um material novo em fábrica.

5 Conclusões e trabalho futuro

Os três casos de estudo abordados nesta dissertação são de peças mecânicas inseridas em sistemas complexos completamente distintos. Como tal serão apresentados as conclusões e os trabalhos futuros separadas por casos “Rolete”, Finger Plate” e “Rotor”. Como conclusão geral o objetivo desta dissertação foi atingido com sucesso. O desenvolvimento de metodologias de gestão inovadoras em contexto de Manutenção 4.0 de sistemas complexos, recorrendo ao Fabrico Aditivo na produção de peças sobresselentes aplicadas à indústria da celulose e do papel, demonstrou que o Projeto Mecânico, nomeadamente Estudos de Comportamento Mecânico, Estudos de Casos de Falha e Dano, Estudos de Modos de rotura, Estudos Económicos, Recursos Humanos e Logística têm que ser incluídos nas tomadas de decisão em Gestão de Manutenção, e as ferramentas da Industria 4.0 são fundamentais na resolução de problemas. Conclui-se também que a criação de um gabinete de estudo de peças sobresselentes produzidas por FA na The Navigator Company - Setúbal, para a manutenção industrial, sob responsabilidade da Chefia da Engenharia de Manutenção, poderá atenuar os impactos decorrentes do encerramento de empresas parceiras.

Em relação ao caso de estudo "Rolete", apesar das significativas diferenças em rigidez, resistência mecânica e dureza deste componente, onde o POM-H geralmente apresenta valores superiores à Resina UV Igus i3000 utilizada para o fabrico aditivo do rolete, os resultados obtidos através da comparação das propriedades referidas demonstraram que a Resina UV Igus i3000 possui um coeficiente de fricção em relação ao aço inoxidável, utilizado na estrutura de base do transportador, menor que o do POM-H. A adoção deste material pode levar a uma maior vida útil do componente, redução dos custos inerentes à sua manutenção e aumento da eficiência operacional do sistema.

Conclui-se também que, do ponto de vista teórico, este estudo de caso reforça a importância da seleção de materiais, nomeadamente por fabrico aditivo, com propriedades mecânicas e tribológicas adequadas para aplicações sujeitas a atrito.

Concluiu-se ainda, da análise económica, que o custo inicial do material foi o principal benefício e a redução de custos associados ao fabrico aditivo relativo ao convencional foi de 55%.

Concluiu-se, do caso "Finger Plate", que o aço inoxidável utilizado para o fabrico da peça convencional, possui resistência mecânica e rigidez superiores ao do mesmo componente fabricado através do FA em PPA-CF. Através da análise comparativa das propriedades, observou-se que a densidade do PPA-CF era superior à do Aço Inoxidável, assegurando maior leveza para o componente.

Concluiu-se, ainda, em relação à fissuração da peça "Finger Plate" de aço (convencional) que as forças de impacto durante o serviço provocaram a fissuração. Além disso, o desenho convencional do fabricante da peça, possui dois rasgos para parafusos sextavados de embeber, o que ocasionou, com as vibrações e impactos, dano na rosca dos parafusos e nos rasgos desse componente. Concluiu-se desta forma que há necessidade de alteração do desenho técnico original, nomeadamente no sistema de fixação para impedir esse deslocamento e mitigar a ocorrência de fissuras ou empenos, o que deverá ser acompanhado vivamente pelos operadores e responsáveis do projeto.

O benefício económico foi alcançado, visto que a peça em PPA-CF é 88,27% mais barata que a em aço inoxidável.

5.1 Impacto Científico

Foi submetido e aceite para publicação um capítulo no livro da Springer - Lecture Notes in Mechanical Engineering series, intitulado "Sustainability study of parts obtained by additive manufacturing applied to maintenance in the paper industry". Foi, ainda, submetido um resumo na conferência Jornadas do Mar 2025, que decorrerá entre 26 a 28 de novembro, na Escola Naval, Marinha Portuguesa.

5.2 Trabalho Futuro

Os estudos, testes e a observação em campo da aplicação de casos piloto forneceram informações úteis e importantes para a tomada de decisão inicial na fábrica de papel e celulose, especialmente considerando os fatores custo, tempo de entrega e possibilidade de melhoria no desenho. No entanto recomenda-se, para trabalhos futuros ou como parte de um processo de validação técnica mais eficaz, que sejam direcionados esforços para estudos complementares e verificações dos materiais de FA dos casos "Rolete", "Finger Plate" e "Rotor".

Propõe-se, por fim, a criação de um gabinete de estudo de peças sobresselentes produzidas por FA, que poderá reforçar a autonomia da manutenção interna da The Navigator Company - Setúbal face a eventuais quebras na cadeia de abastecimento. Este gabinete, sob a alçada da Chefia da Engenharia de Manutenção poderá promover a investigação de materiais, escolha de técnicas de impressão 3D e critérios de aplicação, contribuindo assim para a melhor operação da unidade fabril.

5.2.1 Rolete

Este estudo de caso demonstrou o potencial da Resina UV Igus i3000 como um substituto promissor para o POM-H, em conjunto com a alteração do desenho do componente, em aplicações onde a falha por atrito é um problema crítico. Aquando da entrega desta dissertação, a diminuição do atrito está a ser acompanhada para verificar se se irá traduzir numa diminuição da ocorrência de falhas nos roletes durante o período de avaliação. Desta forma, para o rolete feito em Resina UV Igus i3000, é sugerido como trabalho futuro:

1. Caracterizar Mecanicamente a Resina UV Pós-Impressão: Realizar ensaios mecânicos de fadiga em provetes fabricados com o material através de DLP, a fim de obter as propriedades relevantes, incluindo a curva S-N.
2. Analisar as Cargas Operacionais: Se possível, encontrar método e instrumentos para medir as tensões nas correias e outras forças significativas que atuam sobre os roletes.
3. Realizar Método dos Elementos Finitos: Com os dados de material e de carga, realizar simulações para determinar os campos de tensão e deformação nos roletes de Resina UV. Isto permitiria avaliar a sua adequação estrutural de forma teórica para maior otimização e segurança.
4. Modelar o Desgaste e Prever a Vida Útil: Utilizar os dados de desgaste específicos obtidos através dos ensaios anteriores, do histórico do SAP PM 770 e dos modelos apropriados para estimar a vida útil do componente de Resina UV de forma a calcular sua vida útil teórica e comparar com seu histórico. Por fim, realizar uma comparação também com o POM-H.
5. Propor o plano de manutenção preventiva sistemática baseada no tempo de vida útil do rolete em Resina UV, de forma que o mesmo seja adquirido antes de sua vida útil acabar.
6. Controlar e estipular parâmetros de qualidade da peça sobresselente fabricada

Estas ações mais aprofundadas não só fornecerão um suporte teórico mais eficaz na decisão de substituição, como também permitirá a otimização do design do rolete para maximizar o desempenho e a vida útil. Além disso, tendo todas essas características

acessíveis, a utilização da Resina UV i3000 poderá ser estudada em outras aplicações dentro da fábrica, otimizando custos e outras variáveis.

5.2.2 Finger Plate

O material PPA-CF foi escolhido devido às suas propriedades mecânicas elevadas face a outros compósitos e ao seu baixo custo comparado com o valor atual da peça em aço inoxidável fornecida pelo fornecedor convencional.

A análise das propriedades mecânicas feita de forma comparativa entre os dois materiais não evidencia uma melhoria na resistência do PPA-CF face às devidas ocorrências de fissuração e empenamento. Por isso, após realizada a alteração no desenho, é importante:

- Considerar aumentar o número de parafusos para um número ótimo, uma vez que tal ação poderá melhorar a frequência natural inicial do componente e a sua rigidez dinâmica, mitigando os efeitos das vibrações na peça [52].
- Verificar a possibilidade de um padrão circular de aparafusamento em vez do retangular convencional, já que estudos demonstram que padrões circulares apresentaram melhorias na resistência da junta e na capacidade de dissipação de energia para placas de extremidade estendida [52].
- Tal como na Resina UV, caracterizar mecanicamente o PPA-CF pós-impressão, realizando ensaios mecânicos de fadiga em provetes fabricados com o material através do FDM, a fim de obter as propriedades relevantes, incluindo a curva S-N.
- Caso se verifique a necessidade, alterar o desenho de forma a fabricar peças do tipo esquerda e direita, onde os furos e parafusos estejam apenas de um dos lados do componente, aumentando a quantidade de material e, conseqüentemente, a sua rigidez.

1. Controlar e estipular parâmetros de qualidade da peça sobresselente fabricada

5.2.3 Rotor

Devido a durabilidade estabelecida para esta dissertação, o desenvolvimento deste estudo de caso ainda numa fase muito inicial e, portanto, não foi possível estabelecer material e método de fabrico para o componente. Assim, para trabalhos futuros espera-se o desenvolvimento dos seguintes itens:

- Estudo do material e método de I3D para fabrico do rotor;
- Comparação das propriedades do material original com o material sugerido no item 1;
- Simulação por elementos finitos, em softwares como Ansys, do comportamento mecânico do componente ou peça;

- Fabrico da peça;
- Teste em campo.

Referências bibliográficas

- [1] Direção-Geral das Atividades Económicas. "Setores Industriais." Acesso em 2 de janeiro de 2025. <https://www.dgae.gov.pt/servicos/politica-empresarial/setores-industriais.aspx>.
- [2] ALVES, João; MORGADO, Teresa; PEREIRA, A. Mário - Sustainability of Selective Laser Melting Process. **5th International Conference on Quality Innovation and Sustainability** (2024): 51. <https://doi.org/10.34629/29CW-HZ58>.
- [3] PEREIRA, Mário; FILHO, Simões; ABREU, Luís; ALVES, João; MORGADO, Teresa - Optimization of Plasma Direct Energy Deposition - Additive Manufacturing of Metals Process Using Design of Experiments Methodology. **5th International Conference on Quality Innovation and Sustainability** (2024): 26. <https://doi.org/10.34629/29CW-HZ58>.
- [4] ODS Portugal. "Objetivos de Desenvolvimento Sustentável." Acesso em 2 de janeiro de 2025. <https://ods.pt/>.
- [5] MALLIORIS, Panagiotis; AIVAZIDOU, Eirini; BECHTSIS, Dimitrios - Predictive Maintenance in Industry 4.0: A Systematic Multi-Sector Mapping. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology** 50: 80–103. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.02.003>.
- [6] ALI, Mujahid; BASHIR, Salah; HABIB, Tufail - Utilizing Industry 4.0-Related Technologies and Modern Techniques for Manufacturing Customized Products – Smart Yogurt Filling System - **Journal of Engineering Research** 12, no. 3 (2024): 468-475. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100144>.
- [7] MA, Shuaiyin; DING, Wei; LIU, Yang; ZHANG, Yingfeng; REN, Shan; KONG, Xianguang; LENG, Jiewu - Industry 4.0 and Cleaner Production: A Comprehensive Review of Sustainable and Intelligent Manufacturing for Energy-Intensive Manufacturing Industries. **Journal of Cleaner Production** 467 (2024): 142879. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142879>.
- [8] ZERRAD, Raoua; DIAZ, Kamar; MECHKOURI, Meriem Hayani; SEFIANI, Naoufal - Optimal coordination of Production, Logistics, and Maintenance 4.0: A framework for Multi-Site Stamping Plants. **Procedia Computer Science** 253 (2025): 2899-2908. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.014>
- [9] HELO, Petri; THAI; Vinh V.- Logistics 4.0 - digital transformation with smart connected tracking and tracing devices. **International Journal of Production Economics** 275 (2024): 109336. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109336>
- [10] HIEN, Nguyen Ngoc; LASA, Ganix; IRIARTE, Ion; UNAMUNO, Gorka - An Overview of Industry 4.0 Applications for Advanced Maintenance Services. **Procedia Computer Science** 200 (2022): 803-810. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.277>.
- [11] DOLCI, Virginia; BIGLIARDI, Barbara; PETRONI, Alberto; PINI, Bendetta; FILIPPELLI, Serena; TAGLIENTE, Leonardo - Integrating Industry 4.0 and Circular Economy: A Conceptual Framework for Sustainable Manufacturing - **Procedia Computer Science** 232 (2024): 1711-1720. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.169>.
- [12] ZHANG, Jiwen; WANG, Yulong; YANG, Ye; MA, Yihong; DAI, Ze - Fault Diagnosis and Intelligent Maintenance of Industry 4.0 Power System Based on Internet of Things Technology and Thermal Energy Optimization. **Thermal Science and Engineering Progress** 55 (2024): 102902. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102902>.
- [13] Google Cloud. "O que é Big Data?" Acesso em 17 de setembro de 2024. <https://cloud.google.com/learn/what-is-big-data?hl=pt-BR>.
- [14] MAYER-SCHÖNBERGER, Viktor; CULKIER, Kenneth - Big Data: A Revolução que Vai Transformar como Vivemos, Trabalhamos e Pensamos. Traduzido por Jeffrey Shell. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. ISBN-10: 9781848547926.

- [15] TOOKI, Oluwaseun O.; POPOOLA, Olawale M. - A Critical Review on Intelligent-Based Techniques for Detection and Mitigation of Cyberthreats and Cascaded Failures in Cyber-Physical Power Systems. **Renewable Energy Focus** 51 (2024): 100628. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100628>.
- [16] RANI, Sita; KATARIA, Aman; KUMAR, Sachin; KARAR, Vinod - A New Generation Cyber-Physical System: A Comprehensive Review from Security Perspective. **Computers & Security** 148 (2025): 104095. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104095>.
- [17] MA, Quoc-Phu; NGUYEN, Hoang-Sy; HAJNYS, Jiri; MESICEK, Jakub; PAGAC, Marek; PETRU, Jana - A Bibliometric Review on Application of Machine Learning in Additive Manufacturing and Practical Justification. **Applied Materials Today** 40 (2024): 102371. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102371>.
- [18] CERUTI, Alessandro; MARZOCCA, Pier; LIVERANI, Alfredo; BIL, Cees - Maintenance in Aeronautics in an Industry 4.0 Context: The Role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering** 6 (4) (2019): 516–26. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>.
- [19] BUTT, Javid - Exploring the Interrelationship between Additive Manufacturing and Industry 4.0. **Designs** 4, no. 2 (2020): 13. <https://doi.org/10.3390/designs4020013>.
- [20] DEVITO, Fabrizia; COPANI, Giacomo; NATALICCHIO, Angelo; ALAMI, Abdul Hai; LAVECCHIA, Fulvio; OLABI, Abdul-Ghani; DASSISTI, Michele - Business Models and Advanced Additive Manufacturing Strategies for Better Sustainability. **Energy Nexus** 16 (2024) (1): 100337. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100337>.
- [21] SAHAL, Radhya; BRESLIN, John G.; ALI, Muhammad Intizar - Big Data and Stream Processing Platforms for Industry 4.0 Requirements Mapping for a Predictive Maintenance Use Case. **Journal of Manufacturing Systems** 54 (2020): 138–51. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.11.004>.
- [22] NP EN 13306:2007 – Terminologia da Manutenção. Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2007.
- [23] SARKIS, Joseph - A Boundaries and Flows Perspective of Industrial Sustainability. **Supply Chain Management: An International Journal** 17 (4): 444-452. (2012) <http://dx.doi.org/10.1108/13598541211212924>.
- [24] DESPEISSE, M.; BALL, P. D.; EVANS, S.; LEVERS, A. - Industrial Ecology at Factory Level – A Conceptual Model. **Journal of Cleaner Production** 31 (2012): 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.027>.
- [25] JAMWAL, Anbesh; AGRAWAL, Rajeev; SHARMA, Monica; GIALLANZA, Antonio - Industry 4.0 Technologies for Manufacturing Sustainability: A Systematic Review and Future Research Directions. **Applied Sciences** 11 (12) (2021): 5725. <https://doi.org/10.3390/app11125725>.
- [26] ZHONG, Ray Y.; XU, Xun; KLOTZ, Eberhard; NEWMAN, Stephen T. - Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. **Engineering** 3 (5) (2019): 616–30. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>.
- [27] FRANCIOSI, Chiara; IUNG, Benoit; MIRANDA, Salvatore; RIEMMA, Stefano - Maintenance for Sustainability in the Industry 4.0 Context: A Scoping Literature Review. **IFAC - Papers Online** 51 (11) (2018): 903–908. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.459>.
- [28] JASIULEWICZ - KACZMAREK, Małgorzata; GOLA, Arkadiusz - Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing - an Overview. **IFAC - Papers Online** 52 (10) (2019): 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.005>.
- [29] GFMAM. 2021. Maintenance Framework - 2nd Edition Final.
- [30] Infraspak. "MRO e Estoque: O Que É e Como Gerir?" Blog Infraspak. Disponível em: <https://blog.infraspak.com/pt-br/mro-estoque/>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- [31] IBM. "What is maintenance, repair and operations (MRO)?" Disponível em: <https://www.ibm.com/think/topics/maintenance-repair-and-operations>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- [32] Maintainx. "What Is MRO? Introduction to Maintenance Repairs and Operations". Maintainx. Disponível em: <https://www.getmaintainx.com/learning-center/what-is-mro>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- [33] SAP. "What is CMMS software?". SAP. Disponível em: <https://www.sap.com/portugal/products/scm/asset-management-eam/what-is-cmms.html>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- [34] Infraspak. "Guia completo do CMMS para 2025". Blog Infraspak. Disponível em: <https://blog.infraspak.com/pt-pt/cmms/>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- [35] WITS; Wessel W.; GARCÍA, J. Roberto Reyes; BECKER, Juan M. Jauregui - How Additive Manufacturing Enables more Sustainable End-user Maintenance, Repair and Overhaul

- (MRO) Strategies. **Procedia CIRP** 40 (2016): 693-698. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.156>
- [36] SLAMA, M. Ben; CHATTI, S.; CHAABEME, A.; GHOZIA, K.; TOUATI, H. Zamba - Design for additive manufacturing of plastic injection tool inserts with maintenance and economic considerations: An automotive study case. **Journal of Manufacturing Processes** 102 (2023): 765-779. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.070>
- [37] OYESOLA, Moses O.; MPOFU, Khumbulani; MATHE, Ntombi R.; DANİYAN, Ilesanmi A. - Hybrid-additive manufacturing cost model: A sustainable Through-Life Engineering support for Maintenance Repair Overhaul in the Aerospace. **Procedia Manufacturing** 49 (2020): 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.07.019>
- [38] LASTRA, R.; PEREIRA, A.; DÍAZ-CACHO, M.; ACEVEDO, J.; COLLAZO, A. - Spare Parts Made by Additive Manufacturing to Improve Preventive Maintenance. **Applied Sciences** 12 (2022):10564. <https://doi.org/10.3390/app122010564>.
- [39] HE, Feiyang; ALSHAMMARI, Yousef Lafi A.; KHAN, Muhammad – The effect of printing parameters on crack growth rate of FDM ABS cantilever beam under thermo-mechanical loads. **Procedia Structural Integrity** 34 (2021): 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>.
- [40] ANTIĆ, J.; MIŠKOVIĆA, Ž.; MITROVIĆA, R.; STAMENIĆA, Z.; ANTELJ, J. - The Risk assessment of 3D printing FDM technology. **Procedia Structural Integrity** 48 (2023): 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.132>
- [41] 3DFILA. "Conheça as 4 Etapas da Impressão 3D FDM ou FFF". Disponível em: <https://blog.3dfila.com.br/conheca-as-4-etapas-da-impressao-3d-fdm-ou-fff/>. Acesso: 29 abr. 2025.
- [42] ZHANG, Jiumeng; HU, Qipeng; WANG, Shuai; TAO, Jie; GOU, Maling - Digital Light Processing Based Three-dimensional Printing for Medical Applications. **Int J Bioprint** 6 (1) (2019): 242. <https://doi.org/10.18063/ijb.v6i1.242>.
- [43] RAISE3D. "What is Digital Light Processing (DLP) 3D Printing: Benefits, Applications, Materials and Costs". Disponível em: <https://www.raise3d.com/blog/what-is-dlp-3d-printing/>. Acesso: 29 abr. 2025.
- [44] SILVA, Rute; REBELO, Rafael C.; PAULA, Carlos T.B.; PEREIRA, Patrícia; FONSECA, Ana C.; SERRA, Arménio C.; COELHO, Jorge F.J. - All-cellulose resin for 3D printing hydrogels via digital light processing (DLP). **International Journal of Biological Macromolecules** 306 (2025) 141389. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141389>.
- [45] HIBBELER, R. C. - Resistência dos Materiais. 7ª ed. São Paulo: Pearson, 2010. ISBN: 9788576053736.
- [46] IGUS. "Iglidur i3000, 3D printing resing". Disponível em <https://www.igus.pt/product/I3000-PR-1000>. Acesso: 23 mai. 2025.
- [47] MCAM. "POM - Polyoxymethylene". Disponível em <https://www.mcam.com/en/products/pom> MCAM. Acesso: 23 mai. 2025.
- [48] ASTM. "Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness". Disponível em: <https://store.astm.org/d2240-15r21.html>. Acesso: 12 jun 2025.
- [49] MASCARENHAS, W.N.; AHRENS, C-H.; OGLIARI, A. - Design criteria and safety factors for plastic components design. **Materials & Design** 25 (2004): 257-261. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.10.003>.
- [50] BAMBULAB. "PPA-CF". Disponível em: https://eu.store.bambulab.com/products/ppa-cf?srsltid=AfmBOoo9u7m056t7MgMtl28CTgGz2NZmkhrNXD_2nHUNUxpeWIVguvnt. Acesso em: 23 mai. 2025.
- [51] Thor3DScanner. "How does structured light 3d scanning work in Calibry scanners?". Disponível em: <https://thor3dscanner.com/en/news/how-does-structured-light-3d-scanning-work-in-calibry-scanners/>. Acesso: 23 mai. 2025.
- [52] CROCCOLO, Dario; AGOSTINIS, Massimiliano De; FINI, Stefano; KHAN; Muhammad Yasir; MELE, Mattoa; OLMİ, Giorgio - Optimization of Bolted Joints: A Literature Review. **Metals** 13 (10) (2023). <https://doi.org/10.3390/met13101708>.