



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

SHANDY ALEXANDRA MORASSI FRANCISCO

**MODELAGEM E INVESTIGAÇÃO DE LAYOUT FABRIL
PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS MODULARES DE
VEDAÇÃO VERTICAL EM BIOCOMPÓSITO DE
EDIFICAÇÃO INDUSTRIALIZADA**

SHANDY ALEXANDRA MORASSI FRANCISCO

**MODELAGEM E INVESTIGAÇÃO DE LAYOUT FABRIL
PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS MODULARES DE
VEDAÇÃO VERTICAL EM BIOCOMPÓSITO DE
EDIFICAÇÃO INDUSTRIALIZADA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina - PPGEC, como parte dos pré-requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Altibano Ortenzi

Londrina
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

F819m Francisco, Shandy Alexandra Morassi.

Modelagem e investigação de layout fabril para a produção de painéis modulares de vedação vertical em biocompósito de edificação industrializada / Shandy Alexandra Morassi Francisco. - Londrina, 2025.
232 f. : il.

Orientador: Altibano Ortenzi.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Inclui bibliografia.

1. Fábrica Virtual - Tese. 2. Simulação Fabril - Tese. 3. Construção Sustentável - Tese. 4. Materiais Biocompósitos - Tese. I. Ortenzi, Altibano. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

SHANDY ALEXANDRA MORASSI FRANCISCO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, como parte dos pré-requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Membro ext.: Prof. Dr. Gilberto Clóvis Antonelli
Universidade Estadual de Maringá - UEM

Membro ext.: Prof. Dr. Marcelo A. Ferreira
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Membro ext.: Prof. Dr. José Ângelo Ferreira
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Londrina

Membro: Prof^a. Dr^a. Wanessa Roberta Fazinga
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Orientador: Prof. Dr. Altibano Ortenzi
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 17 de outubro de 2025.

AGRADECIMENTOS

A Deus todo Poderoso que me trouxe até aqui, por toda força e entendimento que veio dEle, não de mim.

Acredito que Deus coloca anjos em nosso caminho no decorrer de nossas vidas e muitos estiveram comigo nesse trajeto.

Ao professor Dr. Altibano Ortenzi, meu orientador e “pai científico”, que me direcionou na pesquisa e me mostrou quando foi necessário pedir ajuda.

Ao GETin, em especial Luiza Souza e Sofia Chang, que me auxiliaram na pesquisa de forma que nem sei como agradecer.

Ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Estadual de Maringá, nas figuras das professoras Juliana Barbosa e Gabriela Lopes que não mediram esforços para auxiliarem no entendimento técnico da ferramenta computacional e ao professor Gilberto Antonelli, que além do auxílio técnico forneceu a ferramenta para o trabalho e apoio.

Além do professor Gilberto Antonelli, aos demais professores da banca, Marcelo Ferreira, José Ângelo Ferreira e Wanessa Roberta Fazinga por todas as contribuições para a pesquisa.

Aos professores do Programa por todo o conhecimento transmitido nessa jornada.

Ao meu amado marido, parceiro de todas as horas, que por vezes se privou de tanto para me deixar disponível para o estudo.

Aos meus filhos, que muitas vezes sem compreender a dimensão, me apoiaram com afeto sempre que precisei e com auxílio nas tarefas do dia a dia.

Aos familiares que auxiliaram com os cuidados das crianças e da minha casa, em especial meus queridos sogra Lucy, sogro Sérgio, mãe Marlene, pai João e cunhada Maria Angela.

Aos colegas do trabalho que colaboraram me cobrindo e auxiliando nas atividades para que pudesse me dedicar mais à tese.

A cada pessoa que contribuiu de alguma forma para o encerramento dessa etapa da minha vida, pois foram muitas, aqui fica minha imensa gratidão.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há
tempo para todo propósito debaixo do céu”
(Eclesiastes 3:1)

RESUMO

Os processos tradicionais da construção civil dependem de materiais convencionais e energeticamente intensivos, como cimento, aço e cerâmica. Considerando que esses materiais provêm de fontes não renováveis, cada vez mais é despertada a consciência de sua finitude e a necessidade de se buscar alternativas sustentáveis que sejam reutilizáveis, recicláveis ou renováveis, contribuindo para a redução das emissões de CO₂ e do consumo energético. O objetivo desta pesquisa foi investigar os benefícios da virtualização do processo de fabricação de painéis modulares de vedação vertical (PMVV) em biocompósitos, aplicados em edificações industrializadas modulares (EIM), por meio da integração de conceitos de Desenvolvimento Integrado de Produto (IPD), Gestão do Ciclo de Vida do Produto (PLM) e princípios de Projeto para a eXcelência (DfX). A abordagem metodológica envolveu a revisão sistemática da literatura para identificar lacunas de pesquisa e validar o ineditismo do estudo, a modelagem do processo produtivo em uma Fábrica Virtual (VF) e o desenvolvimento de um algoritmo baseado em Redes Neurais (RN) para identificar os painéis mais complexos e estimar tempos não obtidos de outra forma. Os resultados evidenciaram que a virtualização é capaz de antecipar ajustes no *layout* fabril e identificar processos críticos, especialmente na etapa de montagem, que se manteve como a de maior impacto na capacidade produtiva, mesmo nos cenários otimizados. As etapas de fechamento, inspeção e embalagem apresentaram menor variação, configurando-se como restrições constantes no processo. A análise comparativa dos painéis demonstrou que o PRE apresentou tempos de ciclo menores devido à sua menor complexidade, enquanto PP e PJG mantiveram padrões de desempenho semelhantes; contudo, todos os painéis são indispensáveis à montagem da unidade habitacional, sendo necessário equilíbrio entre suas capacidades produtivas. A análise detalhada dos processos de fabricação desses painéis permite identificar pontos críticos e propor melhorias, como a utilização de RN para otimizar a sequência de produção. A pesquisa reforça que a utilização de compósitos de matriz biopolimérica, aliados à virtualização fabril e à inteligência artificial, pode promover ganhos em eficiência, redução de desperdícios e aumento da sustentabilidade do processo construtivo. Cientificamente, o trabalho contribui ao demonstrar que a integração de simulação digital e IA constitui uma abordagem inédita na construção civil, com potencial de aprofundar o campo de investigação em planejamento e gestão de sistemas construtivos industrializados. No campo aplicado, fornece subsídios para empresas adotarem estratégias mais seguras e econômicas antes da implementação física de construções industrializadas com impacto positivo em custos, prazos e qualidade.

Palavras-chave: Fábrica Virtual. Simulação Fabril. Construção Sustentável. Materiais Biocompósitos. Eficiência Energética.

ABSTRACT

Traditional construction processes rely on conventional and energy-intensive materials such as cement, steel, and ceramics. As these materials originate from non-renewable sources, there is growing awareness of their finite nature and the need to seek sustainable alternatives that are reusable, recyclable, or renewable, contributing to the reduction of CO₂ emissions and energy consumption. The objective of this research was to investigate the benefits of virtualizing the manufacturing process of vertical modular sealing panels (VMSPs) made from biocomposites, applied in modular industrialized buildings (MIBs), through the integration of concepts from Integrated Product Development (IPD), Product Lifecycle Management (PLM), and Design for eXcellence (DfX) principles. The methodological approach involved a systematic literature review to identify research gaps and validate the novelty of the study, modeling the production process within a Virtual Factory (VF), and developing a Neural Network (NN)-based algorithm to identify the most complex panels and estimate production times that could not be obtained otherwise. The results showed that virtualization enables early adjustments to the factory layout and identification of critical processes, especially in the assembly stage, which remained the most impactful on production capacity—even in optimized scenarios. The closing, inspection, and packaging stages exhibited lower variation, establishing themselves as consistent constraints within the process. Comparative analysis of the panels revealed that the PRE panel had shorter cycle times due to its lower complexity, while PP and PJG panels maintained similar performance patterns. However, all panels are essential to the assembly of the housing unit, requiring a balanced approach to their production capacities. Detailed analysis of the manufacturing processes of these panels allowed for the identification of critical points and the proposal of improvements, such as the use of neural networks to optimize the production sequence. This research reinforces that the use of biopolymeric matrix composites, combined with factory virtualization and artificial intelligence, can lead to gains in efficiency, waste reduction, and increased sustainability in the construction process. Scientifically, the study contributes by demonstrating that the integration of digital simulation and AI represents a novel approach in civil construction, with the potential to deepen the field of research in planning and management of industrialized construction systems. In applied terms, it provides support for companies to adopt safer and more cost-effective strategies prior to the physical implementation of industrialized buildings, with positive impacts on cost, schedule, and quality.

Keywords: Virtual Factory. Factory Simulation. Sustainable Construction. Biocomposite Materials. Energy Efficiency.

ARTIGO PUBLICADO

DUARTE JUNIOR, P. C.; FRANCISCO, S. A. M.; ORTENZI, A. Application of virtual manufacturing to predict scenarios and reduce physical and non-physical losses in construction. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 132, n. 11, p. 5473–5485, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13702-9>.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo de trabalho IPD da FlexBuild	25
Figura 2 – Método de Revisão Sistemática da Literatura empregado	28
Figura 3 – Planta <i>Layout</i> – Área: 76,62 m ²	33
Figura 4 – FlexBuild®	33
Figura 5 – Placa de fundação	34
Figura 6 – Par de painéis com conectores	34
Figura 7 – Módulo da cobertura	35
Figura 8 – Conector de instalações hidrossanitárias	35
Figura 9 – Painel com caixas e tomada de instalações elétricas	36
Figura 10 – Janela projetante em alumínio e vidro para fixação na estrutura do painel	37
Figura 11 – Nomenclatura dos componentes individuais e códigos usados para o produto FlexBuild®	37
Figura 12 – Estrutura do ciclo de vida do produto	54
Figura 13 – Componentes da Indústria 4.0	60
Figura 14 – Exemplo esquemático de <i>Layout</i> por Produto	70
Figura 15 – Exemplo esquemático de <i>Layout</i> Funcional	71
Figura 16 – Exemplo esquemático de <i>Layout</i> Posicional	71
Figura 17 – Exemplo esquemático de <i>Layout</i> Celular	72
Figura 18 – Exemplo esquemático de <i>Layout</i> Híbrido com quatro tipos de <i>Layout</i> ...	73
Figura 19 – Simbologia utilizada na técnica proposta IDEF-SIM	80
Figura 20 – Classificação das fibras	83
Figura 21 – Alguns estilos de tramas de tecidos	85
Figura 22 – Esquema de tecidos não tramados	85
Figura 23 – Plantação de juta	87
Figura 24 – Polímeros utilizados na produção de compósitos	88
Figura 25 – Tipos de compósitos	90
Figura 26 – Métodos e processos de fabricação de compósitos de juta com ou sem outras fibras.	94
Figura 27 – Processo de moldagem por compressão	95
Figura 28 – Fluxograma do método	98

Figura 29 – Painel com metade da largura (500 mm) (MPC) e detalhe do enchimento de PU	100
Figura 30 – Painel básico com largura modular (1000 mm) (PC) aberto mostrando nervuras estruturais, fechado e detalhe do enchimento de PU	101
Figura 31 – Painel para fixação de esquadrias de janelas grandes (PJG)	102
Figura 32 – Painel para fixação de portas (PP)	102
Figura 33 – Robôs autônomos para movimentação e manuseio.....	103
Figura 34 – AGVs sobre trilhos.....	104
Figura 35 – Robô autônomo para aplicação de desmoldante e <i>gelcoat</i> LEBOT I A6	105
Figura 36 – Máquina automatizada de corte a laser de compósitos.....	107
Figura 37 – Equipamento de moldagem por compressão do tipo SMC	108
Figura 38 – Molde de alumínio para equipamento SMC	109
Figura 39 – Dosador modular de alta pressão para injeção de PU	111
Figura 40 – Fluxograma da subdivisão da etapa 6 do método	114
Figura 41 – Fluxograma do processo de produção dos PMVV em CBRFJ	119
Figura 42 – Cálculo de complexidade de painéis da primeira versão da RN	130
Figura 43 – Estimativas de tempos retornadas pela RN	132
Figura 44 – Gráfico de complexidade dos painéis emitido pela RN, considerando o tempo total de produção	135
Figura 45 – Mapa da RN com duas camadas ocultas	136
Figura 46 – Modelo conceitual do processo de produção dos PMVV da EIM	138
Figura 47 – Cenário C1 de <i>layout</i> proposto	140
Figura 48 – Elementos dos modelos (continua)	142
Figura 49 – Cenário C2 de <i>layout</i> proposto	145
Figura 50 – Cenário C3 de <i>layout</i> proposto	146
Figura 51 – Distância de Viagem – Cenários X Painéis	154
Figura 52 – Estações de trabalho da etapa E2 Corte e ajuste Material – C1 e C2..	155
Figura 53 – Estações de trabalho da etapa E2 Corte e ajuste Material – C3	155
Figura 54 – Tempo de Ciclo do AGV – Cenários X Painéis	157
Figura 55 – Tempo de Ciclo do Painel – Cenários X Painéis	159
Figura 56 – Tempo de Ciclo das Etapas – C1 – PP	161
Figura 57 – Tempo de Ciclo das Etapas – C1 – PJG	161

Figura 58 – Tempo de Ciclo das Etapas – C1 – PRE.....	161
Figura 59 – Tempo de Ciclo das Etapas – C2 – PP	162
Figura 60 – Tempo de Ciclo das Etapas – C2 – PJG	162
Figura 61 – Tempo de Ciclo das Etapas – C2 – PRE.....	162
Figura 62 – Tempo de Ciclo das Etapas – C3 – PP	163
Figura 63 – Tempo de Ciclo das Etapas – C3 – PJG	163
Figura 64 – Tempo de Ciclo das Etapas – C3 – PRE.....	163
Figura 65 – Utilização das Etapas – C1 – PP	166
Figura 66 – Utilização das Etapas – C1 – PJG.....	168
Figura 67 – Utilização das Etapas – C1 – PRE	168
Figura 68 – Utilização das Etapas – C2 – PP.....	169
Figura 69 – Utilização das Etapas – C2 – PJG.....	169
Figura 70 – Utilização das Etapas – C2 – PRE	170
Figura 71 – Utilização das Etapas – C3 – PP.....	170
Figura 72 – Utilização das Etapas – C3 – PJG.....	171
Figura 73 – Utilização das Etapas – C3 – PRE	171
Figura 74 – Utilização das Etapas – Cenários X Painéis.....	173
Figura 75 – Rendimento por Etapa – C1 – PP	174
Figura 76 – Rendimento por Etapa – C1 – PJG	174
Figura 77 – Rendimento por Etapa – C1 – PRE.....	174
Figura 78 – Rendimento por Etapa – C2 – PP	175
Figura 79 – Rendimento por Etapa – C2 – PJG	175
Figura 80 – Rendimento por Etapa – C2 – PRE.....	175
Figura 81 – Rendimento por Etapa – C3 – PP	176
Figura 82 – Rendimento por Etapa – C3 – PJG	176
Figura 83 – Rendimento por Etapa – C3 – PRE.....	176
Figura 84 – Trabalho Em Progresso Composto – Cenários X Painéis	178
Figura 85 – Produto por Hora – C1 – PP.....	179
Figura 86 – Produto por Hora – C1 – PJG	179
Figura 87 – Produto por Hora – C1 – PRE	179
Figura 88 – Produto por Hora – C2 – PP.....	180
Figura 89 – Produto por Hora – C2 – PJG	180
Figura 90 – Produto por Hora – C2 – PRE	180

Figura 91 – Produto por Hora – C3 – PP.....	181
Figura 92 – Produto por Hora – C3 – PJG	181
Figura 93 – Produto por Hora – C3 – PRE	181

LISTA DE VÍDEOS

Vídeo 1 – Cenário 1 proposto para a fabricação dos PMVV. Disponível em:

<https://youtu.be/Vj4r3o8TpdE>

Vídeo 2 – Cenário 2 proposto para a fabricação dos PMVV. Disponível em:

<https://youtu.be/LI4vO7L06I>

Vídeo 3 – Cenário 3 proposto para a fabricação dos PMVV. Disponível em:

<https://youtu.be/Jd18nsKYUOI>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de documentos retornados da busca	30
Tabela 2 – Tempos estimados das etapas de fabricação dos PMVV da FlexBuild® (em segundos) (continua)	125
Tabela 3 – Tempos inseridos na RN e gerados (continua)	133
Tabela 4 – Tempos estimados dos três PMVV mais complexos agrupados (em segundos) (continua)	147
Tabela 5 – Tempos atualizados dos três PMVV mais complexos agrupados (em segundos) (continua)	149
Tabela 6 – Tempo de ciclo do Painei	160
Tabela 7 – Tempo de ciclo das Etapas (continua)	164
Tabela 8 – Utilização das Etapas – C1 – PP	167

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i> (Acrilonitrila butadieno estireno)
ACATECH	<i>German Academy of Science and Engineering</i> (Academia Alemã de Ciência e Engenharia)
AGV	Automated Guided Vehicle (Veículo Autônomo)
ATH	<i>Aluminum trihydride</i> (Trihidreto de alumínio)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
BIM	Building Information Modelling (Modelagem da Informação da Construção)
CAPES	Conselho de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia Auxiliada por Computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura Auxiliada por Computador)
CBRFJ	Compósito de matriz Biopolimérica Reforçada por Fibras de Juta (lignocelulósica)
CE	<i>Concurrent Engineering</i> (Engenharia Concorrente ou Simultânea)
Cn	Características gerais de produção, com n indo de 1 a 17
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNN	<i>Convolutional Neural Networks</i> (Rede Neural Convolucional)
CO ₂	Gás carbônico
CPRF	Compósito de matriz Polimérica Reforçada por Fibras
CPRFJ	Compósito de matriz Polimérica Reforçada por Fibras de Juta (lignocelulósica)
CPS	<i>Cyber Phisic Systems</i> (Sistemas Cyber-Físicos)

CSTI	<i>Council for Science Technology and Innovation</i> (Conselho de Ciência, Tecnologia e Inovação)
DC	Departamento de Computação
DES	<i>Discrete Event Simulation</i> (Simulação de Eventos Discretos)
DfA	<i>Design for Assembly</i> (Projeto direcionado à Montagem),
DfD	<i>Design for Disassembly</i> (Projeto direcionado à Desmontagem),
DfM	<i>Design for Manufacturing</i> (Projeto direcionado à Fabricação),
DfRu	<i>Design for Reuse – DfRu</i> (Projeto Direcionado à Reutilização)
DfX	<i>Design for Excellence –</i> Projeto direcionado à Excelência
DP	Desenvolvimento do Produto
DT	<i>Digital Twins</i> (Gêmeos Digitais)
EI	Edificação Industrializada
EIM	Edificação Industrializada Modular
En	Etapas de produção (n indo de 1 a 5)
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> (Planejamento de Recursos Empresariais)
EUA	Estados Unidos da América
FLD	<i>Facility Layout Design</i> (Projeto de <i>Layout</i> de Instalações)
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> (Análise por Elementos Finitos)
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
Gb	<i>Giga Byte</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i> (Unidade de Processamento Gráfico)
GETin	Grupo de Estudos em Tecnologia e Inovação
GPa	<i>Giga Pascal</i>
HFS	<i>Hesitant Fuzzy Sets</i> (Conjuntos Difusos Hesitantes)
IA	Inteligência Artificial
IAG	Inteligência Artificial Generativa
IDEF-SIM	<i>Integrated Definition Methods – Simulation</i>

IC	Indústria da Construção
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IPD	<i>Integrated Product Development</i> (Desenvolvimento Integrado de Produto)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
LaPES	Laboratório de Pesquisas em Engenharia de Software
ListLab	Laboratório de materiais funcionais avançados sustentáveis
M&S	Modelagem e Simulação
MES	<i>Manufacturing Execution System</i> (Sistema de Execução de Fabricação)
MF	<i>Melamine–formaldehyde resin</i> (Resina de melamina-formaldeído)
MPC	Painel meio módulo cego
MPR	Painel meio módulo reforçado
PBAT	<i>Polybutylene adipate terephthalate</i> (Tereftalato de adipato de polibutileno)
PBT	<i>Polybutylene terephthalate</i> (Tereftalato de polibutileno)
PC	<i>Polycarbonate</i> (Policarbonato).
PC	Painel módulo cego. Observação: diferenciação pelo contexto
PCAST	<i>President’s Council of Advisors on Science and Technology</i> (Conselho Consultivo do Presidente para Ciência e Tecnologia)
PDM	<i>Product Data Management</i> (Gestão de Dados do Produto)
PE	<i>Polyethylene</i> (Polietileno)
PEI	<i>Polyetherimide</i> (Polieterimida)
PEEK	<i>Polyetheretherketone</i> (Polieter-eter-eter cetona)
PEK	<i>Polyetherketone</i> (Polieter-eter cetona)
PEL	Painel elétrico
PET	<i>Polyethylene terephthalate</i> (Tereftalato de polietileno)
PF	<i>Phenol–formaldehyde resin</i> (Resina de fenol-formaldeído)
PGC	<i>Polyglycerol citrate</i> (Citrato de poliglicerol)

PH	Painel hidráulico
PHA	<i>Polyhydroxyalkanoate</i> (Poli-hidroxiálcanoato)
PHB	<i>Polyhydroxybutyrate</i> (Poli-hidroxiбутирато)
PHBV	<i>Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)</i> (Biopol®) (Poli(3-hidroxiбутирато-co-3-hidroxiвалерато))
PHH	<i>Polyhydroxyhexanoate</i> (Poli-hidroxihexanoato)
PHO	<i>Polyhydroxyoctanoate</i> (Poli-hidroxiocetanoato)
PHV	<i>Polyhydroxyvalerate</i> (Poli-hidroxiвалерато)
PJA	Painel janela alta
PJG	Painel janela grande
PLA	<i>Polylactic acid</i> (Ácido polilático)
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i> (Gestão do Ciclo de Vida do Produto)
PMMA	<i>Polymethyl methacrylate</i> (Polimetil metacrilato)
PMVV	Painéis modulares de vedação vertical
POM	<i>Polyoxymethylene</i> (Polioximetileno)
PP	<i>Polypropylene</i> (Polipropileno)
PP	Painel porta. Observação: diferenciação pelo contexto
PPGEC	Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina
PPO	<i>Polyphenylene oxide</i> (Óxido de polifenileno)
PPS	<i>Polyphenylene sulphide</i> (Sulfeto de polifenileno)
PR	Painel módulo reforçado
PREL	Painel reforçado elétrico
PRH	Painel reforçado hidráulico
PS	<i>Polystyrene</i> (Poliestireno)
PSU	<i>Polysulphone</i> (Polissulfona)
PTFE	<i>Polytetrafluoroethylene</i> (Teflon) (Politetrafluoroetileno)

PU	Poliuretano
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> (Cloreto de polivinila)
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> (Desdobramento da Função de Qualidade)
QR-Code	<i>Quickly Response Code</i> (Código de Resposta Rápida)
RA	Realidade Aumentada
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de acesso aleatório)
RV	Realidade Virtual
RN	Redes Neurais
ROP	<i>Ring-opening polymerization</i> (Polimerização por abertura de anel)
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i> (Moldagem por Transferência de Resina)
RV	Realidade Virtual
SAN	<i>Styrene–acrylonitrile copolymer</i> (Copolímero de estireno-acrilonitrila)
SMC	<i>Sheet Molding Compound</i> (Compósito para Moldagem de Chapas)
SRIM	<i>Structural Reaction Injection Molding</i> (Moldagem por Injeção de Reação Estrutural)
StArt	<i>State of the Art through Systematic Review</i>
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
TPE	<i>Thermoplastic elastomer</i> (Elastômero termoplástico)
TPS	<i>Thermoplastic starch</i> (Amido termoplástico)
UF	<i>Urea–formaldehyde resin</i> (Resina de ureia-formaldeído)
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UEL	Universidade Estadual de Londrina
VF	<i>Virtual Factory</i> (Fábrica Virtual)
VSM	<i>Value Stream Mapping</i> (Mapeamento do Fluxo de Valor)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Justificativa	27
1.1.1	Lacuna do conhecimento	28
1.2	Objetivos	31
1.2.1	Objetivo geral	31
1.2.2	Objetivos específicos	31
1.3	Delimitação da Pesquisa	32
1.4	Caracterização do Objeto de Estudo: FlexBuild®	33
1.5	Estrutura da Tese	39
2	REVISÃO DA LITERATURA	40
2.1	Evolução da Indústria	40
2.2	Desenvolvimento de Produto	42
2.2.1	Projeto Direcionado à eXcelência	43
2.2.2	Desenvolvimento Integrado de Produto	48
2.2.3	Gestão do Ciclo de Vida do Produto	52
2.3	Indústria 4.0	59
2.3.1	Redes Neurais	62
2.4	Projeto de <i>Layout</i> de Instalações	66
2.5	Fábrica Virtual	73
2.5.1	Modelo Conceitual	78
2.6	Materiais Compósitos	81
2.6.1	Fibras	82
2.6.2	Matrizes Poliméricas	87
2.6.3	Compósitos derivados de fontes renováveis	90
2.6.4	Técnicas de Fabricação	93
3	MATERIAIS E MÉTODOS	98

3.1	Etapas do Método	98
3.1.1	Pesquisa bibliográfica	98
3.1.2	Levantamento dos recursos	99
3.1.3	Painéis de vedação vertical da FlexBuild®	99
3.1.4	Método da sequência de produção	102
3.1.5	Método da investigação de cenários aplicando ferramenta computacional de VF apoiada por IA.....	112
3.1.6	Cenários de fabricação e análise comparativa	114
3.1.7	Proposta do modelo de fabricação	117
3.1.8	Conclusões e redação final	117
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	118
4.1	Sequência de Produção	118
4.2	Investigação de Cenários Aplicando Ferramenta Computacional de VF Apoiada por IA	127
4.2.1	Algoritmo RN para PMVV da EIM.....	128
4.3	Virtualização, Simulação e Análise do Processo de Fabricação.....	137
4.3.1	Elaboração do Modelo Conceitual.....	137
4.3.2	Modelagem dos Cenários.....	139
4.3.3	Simulação dos Cenários	146
4.3.4	Análise comparativa dos Cenários	150
4.3.5	Propostas do modelo de fabricação pós análise dos cenários	183
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS.....	185
6	REFERÊNCIAS	191
	APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	203
	APÊNDICE B – DISCRIMINAÇÃO DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO POR TIPO DE PAINEL.....	217

1 INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos petrolíferos – com duração estimada de 60 anos no ritmo de consumo atual – e o esgotamento dos recursos não renováveis incentivaram um movimento de redução dos impactos ambientais. Isso gerou uma crescente consciência ecológica nas áreas de saúde, sustentabilidade e conservação ambiental (Torres *et al.*, 2023). Ainda, com a implementação da globalização econômica e a expansão das regiões econômicas, o consumo global de energia e recursos está crescendo rapidamente a uma taxa média anual de 2,2% (Chen *et al.*, 2024).

A Indústria da Construção (IC), como principal setor consumidor de energia, é responsável por 36% do consumo global total de energia. Em função do elevado custo energético para sua obtenção e beneficiamento, os materiais convencionais para construção, utilizados nos processos construtivos tradicionais, tendem ao desuso, como é o caso do cimento, do aço, da brita e dos materiais cerâmicos, seja para alvenaria ou acabamento (Chen *et al.*, 2024).

Além disso, todos eles são obtidos a partir de jazidas minerais, cuja extração também envolve, além da grande quantidade de energia, emissão de CO₂ e deterioração ambiental (Chen *et al.*, 2024). As atividades relacionadas à construção e manutenção são responsáveis por 39% do total de emissões de CO₂ associadas ao consumo de energia (Hentges *et al.*, 2021). Sendo assim, a busca por alternativas que tenham total ou parcialmente materiais e/ou componentes construtivos que possam ser reutilizados, reconvertidos ou reciclados, além de terem sua origem em fontes renováveis, têm potencial para contribuir com a redução na emissão de CO₂, redução de resíduos de construção e redução de consumo energético ao longo da cadeia produtiva de edificações (Chen *et al.*, 2024).

Na década de 1990, estudos nos EUA, na Escandinávia e na Inglaterra sugeriram que até 30% da construção é retrabalho, a mão de obra é utilizada com apenas 40-60% da eficiência potencial, os acidentes podem representar 3-6% dos custos totais do projeto e pelo menos 10% dos materiais são desperdiçados. Essas são provavelmente estimativas conservadoras quando comparadas à quantidade de resíduos identificada na fabricação por empresas de melhores práticas, como a Toyota. É possível melhorar a eficiência e a qualidade na IC simplesmente eliminando os resíduos da construção (Department of the Environment; Egan, 1998).

Pesquisas recentes ainda apontam a IC como grande geradora de resíduos, sendo em muitos países industrializados responsável por 30% a 40% do total de resíduos urbanos gerados. Em termos globais, os resíduos sólidos urbanos (RSU) ultrapassam 2 bilhões de toneladas por ano, com projeções de atingir 3,5 bilhões de toneladas até 2050 (Yatoo *et al.*, 2024).

No Brasil, a geração de resíduos de construção civil (RCC) é de aproximadamente 84 milhões de toneladas por ano, o que representa cerca de 60% dos resíduos sólidos urbanos. A maior parte desses resíduos é composta por concreto, argamassa, cerâmica e solo, e que a taxa de reciclagem ainda é baixa em muitas regiões. Ainda os materiais inicialmente passíveis de reutilização e reciclagem, como esquadrias e vidro plano, não são destinados adequadamente no Brasil, o que torna importante também a educação ambiental, legislação eficiente relativa a logística reversa e desenvolvimento de técnicas e processos que viabilizem a coleta e reprocessamento desses materiais (Conceição *et al.*, 2024).

Perdas e desperdícios de materiais também ocorrem durante a construção, devido à produção artesanal. Estima-se que as perdas sejam de quase 30%, desde o recebimento até o armazenamento e uso dos materiais (Conceição *et al.*, 2024).

Além das perdas físicas como geração de resíduos e perda de materiais, pesquisas mostram que 57% das atividades em um projeto de construção não agregam valor (desperdício), o que também contribui para o baixo desempenho do setor (Daniel *et al.*, 2019). As atividades de transporte em canteiros de obras são identificadas como fontes significativas de atividades que não agregam valor. Por exemplo, um estudo sobre transporte na construção civil constatou que mais de 40% desse tempo era gasto em atividades que não agregavam valor (Naz; Fredriksson; Ivert, 2022).

Sendo assim, no contexto atual da construção e com os materiais tradicionalmente usados, um dos pontos críticos para a redução de consumo energético acontece ao longo do processo construtivo, uma vez que esse ocorre quase na sua totalidade junto ao local onde a edificação será produzida. Assim, é de extrema importância pesquisar por alternativas que se tornem viáveis a curto e médio prazos, em que o processo de produção de edificações seja gradativamente transferido de um processo artesanal ou semiartesanal, para um sistema fabril,

de forma a reduzir o consumo energético e de materiais e a geração de resíduos, além de otimizar os processos, podendo tornar o produto mais sustentável. O uso de materiais de fontes renováveis tem potencial para, ao longo do tempo, minimizar o uso de materiais tradicionais, tornando as edificações mais sustentáveis, durante sua produção e em razão dos materiais aplicados.

Ao final da década de 1990, o relatório Repensando a Construção (Department of the Environment; Egan, 1998) já apontava como algumas das formas de melhoria na IC:

- Melhores condições de trabalho;
- Mais e melhor formação;
- Projeto direcionado à construção e uso;
- Padronização de componentes e processos;
- Tecnologia como ferramenta para o aprimoramento da cultura e de processos;
- Melhor regulamentação;
- Relacionamentos de longo prazo;
- Redução da dependência de licitações.

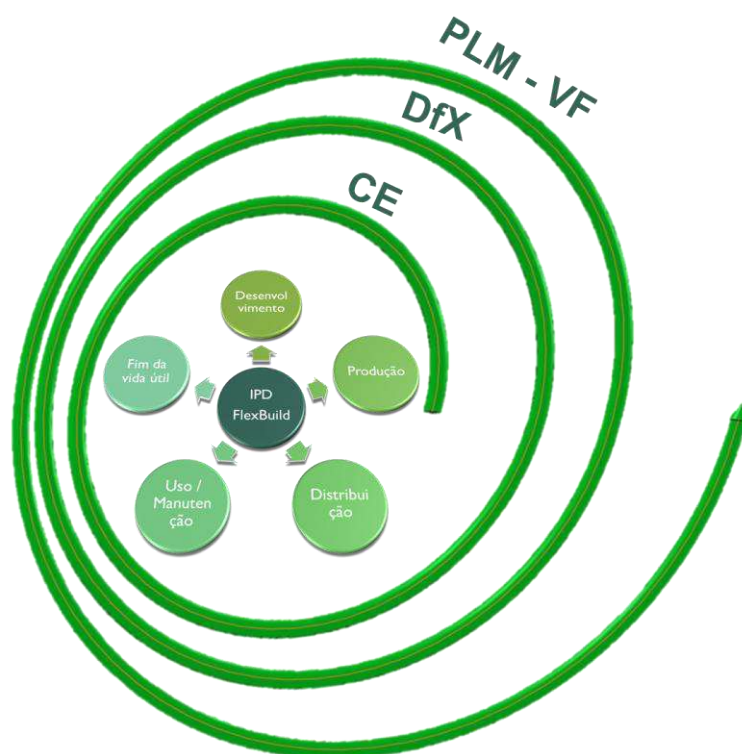
Para isso, várias questões importantes devem ser verificadas integradamente, dentro do princípio de Desenvolvimento Integrado de Produto (*Integrated Product Development – IPD*), dentre as quais podem ser citadas (Francisco; Ortenzi, 2023):

- a) Fabricação – planejamento e projeto fabril de acordo com os próximos itens;
- b) Equipamentos para fabricação – disponibilidade em função dos materiais usados;
- c) Materiais – alternativas, considerando a sustentabilidade, disponibilidade e durabilidade;
- d) Logística – análise de malha viária, riscos e meios de transporte e elevação, de acordo com o sistema produzido;
- e) Montagem – equipamentos e recursos humanos em função dos itens anteriores;
- f) Recursos humanos – treinamento operacional e disponibilidade.

Entre os itens mencionados, pesquisas anteriores verificaram total ou parcialmente em quais aspectos a industrialização facilitaria e reduziria os tempos de produção (Duarte Junior; Francisco; Ortenzi, 2024; Duarte; Nakao; Ortenzi, 2020), redução de recursos materiais e

energéticos para a produção de edificações industrializadas (Ambrosio, 2023; Cardim, 2022; Morassi; Silva; Ortenzi, 2018), desenvolvimento de equipamentos e subsistemas mais eficientes (Duarte; Nakao; Ortenzi, 2020; Lopes, 2019). Entretanto, ainda restam lacunas de pesquisa, das quais uma das principais está no projeto e planejamento fabril do sistema construtivo desenvolvido pelo grupo GETIn (Grupo de Estudos em Tecnologia e Inovação) na Universidade Estadual de Londrina (UEL), denominado FlexBuild® ou edificação flexível. Este projeto teve início no primeiro semestre de 2016 por meio da formação de equipes multidisciplinares para desenvolver de forma integrada a Edificação Industrializada Modular (EIM) a partir dos princípios de IPD e Gestão do Ciclo de Vida do Produto (*Product Lifecycle Management* – PLM).

Figura 1 – Fluxo de trabalho IPD da FlexBuild



Fonte: GETIn, 2024

Neste projeto, a partir dos grupos de atividades encontradas, foi possível estabelecer os grupos de trabalho com as aptidões para cada uma delas. Conforme os princípios de desenvolvimento avançaram ao longo do tempo em termos de: projeto, produção, custos, recursos, tecnologia embarcada, ciclo de vida e disposição final, as fases se desenvolveram sob a forma espiral. Portanto, esse formato evolutivo do projeto se constitui a PLM, cuja ferramenta

operacional é o Projeto Direcionado à eXcelência (*Design for eXcelence – DfX*). A Figura 1 ilustra esta composição e evolução.

Dessa forma, foca-se na redução do distanciamento entre projeto e fabricação e introduz-se o trabalho interfuncional na área técnica, realizado dentro do conceito de paralelismo temporal na execução das tarefas. Problemas de produção podem ser sanados pelo fato de o projeto do produto contemplar mais adequadamente as questões de produção desde o início do ciclo de desenvolvimento (Cunha, 2008). Ou seja, pontos críticos identificados na simulação da produção podem ser retornados e alimentar nova análise para melhoria do produto.

O sistema foi desenvolvido de tal forma que possibilite montagem, desmontagem, reconversão e reutilização, com enfoque, além do IPD, no Projeto Direcionado à Reutilização (*Design for Reuse – DfRu*), como ferramentas para integrar qualidade e desempenho, sem aumento significativo do custo de produção Francisco e Ortenzi (2023).

Pensando no produto em todo o seu ciclo de vida, desde a concepção até o fim de sua vida útil, seguem algumas definições relacionadas à sustentabilidade consideradas no seu desenvolvimento pelo grupo de pesquisa Francisco e Ortenzi (2023):

- Concepção: pensada para que o produto tenha desempenho estrutural, construtivo e energético conforme prescrito em norma (ABNT NBR 15775: 2024) e que os componentes possam ser reutilizados ou reconvertidos após a vida útil do sistema;
- Materiais: selecionados visando sustentabilidade ambiental, segundo critérios de norma (ISO 17088: 2021);
- Modularidade: permite a flexibilidade de montagem, reversibilidade e possibilidade de reutilização ou reconversão (ABNT NBR 15873:2024);
- Fabricação e montagem industrializadas e modulares (ABNT NBR 15873:2024): pensando em um processo eficiente, visando otimizar gastos com energia, geração mínima de resíduos e redução do desperdício de tempo e de material.

No contexto fabril, a indústria evoluiu a partir da Revolução Industrial, com a mecanização e surgimento da energia hidráulica e posteriormente a vapor, passando pelas transformações da Indústria 2.0 com o advento da energia elétrica e produção em massa, Indústria 3.0 com o

desenvolvimento da informática, da eletrônica e uso de robôs, até alcançar a Indústria 4.0 com suas tecnologias digitais, basicamente determinadas pela conectividade e inteligência (Stearns, 2021). Porém, tais evoluções e aplicações são observadas em setores da indústria como manufatura, engenharia elétrica e eletrônica e ciência da computação. No entanto, em comparação com tais setores, a construção civil é comumente conhecida como uma indústria de baixa tecnologia. Sendo assim, os estudos sobre a Indústria 4.0 ainda permanecem incipientes (Zabidin; Belayutham; Ibrahim, 2020), em especial no Brasil.

Considerando o exposto, esta pesquisa investiga opções de *layout* fabril para produção dos painéis modulares de vedação vertical (PMVV) da EIM FlexBuild® habitacional, adotando os conceitos englobados na Indústria 4.0, através da virtualização, visando otimizar seu processo produtivo em termos de fluxo, distância, tempo, uso de recursos e produtividade.

1.1 Justificativa

A IC é a menos evoluída entre os setores produtivos, com muitas perdas e baixa qualidade. Assim, ainda é necessário desenvolver sistemas, métodos e ferramentas que minimizem ou eliminem esses problemas. Além disso, o processo de produção deve ser gerenciado desde sua concepção (projeto), passando por todas as demais etapas do ciclo de vida: produção, logística, montagem, uso e disposição final do produto ou suas partes Francisco e Ortenzi (2023).

Na configuração atual de negócios e empresas da IC, os conceitos englobados pela Indústria 4.0, como a virtualização, não são aplicados (Zabidin; Belayutham; Ibrahim, 2020). Assim, essa falta foi identificada como lacuna de pesquisa a ser investigada, confirmada por meio da revisão sistemática da literatura apresentada a seguir.

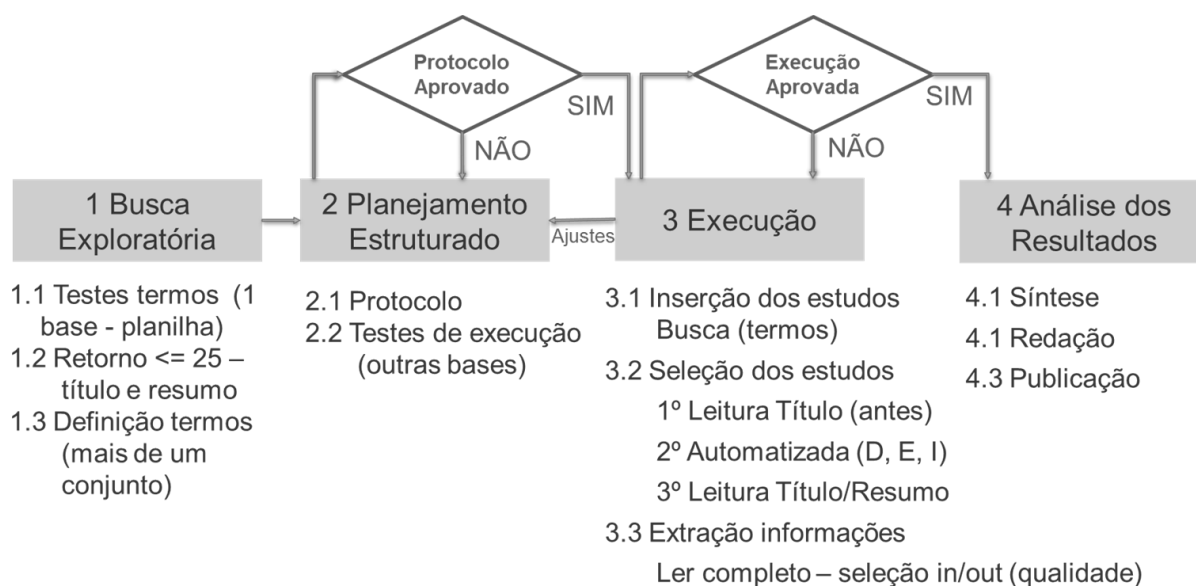
Por meio da literatura, foi identificado ainda o potencial de melhoria nos processos da IC a partir dos princípios da manufatura, em especial a Indústria 4.0 e a Fábrica Virtual, podendo reduzir custos, uso de recursos e geração de resíduos e incrementar a qualidade do produto final.

1.1.1 Lacuna do conhecimento

Como forma de identificar e validar a lacuna do conhecimento a partir da qual foi desenvolvida a pesquisa, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, apresentada com mais detalhes no Apêndice A, ao final deste documento. Para tanto, o método empregado foi adaptado do proposto pelo Laboratório de Pesquisas em Engenharia de Software (LaPES) (UFSCar, [s. d.]), do Departamento de Computação (DC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), com posterior aplicação da ferramenta StArt¹ (*State of the Art through Systematic Review*) para a ampliação e revisão da literatura para o desenvolvimento da tese, conforme apresentado na Figura 2.

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica exploratória em uma única base, a *Compendex*, identificada em buscas anteriores como relevante para o tema proposto.

Figura 2 – Método de Revisão Sistemática da Literatura empregado



Legenda: (D) Duplicado; (E) Critérios de exclusão; (I) Critérios de inclusão

Fonte: Autora

A busca foi realizada por Assunto, Título e Resumo (*Subject/Title/Abstract*), nos tipos de documento: Artigo de Conferência e de Revista; sem restrição de língua; publicados nos últimos 5 anos, devido ao caráter inovador do assunto, com resultados apresentados na Figura A2 do APÊNDICE A. Considerando o pequeno número de retornos para a identificação da lacuna para

¹ Disponível para download em: <<https://www.lapes.ufscar.br/resources/tools-1/start-1>>. Acesso em: 03.jul.2024.

a presente pesquisa, a avaliação prévia de títulos e resumos foi realizada ainda na base, não havendo necessidade do uso da ferramenta de gestão bibliográfica para a revisão sistemática da literatura para validação da lacuna de pesquisa.

Com os termos definidos, foram testadas também as bases *Scopus*, *Web of Science* e *Scielo*. A *Scielo* não retornou documentos relevantes. A *Scopus* e a *Web of Science* retornaram alguns dos documentos encontrados na *Compendex*, além de outros relevantes. Foram exploradas ainda as editoras *Sage Journals*, *Taylor & Francis*, *Wiley* e *Springer*, com máquinas de busca diferentes das bases. As editoras *Sage Journals*, *Taylor & Francis*, *Wiley* não apresentaram retornos para as *strings* definidas. A editora *Springer* apresentou alguns retornos relevantes. A Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e o Catálogo de Teses e Dissertações do Conselho de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES) foram considerados como forma de conhecer o que está sendo pesquisado sobre o assunto no país, porém, sem obter-se retorno para os termos pesquisados para a definição da lacuna.

Os retornos obtidos na busca pelas bases são apresentados na Figura A3 do Apêndice A. Ao final das buscas iniciais nas bases, os termos definidos para a identificação da lacuna de pesquisa formaram dois grupos:

- 1) Para a identificação da lacuna do conhecimento:

String 1: identificação da lacuna de pesquisa na área da construção civil

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)

- 2) Para a comprovação do ineditismo em construções industrializadas:

String 2: confirmação do ineditismo na área de construção industrializada em concreto armado

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (precast concrete)

String 3: confirmação do ineditismo na área de construção industrializada em *woodframe*

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)

String 4: confirmação do ineditismo na área de construção industrializada em *steelframe*

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)

Nesta configuração e considerando os critérios de inclusão e exclusão apresentados, foram

considerados os documentos apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Número de documentos retornados da busca

Base\ID Termo	1	2	3	4	Total
<i>Compendex</i>	3	0	0	0	3
<i>Scopus</i>	3	0	0	0	3
<i>Web of Science</i>	4	0	0	0	4
<i>Springer</i>	6	0	0	5	11
Total	16	0	0	5	21
Duplicados	4	0	0	0	4
Excluídos (critérios)	12	0	0	5	17
TOTAL FINAL	0	0	0	0	0

Fonte: Autora

Foram lidos os resumos de 12 artigos da *string* 1 e 5 (cinco) artigos da *string* 4 e excluídos, conforme apresentado na Tabela 1, devido ao não alinhamento ao tema pesquisado. Considerando as condições de contorno descritas e detalhadas no Apêndice A, nenhum dos documentos encontrados apresentam o assunto proposto pela pesquisadora, o emprego de ferramentas de simulação de Fábrica Virtual (VF) para investigação de *layout* fabril para a produção de PMVV em CBRFJ (Compósito de matriz Biopolimérica Reforçada por Fibras de Juta (lignocelulósica)) (bioepóxi) de EIM do tipo habitacional. Alguns estudos mostram a VF e foram usados na revisão da literatura, porém, não aplicada à construção civil. Sendo assim, é comprovado o ineditismo do estudo e justificado o trabalho, visto que as ferramentas propostas não são aplicadas atualmente na indústria da construção civil e que pesquisas nessa área para futura implantação poderá favorecer a produtividade e incremento da qualidade do processo. A Figura A3 do Apêndice A apresenta mais informações dessa análise, incluindo a classificação definida no protocolo de Revisão Sistemática apresentado no mesmo apêndice.

A partir de buscas nas páginas de alguns dos *softwares* de simulação fabril, foi possível identificar que grandes empresas de construção industrializada utilizam esses *softwares*, como o *Delmia* da *Dassault Systemes* (Dassault, 2024), *Tecnomatix* da *Siemens* (Siemens, [s. d.]) e o *FlexSim* da *Autodesk* (Autodesk, 2024). Porém, desenvolvem-se internamente, sem divulgação dos resultados. Sendo assim, é possível identificar a necessidade de pesquisas para divulgação

no meio acadêmico a respeito dos benefícios da implantação desse tipo de ferramenta, promovendo maior disseminação e alcance no setor de construção.

A partir da análise dos documentos selecionados, foi possível identificar a seguinte lacuna de pesquisa:

Virtualização do processo de fabricação de PMVV em CBRFJ de EIM habitacional com o emprego dos conceitos englobados pela Indústria 4.0.

A partir do contexto apresentado, foram levantadas as seguintes questões:

- a) Como produzir uma edificação mais sustentável do ponto de vista do processo de fabricação?
- b) A investigação do processo de fabricação de PMVV para EIM através da virtualização fabril pode gerar benefícios em termos de distâncias, fluxo, tempo, uso de recursos e produtividade?
- c) Se sim, de quanto seriam essas reduções, comparando os diferentes cenários de *layout* do processo fabril desenvolvidos?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Investigar se a virtualização fabril é aplicável ao processo produtivo de painéis modulares de vedação vertical em compósito de matriz biopolimérica reforçado com fibra lignocelulósica para edificação industrializada modular habitacional.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. Aplicar ferramenta computacional baseada em redes neurais para analisar os diferentes tipos de painéis, em função dos tempos individuais dos processos, a fim de identificar os tipos de maior complexidade e extrapolar tempos não conhecidos;
- b. Aplicar ferramenta computacional de realidade virtual denominada fábrica virtual utilizada pela Indústria 4.0 para gerar cenários de *layout* de fabricação de painéis modulares de vedação vertical em compósito de matriz biopolimérica reforçada por fibras de juta para edificação industrializada modular habitacional;

- c. Comparar com a ferramenta de realidade virtual os cenários de *layout* propostos para diagnosticar aquele que apresenta superior desempenho operacional, através da variação do processo, com melhores fluxo, distâncias, tempo de produção, uso de recursos e produtividade.

1.3 Delimitação da Pesquisa

O estudo foi desenvolvido a partir da FlexBuild®, edificação industrializada desenvolvida anteriormente pelo GETIn (Grupo de Estudos em Tecnologia e Inovação) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), ao qual a pesquisadora faz parte, que depende dos resultados desta pesquisa para demonstrar sua viabilidade ou não, e será posteriormente extrapolado para outras edificações industrializadas modulares. Para a presente pesquisa, o uso da edificação é habitacional e assume-se que todos os critérios da Norma de Desempenho ABNT NBR 15575-1-6: 2013-2024 são atendidos pelo sistema e pelos materiais.

Dentre as etapas do ciclo de vida consideradas na pesquisa (projeto, fabricação, montagem, logística, uso e destinação final), é feito o recorte na etapa de fabricação do produto. Sendo assim, a presente pesquisa se restringe ao estudo do processo produtivo na etapa da fábrica, considerando-se que tanto o sistema construtivo da EIM quanto os materiais empregados atendem aos critérios e requisitos de sustentabilidade ambiental. Atribui-se aos materiais empregados a classificação como biodegradável conforme estabelecido pelas normas internacionais (ISO 17088: 2021; EN 14995: 2007). A Avaliação do Ciclo de Vida do produto não faz parte do escopo da pesquisa.

Dentre os princípios da Indústria 4.0, será desenvolvida a virtualização do processo de fabricação dos painéis modulares de vedação vertical (PMVV) da edificação industrializada modular (EIM) estudada, porém, sem dissociar de seus demais conceitos, mas apresentado em formato virtual. Não foram previstos modelos físicos para a pesquisa.

Nesta pesquisa não foi possível fazer o estudo da proporção entre quantidade de painéis inteiros para meio-painéis, nem da relação de painéis de esquadrias e de instalações, mas somente dos três painéis mais complexos identificados pelo algoritmo de redes neurais (RN) desenvolvido durante a pesquisa.

1.4 Caracterização do Objeto de Estudo: FlexBuild®

A FlexBuild® é um sistema construtivo industrializado modular formado por três componentes principais: fundação, painéis de vedação vertical e cobertura. Apesar de o sistema ser aplicável a qualquer tipo de edificação, para a presente pesquisa seu uso foi considerado residencial, conforme planta *layout* na Figura 03. A Figura 04 apresenta a edificação montada virtualmente.

Figura 3 – Planta *Layout* – Área: 76,62 m²



Fonte: GETIn (2024)

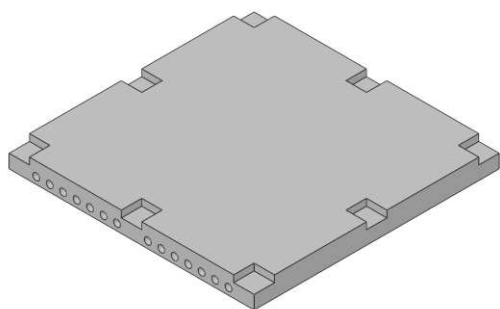
Figura 4 – FlexBuild®



Fonte: GETIn (2024)

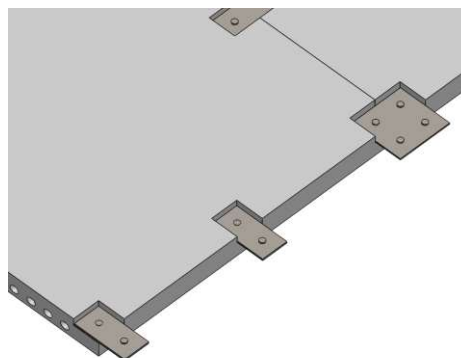
A fundação (Figura 5) é composta por placas de lâminas de material CBRFJ, com o núcleo preenchido por espuma rígida de poliuretano (PU) de células fechadas, formando o que é chamado sistema sanduíche; os painéis de vedação vertical (Figura 6), compostos pelo mesmo material e objeto do presente estudo; e a cobertura (Figura 7), também composta por módulos do mesmo material.

Figura 5 – Placa de fundação



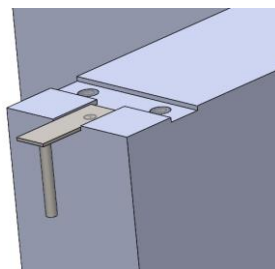
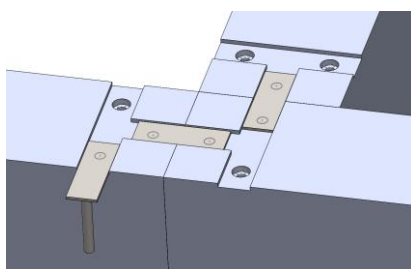
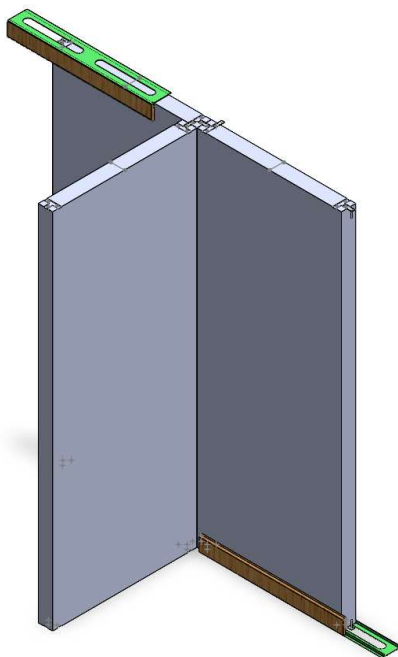
(a) Perspectiva

Fonte: GETIn (2024)



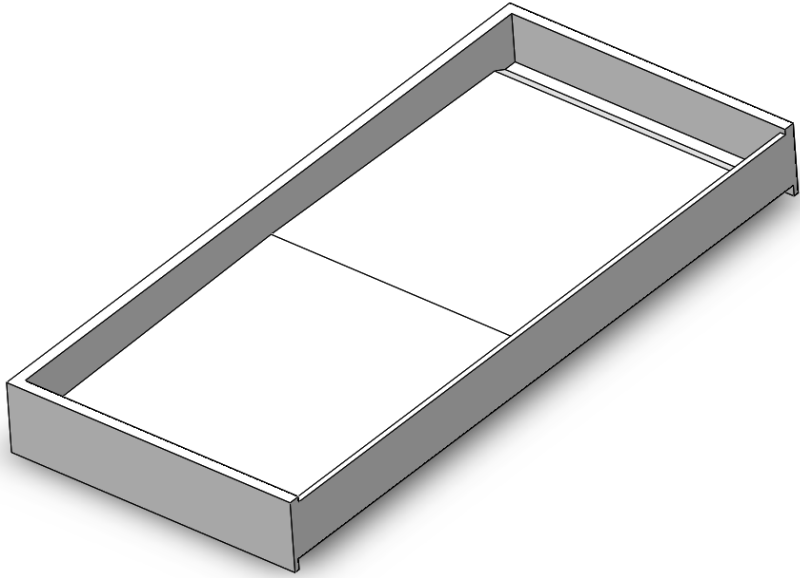
(b) Detalhe do conector

Figura 6 – Par de painéis com conectores



Fonte: GETIn (2024)

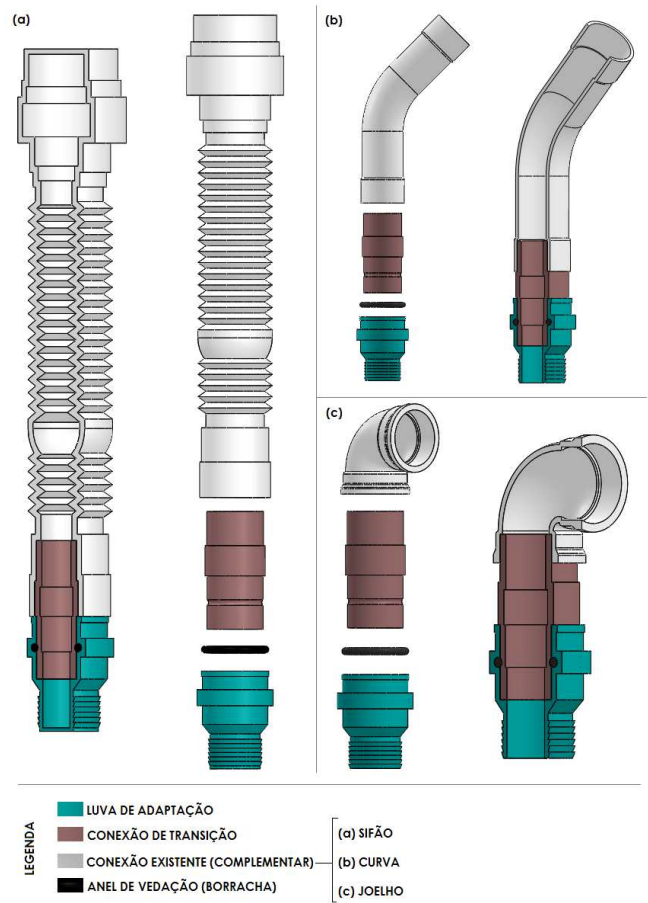
Figura 7 – Módulo da cobertura



Fonte: GETIn (2024)

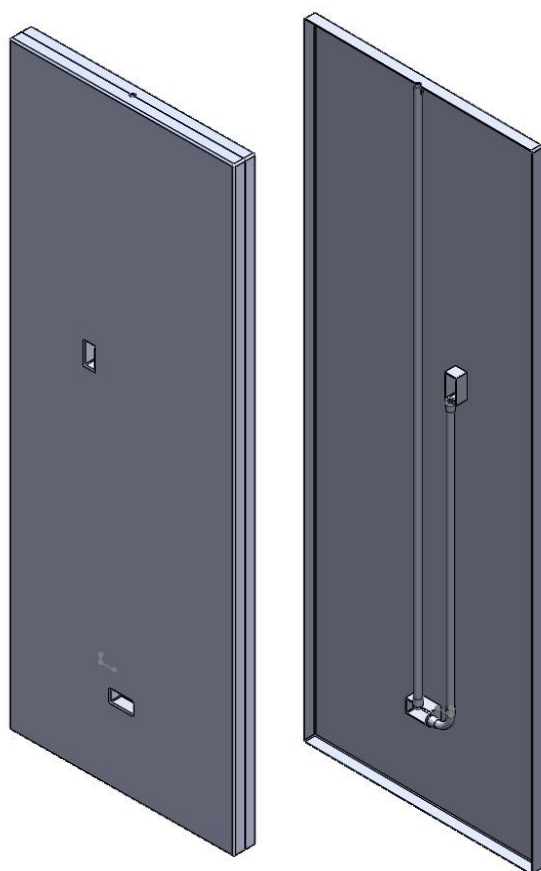
Tanto as instalações (Figuras 8 e 9) quanto as esquadrias (Figura 10) são embutidas nos respectivos componentes (fundação, painel vertical ou cobertura) ainda na fábrica. Todas as peças saem de fábrica acabadas, sendo apenas montadas no local de uso por encaixe.

Figura 8 – Conector de instalações hidrossanitárias

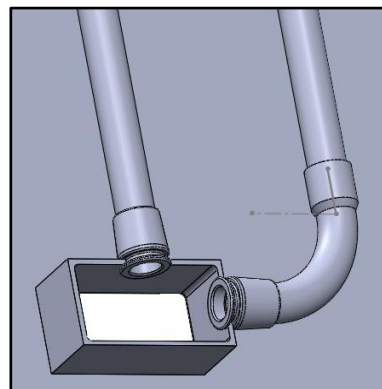


Fonte: GETIn (2024)

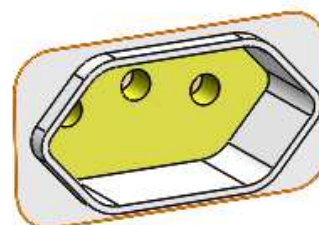
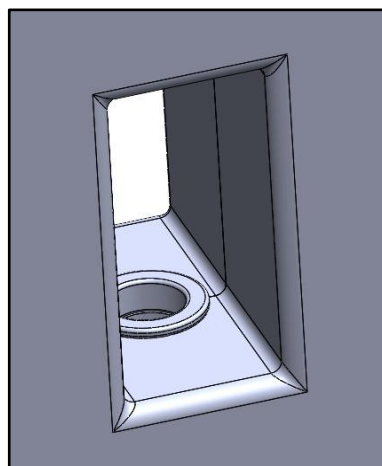
Figura 9 – Painel com caixas e tomada de instalações elétricas



(a) Perspectiva

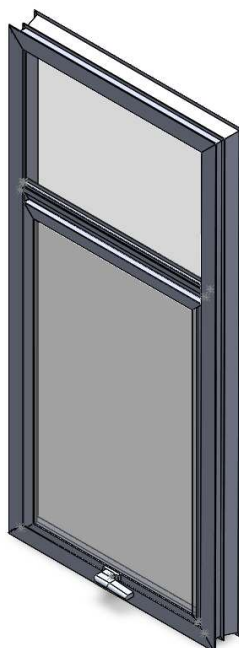


(b) Detalhe interno caixa elétrica



(c) Detalhe externo caixa elétrica e tomada

Fonte: GETIn (2024)

Figura 10 – Janela projetante em alumínio e vidro para fixação na estrutura do painel

Fonte: GETIn (2024)

No caso da tipologia desta edificação, em relação aos diferentes componentes que são fabricados para produzi-la, a Figura 11 apresenta o resumo com a descrição de cada componente com os respectivos códigos mnemônicos. Os que estão assinalados com asterisco e destacados em negrito são os PMVV do sistema FlexBuild® empregados na pesquisa.

Figura 11 – Nomenclatura dos componentes individuais e códigos usados para o produto FlexBuild® (continua)

Descrição	Código mnemônico
Pilarete de fundação com chumbadores rosqueáveis	PFCR
Chapa de ligação entre painéis de pavimento	CLPP
Painel de pavimento modular cego	PPMC
Painel de pavimento modular com esgoto pluvial	PPMEP
Painel de pavimento modular com esgoto cozinha	PPMEC
Painel de pavimento modular com esgoto banheiro	PPMEB
Painel de pavimento modular com esgoto chuveiro	PPMECH
Painel de pavimento modular com esgoto vaso sanitário	PPMEV
Tampa proteção ligações módulos pavimentos	TPLMP
Canaleta inferior	CI

Figura 11 – Nomenclatura dos componentes individuais e códigos usados para o produto FlexBuild® (continuação)

Descrição	Código mnemônico
Rodapé	RP
Grampos de fixação painéis	GFP
Parafusos fixação canaletas, rodapé e rodateto	PFD
Borracha EVA base canaletas	BEC
Painel meio módulo cego*	MPC
Painel meio módulo reforçado*	MPR
Painel módulo cego*	PC
Painel módulo reforçado*	PR
Painel hidráulico*	PH
Painel reforçado hidráulico*	PRH
Painel elétrico*	PEL
Painel reforçado elétrico*	PREL
Painel janela grande*	PJG
Painel janela alta*	PJA
Painel porta*	PP
Rodateto	RTT
Elastômero acabamento e vedação junções	EVJ
Módulo cobertura borda	MCB
Módulo cobertura intermediário	MCI
Grampo junção e imobilização módulos de cobertura	GJMC
Módulo painel fotovoltaico	MFTV
Módulo reservatório água quente	MRAQ
Módulo caixa d'água	MCAG
Tampas de inspeção interna cobertura	TIIC
Escada/rampa acesso pré-fabricada compósito	EAPF/RAPF
Corrimãos para rampa ou escada de acesso	CARE

Fonte: GETIn, 2025

1.5 Estrutura da Tese

Este trabalho dispõe do seguinte sequenciamento:

O Capítulo 1 apresenta o contexto em que o trabalho se insere, assim como sua justificativa, relevância e lacuna do conhecimento. São relacionados os objetivos, as questões e a delimitação da pesquisa, além da caracterização do objeto de estudo.

O Capítulo 2 indica a base conceitual que fundamenta a pesquisa, com a evolução da manufatura até a Indústria 4.0, seus princípios, em especial a virtualização e simulação da fabricação de produto, com a VF, e atuais aplicações da Indústria 4.0 na IC, passando ainda pelos conceitos de IPD e PLM e pelo Projeto de *Layout* de Instalações. Na sequência é feita uma explanação a respeito de materiais compósitos e seus métodos de produção, enfatizando os definidos para a pesquisa.

O Capítulo 3 descreve os materiais e o método de pesquisa empregados no trabalho, assim como estratégias e principais atividades realizadas para sua condução e alcance dos objetivos.

O Capítulo 4 traz os resultados e discussões obtidos da aplicação da RN e das simulações dos cenários propostos para a produção dos PMVV da EIM estudada.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais, conclusões tiradas a partir dos resultados da pesquisa, além de proposições para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo apresenta a base conceitual que fundamenta a pesquisa, com a evolução da manufatura até a Indústria 4.0, seus princípios, em especial a virtualização e simulação da fabricação de produto, com a VF, e atuais aplicações da Indústria 4.0 na IC, passando ainda pelos conceitos de IPD e PLM e pelo Projeto de *Layout* de Instalações. Na sequência é feita uma explanação a respeito de materiais compósitos e seus métodos de produção, enfatizando os definidos para a pesquisa.

2.1 Evolução da Indústria

A indústria da manufatura surgiu com o que os historiadores chamam de Revolução Industrial, no século XVIII, identificada também como Indústria 1.0, quando foram inventadas as primeiras máquinas, com o emprego da energia hidráulica e posteriormente energia a vapor. A segunda revolução industrial, ou Indústria 2.0, foi marcada pela eletricidade, surgem as linhas de montagem e a produção em massa (Stearns, 2021).

Com o desenvolvimento da informática e da eletrônica, advém a terceira revolução industrial, ou Indústria 3.0. Computadores com cada vez mais capacidade de armazenamento e processamento comandam robôs por meio de controladores lógicos programáveis. Surgem então as redes industriais, mas ainda sem conectividade plena (Stearns, 2021).

Em 2011, Kagermann, Lukas e Wahlster preconizam que elementos que caracterizam a terceira revolução industrial, como novos materiais, uso robótico e sistemas de controle central, seriam substituídos na década seguinte pela internet das coisas (*Internet of Things – IoT*), baseada em sistemas físico cibernéticos (*Cyber Phisic Systems – CPS*), proposta do então ainda não lançado programa Indústria 4.0 do governo alemão.

Uma nova revolução industrial, a Indústria 4.0 é proposta como uma estrutura emergente que utiliza a rede de informação e comunicação de compartilhamento de dados para uma troca amplamente automatizada de informações entre produção e processos (Zabidin; Belayutham; Ibrahim, 2020), com aplicação da inteligência artificial (IA) (Lima; Gomes, 2020)

Em janeiro de 2011, na Alemanha, as Universidades, juntamente ao governo, propõem o projeto Indústria 4.0. Em novembro do mesmo ano, o termo Indústria 4.0 é apresentado na Feira

de Hannover, lançando a iniciativa parte do Plano de Ação Estratégica *High-Tech 2020*, que visava tornar a Alemanha líder no fornecimento de soluções para desafios globais, fortalecendo a competitividade da manufatura alemã por meio de uma transformação digital (ACATECH, 2013; Kagermann; Lukas; Wahlster, 2011).

Nos Estados Unidos, também em 2011, o governo lançou o programa Parceira de Indústria Avançada, termo correlato à Indústria 4.0, que previa investimentos na área (PCAST, 2011). Em junho de 2020, o governo publica recomendações para fortalecer a liderança americana nas indústrias do futuro, já considerando o novo cenário pandêmico (PCAST, 2020).

A União Europeia, em 2013, lançou a parceria público-privada denominada Fábricas do Futuro, uma iniciativa para auxiliar as indústrias, aumentando a base tecnológica industrial, através do desenvolvimento e integração de tecnologias inovadoras, tecnologia da informação e comunicação (TIC) para a fabricação e manuseio industrial de materiais avançados (FIRJAN, 2016).

Em março de 2015, o governo da China anunciou o *Made in China 2025*, programa estratégico inspirado no projeto alemão Indústria 4.0, que visava atualizar a indústria do país, tornando-a mais eficiente e integrada, com o aumento da participação estratégica do país na cadeia global de produção (FIRJAN, 2016).

No Japão, no final de 2015, o governo apresentou o programa Sociedade 5.0 por meio do relatório do 5º Plano Básico de Ciência e Tecnologia (CSTI, 2015). Tal programa visa uma sociedade centrada no ser humano com o equilíbrio entre o avanço econômico com a resolução de problemas sociais por um sistema que integra o ciberespaço e o espaço físico (CSTI, [s. d.]), ou seja, empregando os conceitos da Indústria 4.0, mas incluindo a preocupação social.

No Brasil, no início de 2018, o Governo Federal anunciou um relevante pacote de incentivos para a implantação das tecnologias que abrangem a Indústria 4.0. Porém, aqui a indústria ainda está, majoritariamente, entre a Indústria 2.0 e a 3.0, empregando automação e robótica de forma ainda limitada. Sendo assim, o desafio de evolução é ainda maior (Firjan; SENAI, 2019).

O conceito da Indústria 4.0 trouxe uma nova variedade de métodos e tecnologias que podem ajudar a indústria a enfrentar os desafios impostos pelo mercado ao desenvolvimento de

produtos, como a crescente competitividade e mudanças rápidas nas demandas dos clientes (Francalanza *et al.*, 2018). Como a IA, que interligada ao desenvolvimento integrado de produtos, assim como incorporada aos novos produtos e nas funções essenciais de negócios, tornou-se fundamental para obter uma vantagem competitiva sustentável para as empresas (Gujar; Panyam; Paliwal, 2024).

2.2 Desenvolvimento de Produto

Mudanças rápidas nas necessidades dos clientes e na tecnologia forçam as empresas a desenvolverem novos produtos para se tornarem mais competitivas (Kashani *et al.*, 2024).

Rainey (2008) caracteriza o desenvolvimento de produto como um processo de decisões inter-relacionadas, procedendo de oportunidades, ideias e conceitos até a comercialização de forma sistemática. Através de análises e ideias, todos os participantes ganham confiança ao longo do caminho para comercialização.

Para Amaral *et al.* (2006), desenvolver produtos consiste em definir especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção para que se possa produzi-lo, considerando necessidades do mercado, possibilidades e restrições tecnológicas, além de estratégias competitivas e de produto da empresa. Envolve ainda atividades de acompanhamento do produto após o lançamento para eventuais mudanças nessas especificações caso necessário, planejar a descontinuidade do produto no mercado e incorporar, no processo de desenvolvimento, as lições aprendidas ao longo do ciclo de vida do produto.

Mattos e Guimarães (2013) salientam que as técnicas empregadas no Processo de Desenvolvimento de Produtos – PDP devem ser ajustadas dependendo do porte do produto. Técnicas utilizadas em pequenos projetos seriam inadequadas para o desenvolvimento de um produto mais complexo, de maior orçamento e tamanho de equipe, enquanto as empregadas em um grande projeto seriam desajeitadas e burocráticas para um produto mais simples.

Francisco e Ortenzi (2023) afirmam que é necessário o conhecimento e aplicação de princípios, abordagens e métodos que permitam realizar de forma eficiente a gestão integrada de projeto e produção, incluindo o monitoramento ou controle do ciclo de vida de um determinado

produto, como o Projeto direcionado à eXcelência (*Design for eXcelence* – DfX), o Desenvolvimento Integrado de Produto (*Integrated Product development* – IPD) e a Gestão do Ciclo de Vida do Produto (*Product Lifecycle Management* – PLM).

2.2.1 Projeto Direcionado à eXcelência

O Projeto Direcionado à eXcelência (*Design for eXcelence* – DfX) foca em um número limitado de elementos vitais por vez: montagem, desmontagem, manufatura, reciclagem, reutilização, sustentabilidade. Isso permite que os recursos avaliados possam ser mais bem aproveitados. "X" em DfX é composto de duas partes: processos de ciclo de vida e medida de desempenho (capacidade) (Huang, 1996).

Segundo Huang (1996), a ferramenta DfX:

- Reúne e apresenta fatos sobre produtos e processos.
- Esclarece e analisa as relações entre produtos e processos.
- Mede o desempenho.
- Destaca os pontos fortes e fracos e compara as alternativas.
- Diagnostica porque uma área é forte ou fraca.
- Fornece propostas de redesenho sobre como um projeto pode ser melhorado.
- Prevê os efeitos hipotéticos.
- Realiza melhorias.
- Permite que a iteração ocorra.

O DfX é uma abordagem sistemática para atingir objetivos onde “X” pode representar as metas ou características de um produto ou processo. Visa integrar e selecionar várias facetas, facilitando a colaboração entre *designers* e equipes de projeto ao longo do ciclo de vida do produto, otimizando assim a implementação dessas estratégias. Essa abordagem não apenas apoia a inovação contínua do produto, mas também promove a transformação e o desenvolvimento organizacional. No contexto da transformação digital e da Indústria 4.0, o DfX, integrado com estratégias centradas no cliente, aprimora as práticas de fabricação inteligente, fornecendo serviços personalizados que transformam os métodos de fabricação tradicionais e

elevam a criação de valor e o modelo de negócios de uma empresa (Hsieh; Huang; Lan, 2024).

No contexto do DfX, onde "X" pode se relacionar a vários padrões de qualidade — variando de aspectos gerais como confiabilidade, adequação de montagem, robustez e manutenibilidade, a outros mais específicos como impacto ambiental, ergonomia e valor estético — fica cada vez mais claro que integrar inteligência em ferramentas existentes auxiliadas por computador, como sistemas CAD, pode aumentar significativamente a eficácia e a confiabilidade da execução de várias tarefas de engenharia, incluindo *design* (Hsieh; Huang; Lan, 2024).

Hsieh, Huang e Lan (2024) propõe um *design* de sistema que incorpora as três perspectivas conceituais dos *drivers* de transformação, referenciando tanto a estrutura do sistema de nuvem de produção inteligente quanto a estrutura de configuração do sistema DfX. O *design* do sistema, complementado pelos objetivos do DfX, visa combinar uma abordagem orientada ao cliente com o sistema de *software* de *design*. Ao adotar uma perspectiva centrada no cliente, utilizar *software* de *design* personalizado e obter *software* de experiência de realidade virtual (RV), a integração em sistemas de produção inteligentes pode garantir benefícios abrangentes — da experiência e *design* do cliente à produção e vendas automatizadas — gerando, assim, valor na transformação digital.

Os autores descrevem o desenvolvimento de um sistema integrado de manufatura inteligente focado na experiência de *design* personalizado para clientes. Utilizando RV e integração em nuvem, o sistema otimiza a eficiência operacional e alinha a produção com as necessidades do consumidor através da metodologia DfX. O estudo apresenta uma estrutura de transformação digital integrando *design*, produção e *marketing*, e é validado por um estudo de caso em uma indústria de móveis de cozinha, demonstrando melhorias na eficiência e na satisfação do cliente. Os resultados quantitativos mostram redução no tempo de desenvolvimento do projeto e aumento na satisfação do cliente após a implementação do sistema (Hsieh; Huang; Lan, 2024).

Um estudo para a criação de um sistema de energia solar apresenta uma estrutura abrangente que ajuda os desenvolvedores de produtos a extrair com precisão e rapidez atributos de qualidade do sistema, como os requisitos não funcionais (que especificam como um sistema

deve se comportar) essenciais, ainda em estágios iniciais de qualquer sistema em desenvolvimento. Tais requisitos são criados quando as necessidades dos clientes são interpretadas corretamente. Utilizou-se a abordagem DfX no processo de extração dos requisitos não funcionais, juntamente com técnicas adicionais como QFD (*Quality Function Deployment* – Desdobramento da Função de Qualidade) e HFS (*Hesitant Fuzzy Sets* – Conjuntos Difusos Hesitantes), para garantir que tais atributos sejam considerados durante o processo de desenvolvimento (Kashani *et al.*, 2024).

O termo “X” refere-se à excelência global e pode ser desmembrado para algum escopo específico de projeto, como por exemplo (Campioli; Lavagna, 2007; Guy; Shell; Esherick, 2006; Hsieh; Huang; Lan, 2024; Huang, 1996): Projeto direcionado à Fabricação (*Design for Manufacturing* – DfM), Projeto direcionado à Montagem (*Design for Assembly* – DfA), Projeto direcionado à Desmontagem (*Design for Disassembly* – DfD) e Projeto direcionado à Reutilização (*Design for Reuse* – DfRu).

O DfA foca no processo de montagem, que faz parte do ciclo de vida de produção. Considera fatores primários relacionados ao produto, incluindo simetria da peça, tamanho, peso, ajustes, orientação, características da forma; fatores primários relacionados ao processo de montagem, como inserção, manuseio, fixação, orientação, ferramentas e equipamentos especiais. Uma análise criteriosa dessas questões e seus relacionamentos resulta em melhores decisões de projeto com relação à facilidade de montagem. Ao mesmo tempo, uma atmosfera de cooperação de trabalho em equipe é criada, assim a eficiência de montagem é melhorada (Huang, 1996). O DfA concentra a atenção no produto completo (ou subconjunto) como um todo e, em seguida, promove as ideias de redução de peças, peças padronizadas e modularização de produtos. Desta forma, atua como balizador para o DfM. O DfA desempenha, assim, um papel integrador, pois uma estratégia DfM baseada totalmente em projeto direcionado ao processo corre o risco de se tornar muito orientada a peças (Leaney, 1996).

A principal vantagem do DfMA (Projeto direcionado à Fabricação e Montagem) é a redução no número de peças, aumento da capacidade de fabricação e facilidade de montagem, o que reduz o custo geral do produto. O desenvolvimento de novos métodos para o projeto de

fabricação e montagem, incorporando necessidades de qualidade no estágio de projeto e a atenção recente à transparência do trabalho e da comunicação durante o processo, geraram uma demanda por uma abordagem mais estruturada ao *design*. Para a configuração inicial do sistema, considerar as condições de produção de projeto personalizado e a viabilidade de conexão a sistemas de produção inteligentes é fundamental (Hsieh; Huang; Lan, 2024).

O DfD é usado como estratégia de projeto do ciclo de vida do produto com o intuito de reduzir o uso de recursos materiais e de energia. O produto é desenvolvido pensando de forma a facilitar a desmontagem e como suas partes componentes para a construção serão reutilizadas ou recicladas (Campioli; Lavagna, 2007). Um certo nível de desmontagem de cada componente é necessário para que partes dos produtos que chegaram ao final de sua vida útil possam ser facilmente desmembradas para possibilitar a reutilização (Go *et al.*, 2012).

Motiei et al. (2024), por meio de uma revisão sistemática da literatura, discorrem acerca de estratégias para a construção de edifícios circulares, focando na implementação de princípios de economia circular em todas as fases do ciclo de vida de um edifício. O DfX é abordado como um conjunto de estratégias para melhorar o desenvolvimento de edifícios circulares, estendendo a vida útil dos edifícios e apoiando práticas de construção de baixo carbono. O "X" no DfX representa as muitas estratégias reconhecidas na literatura, como projeto direcionado à desmontagem (DfD), projeto direcionado à adaptabilidade, projeto direcionado à modularidade, projeto direcionado à durabilidade e projeto direcionado à otimização. Essas estratégias desempenham um papel crucial no avanço de edifícios circulares, auxiliando na gestão eficiente de recursos e na redução do impacto ambiental.

O DfD é apresentado como uma estratégia fundamental para a circularidade, focando em tornar os edifícios desmontáveis, permitindo a reutilização, reparo, remanufatura ou reciclagem dos materiais no final da vida útil do edifício. O DfD enfatiza a reversibilidade, permitindo que um sistema ou componente retorne ao seu estado original. O DfD é mais eficaz quando se utilizam materiais leves, como madeira e aço, ao invés de concreto (Motiei *et al.*, 2024).

No DfRu, o produto é desenvolvido com o intuito de reuso de suas partes. No âmbito da gestão de resíduos, reutilizar é a medida que menos emprega energia, por não necessitar de

transformação (Almeida; Borsato; Ugaya, 2017). Reduzir o consumo é a forma mais eficiente de diminuir o desperdício. Uma vez que medidas eficazes de redução da geração de resíduos estão implementadas, considera-se reutilizar, recuperar, reciclar ou, afinal, dispor dos resíduos de forma adequada (Go *et al.*, 2012).

A reutilização diminui a geração de resíduos e a redução de resíduos é importante para a sustentabilidade pelas seguintes razões (Sustainable Jersey, 2024, p. 1):

- Reduz a necessidade de aterro e incineração.
- Previne a poluição causada pela fabricação de produtos a partir de materiais virgens.
- Economiza energia.
- Diminui as emissões de gases de efeito estufa que contribuem para as mudanças climáticas globais.
- Conserva recursos naturais como madeira, água e minerais.
- Protege e expande as tarefas de fabricação e aumenta a competitividade das indústrias.
- Ajuda a sustentar o meio ambiente para as gerações futuras.

Economia também pode ser gerada pela reutilização. Isso ocorre porque um novo pedido para um novo objeto não será necessário, o que economiza tempo e dinheiro (Go *et al.*, 2012).

No caso de produtos de tecnologia, que apresentam ciclo de vida curto no mercado, ou seja, rápida obsolescência, a reutilização de componentes no mesmo produto é limitada, tem pouco valor para os consumidores quando o componente é reutilizado. Entretanto, pesquisas em *design* modular, partes comuns e tomada de decisão no desenvolvimento do projeto do produto, como em Troussier et al. (1999) e Kimura et al. (2001), tornaram possível componentes de um produto serem reutilizados em diferentes tipos de produtos (Li; Zhang; Lin, 2009).

O DfX apresenta uma oportunidade significativa para estudos iniciais de edifícios altos modulares garantirem sua eficiência e construtibilidade e alcançar seus benefícios multidimensionais. Sua aplicação foi investigada em pesquisa que buscou juntar as noções DfX fragmentadas predominantes e estabelecer diretrizes de projeto de módulo praticáveis. Como o desenvolvimento de edifícios modulares altos não envolve apenas produção e montagem, mas o gerenciamento de todo o ciclo de vida dos módulos, a visão holística do DfX é prospectada

para não apenas possibilitar a produção em massa e facilitar a instalação de um módulo, mas também torná-los ecologicamente corretos, mais seguros, de melhor qualidade e mais acessíveis para todos (Laovisutthichai; Lu; Low, 2024).

As diretrizes foram inicialmente desenvolvidas com base em literatura prévia e estudo de caso, e seu alinhamento com as práticas existentes foi posteriormente testado. Recomendou-se 1) um formato de módulo retangular simplificado, 2) tamanho de módulo considerando também dimensões de armazenamento e transporte, 3) espaço padronizado entre projetos e 4) coordenação dimensional entre módulos e espaços. Ao utilizá-los para analisar projetos de edifícios altos em Hong Kong, os resultados revelaram semelhanças entre as diretrizes propostas e práticas reais, afirmando sua validade simultânea e criando afirmações de garantia. Esta pesquisa oferece conhecimento DfX transformado para orientar sistematicamente implementações futuras e explica mudanças no projeto arquitetônico (Laovisutthichai; Lu; Low, 2024).

Com a introdução e aplicação gradativa das ferramentas DfXs, mais questões relacionadas ao ciclo de vida e outros fatores são levados em consideração. Melhores decisões globais são tomadas sem perder o foco e a visão necessários. Assim, um ambiente é criado de forma incremental e aprimorado dinamicamente (Francisco; Ortenzi, 2023; Huang, 1996) e as diversas equipes do processo de desenvolvimento integrado de produto são envolvidas de forma concomitante (Francisco; Ortenzi, 2023).

2.2.2 Desenvolvimento Integrado de Produto

O Desenvolvimento Integrado de Produto (Integrated Product Development – IPD) é a abordagem predominante de inovação de produtos usada pela maioria das corporações globais (Rainey, 2008). Ele se baseia na colaboração entre os processos de projeto integrado de produtos, manufatura e suporte (Francalanza *et al.*, 2018).

O IPD desenvolve-se a partir da Engenharia Concorrente ou Simultânea (*Concurrent Engineering* – CE), que se tornou a metodologia de organização do trabalho dominante na área de desenvolvimento de produto nos anos 80, focando na redução do distanciamento entre projeto

e fabricação e introduzindo o trabalho interfuncional na área técnica, realizado dentro do conceito de paralelismo temporal na execução das tarefas. Assim, o desenvolvimento da produção pode ter seu tempo de execução reduzido, já que problemas de produção puderam ser sanados pelo fato de o projeto do produto contemplar mais adequadamente as questões de produção desde o início do ciclo de desenvolvimento (Cunha, 2008).

A abordagem de CE tem como objetivo fazer com que os indivíduos participem da atividade de desenvolvimento de produtos constantemente e simultaneamente, desde as fases iniciais, e que considerem todos os elementos do ciclo de vida do produto, incluindo aqueles encontrados durante as fases de fabricação, distribuição e uso. Isso contrasta fortemente com o desenvolvimento sequencial de produtos, onde as atividades de desenvolvimento são realizadas sequencialmente, uma após a outra (Francalanza *et al.*, 2018).

A CE pode ser entendida como uma metodologia de integração dos princípios DfX com os métodos e tecnologias de produção, assim como a gestão de produção. Consequentemente, essa associação pode ser vista como o IPD (Francisco; Ortenzi, 2023). Assim, o IPD é uma evolução da CE, principalmente em relação ao trabalho em equipe, porém, sua proposta consiste em uma extensão da aplicação desse conceito a todas as áreas envolvidas no desenvolvimento de produtos, não somente as engenharias (Cunha, 2008).

O IPD é o desenvolvimento simultâneo de novos produtos e processos usando equipes multifuncionais que permite colaboração e coordenação entre todos os participantes dentro da organização e estão estrategicamente alinhados com as necessidades dos clientes e partes envolvidas. Atualmente, clientes, partes envolvidas e sociedade esperam e exigem produtos e serviços superiores que atendam às necessidades de todos os constituintes (Rainey, 2008).

O IPD surgiu devido à redução substancial entre o tempo de concepção, desenvolvimento e produção de um produto qualquer numa era de mercado globalizado. Assim, o lançamento de um produto e sua assimilação pelo mercado se tornou acelerada nas últimas décadas. Consequentemente, novas exigências surgiram e exigiram a melhoria contínua nos produtos, com incorporação de novos recursos e menores preços (Rainey, 2008). Esses requisitos exigiram a redução dos ciclos de vida dos produtos e serviços, ocorrendo com isso maior

fragmentação dos mercados e o fornecimento de produtos que atendessem às necessidades mais específicas de cada mercado. O desenvolvimento do Boeing 767 é um dos primeiros exemplos desse processo (Rainey, 2008).

O IPD envolve a colaboração e integração de diferentes áreas e funções dentro de uma organização para criar um processo de desenvolvimento contínuo para produtos e sistemas de manufatura (Disselkamp *et al.*, 2023). No IPD o processo de concepção, projeto, análise comercial e financeira, projeto executivo e fabricação de um produto é feito de forma integrada, por equipe composta por membros de todas as fases envolvidas no processo (projeto, *marketing*, financeiro, produção e operação, vendas, atendimento a clientes). Suas principais características são (Amaral *et al.*, 2006):

- Desenvolvimento de produto (DP) inserido na estratégia geral da empresa, visto como fundamental para competitividade e é preocupação da alta administração.
- DP visto como processo.
- Uso de projetos plataforma e modularizados para criar grande variedade de produtos, atendendo diferentes segmentos com baixo investimento.
- Simultaneidade e superposição de informações e de atividades.
- Projetos conduzidos por times de desenvolvimento multifuncionais, favorecendo a comunicação e o trabalho em grupo.
- Fornecedores são envolvidos desde o início do desenvolvimento e há mais facilidade de fazer alianças estratégicas para o projeto.
- Projetos são submetidos à revisão e avaliação técnica e de custos constante, bem como de seu alinhamento com as estratégias de *marketing* e de produto.
- Profissionais generalistas, com promoção na carreira tanto vertical quanto horizontal e mobilidade de pessoal internamente para áreas externas. Seleção e treinamento, além da especialidade e da competência técnica, reforçam outros atributos, como capacidade de trabalhar em grupo.
- Estímulo à participação das áreas envolvidas em todas as fases de desenvolvimento, em especial no início, para que haja consenso sobre os parâmetros básicos dos

projetos, evitando divergências posteriores, para que o projeto possa transcorrer de forma mais fluida.

O conhecimento de produção para engenheiros de projeto nas fases iniciais é fundamental para reduzir incertezas e aproveitar todo o potencial das capacidades de produção. Além disso, a colaboração entre o projeto, a produção e outras partes envolvidas é importante para que o desenvolvimento do produto e da produção seja capaz de atender aos requisitos do cliente, às capacidades de produção e à visão (Koroth *et al.*, 2024). Koroth *et al.* (2024) fornecem um método estruturado de especificação de requisitos de produção, capturando não apenas os requisitos, mas também as justificativas e consequências, enfatizando a tomada de decisões por meio da colaboração. O método emprega a verificação de níveis de preparação tecnológica para apoiar os engenheiros de produção na condução de análises de transferência de componentes/módulos e na identificação do produto e das maturidades de produção alinhadas com o processo de desenvolvimento do produto para formular os requisitos e reduzir ambiguidades. Assim, o método apoia os engenheiros de produção na estruturação dos seus requisitos e no compartilhamento dos mesmos com os engenheiros de projeto, melhorando a colaboração através de uma linguagem comum e de uma compreensão clara (Koroth *et al.*, 2024).

Francalanza *et al.* (2018) apresentam um modelo de manufatura digital que tem como objetivo auxiliar a indústria a aplicar tecnologias digitais avançadas ainda não empregadas e promover o IPD. Estudos práticos são apresentados, explorando como as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser aplicadas nesse ambiente. O modelo digital alcança o propósito ao oferecer uma forma de demonstrar como essas tecnologias podem ser utilizadas nas diferentes etapas do ciclo de vida da fábrica. Além disso, o modelo de manufatura digital destaca as habilidades interpessoais e meta-habilidades que precisam ser desenvolvidas para apoiar a digitalização das atividades de desenvolvimento de produtos (Francalanza *et al.*, 2018).

O IPD também busca atender às necessidades dos clientes. O uso de tecnologias como portais da *web* e realidade aumentada pode facilitar a interação com os clientes, permitindo que eles se tornem atores ativos no processo de projeto do produto. A análise do *feedback* do cliente

também é um aspecto importante do IPD. O *feedback* pode ser coletado por meio de pesquisas, entrevistas e grupos de foco. As mídias sociais também podem ser usadas para melhorar a troca de conhecimento e o processo colaborativo dentro do IPD. A análise de *big data* também pode ser usada para analisar o *feedback* dos clientes e melhorar o projeto e planejamento da produção (Francalanza et al., 2018).

O IPD é considerado subconjunto do sistema de gerenciamento estratégico das empresas, pois o objetivo principal da aplicação desse processo é promover uma vantagem competitiva, sucesso a longo prazo e estabilidade em relação aos fornecedores, consumidores e ao mercado através do desenvolvimento e comercialização de produtos que atendam os interesses diversos (Rainey, 2008).

Ao se integrar os princípios anteriores aos critérios e requisitos das normas internacionais de qualidade (ABNT-ISO, 2015b, 2015a; Hoyle, 2017) e os requisitos mínimos exigidos pela sociedade como padrões aceitáveis de desempenho e confiabilidade de um produto qualquer, a integração atinge sua forma mais completa. A gestão dessa integração é conhecida como Gestão de ciclo de Vida do Produto (*Product Life-cycle Management – PLM*) (Duarte Junior; Francisco; Ortenzi, 2024; Francisco; Ortenzi, 2023).

2.2.3 Gestão do Ciclo de Vida do Produto

O conceito de ciclo de vida, assimilado da biologia para definir as etapas da vida dos seres vivos, que nascem, crescem, amadurecem, declinam e morrem, foi empregado para descrever as fases de um produto. A partir da década de 1950, o conceito foi apropriado pelos economistas e cientistas sociais dos Estados Unidos do pós-2ª Guerra, em relação às estratégias organizacionais das grandes corporações daquele país como forma de atender consumidores que se tornavam cada vez mais exigentes (Levitt, 1958).

A ideia de ciclo de vida do produto foi introduzida em 1950 por Joel Dean em seu artigo intitulado *Product Life-Cycle Research: A Literature Review*, publicado no periódico *Harvard Business Review* (Rink; Swan, 1979), que foi publicado novamente em 1976.

Polli e Cook (1969, p. 385) foram os primeiros a realizar uma validação e sistematização

do conceito ciclo de vida do produto e descrevem:

O conceito de ciclo de vida de produto tem sido amplamente discutido ao longo da última década, mas não foi sistematicamente testado como um modelo de comportamento de venda. (...) Mas muitos autores usaram o ciclo de vida de produto como uma base para a recomendação do conteúdo de programas de *marketing* para diferentes estágios de ciclo de vida.

O ciclo de vida do produto foi diferentemente assimilado por distintos pesquisadores e ao longo do tempo, com a evolução dos modernos meios de produção e gestão de negócios, transformou-se de uma estratégia de *marketing*, para uma solução de *marketing*. Essa mudança foi necessária para atender à crescente exigência por qualidade, da parte de consumidores no mundo todo (Cox, 1967). Isso fica mais claro no documento produzido pela NASA (Leininger *et al.*, 1975), onde constam uma série de protocolos e ferramentas matemáticas para se calcular os diferentes níveis de requisitos das metas estabelecidas pela agência americana, em relação ao valor ao longo do tempo para um produto, sua depreciação e como o fator de escala de produção interfere no ciclo de vida desse.

A literatura apresenta várias descrições das etapas do ciclo de vida de um produto. Para Romeiro *et al.* (2013), em uma perspectiva mercadológica, o produto passa por quatros estágios após seu lançamento no mercado: introdução do produto, crescimento, maturação e declínio. Qureshi, Gericke e Blessing (2014) compararam os modelos estudados em sua pesquisa e identificaram um conjunto comum de estágios e sub estágios, conforme apresentado na Figura 12, destacando a importância da interdisciplinaridade no desenvolvimento do produto em todo seu ciclo de vida.

O entendimento do conceito de ciclo de vida do produto foi ampliado para outras áreas e atualmente pode representar diferentes perspectivas e termos do seu significado. As perspectivas podem variar de acordo com a extensão que o ciclo de vida representa, ou seja, onde ele inicia e onde ele termina, ou conforme um dado ponto de vista, na visão do desenvolvimento de um novo produto, do usuário deste ou conforme a perspectiva de mercado após seu lançamento (Romeiro *et al.*, 2013).

Figura 12 – Estrutura do ciclo de vida do produto

Estágios	Subestágios
Estabelecimento da necessidade	Análise de mercado e projeção
	Identificação de necessidade
	Gerenciamento de projetos
	Especificação de requisitos
Projeto	Conceitual
	Projeto de execução
	Projeto de detalhamento
	Desenvolvimento de sistemas de produção
Implementação e realização	Fabricação
	Montagem
	Integração de Sistemas
	Aquisição
Uso / Suporte	Vendas e distribuição
	Instalação
	Operação
	Serviço e manutenção
Fim da vida	Retirada / Descarte / Encerramento

Fonte: Adaptado de Qureshi, Gericke e Blessing (2014, p. 227)

Na visão do desenvolvimento de um novo produto, Francisco e Ortenzi (2023) descrevem que o produto passa pelas etapas de concepção (projeto), fabricação, logística, montagem, uso e disposição final do produto ou suas partes e todas essas etapas do processo produtivo devem ser gerenciadas desde o início.

A visão voltada para a percepção ambiental sobre o ciclo de vida de um produto é a caracterização das suas etapas produtivas sucessivas desde a extração da matéria-prima para a sua realização até a sua disposição final, importante para avaliar os impactos ambientais associados a esse produto e definir as estratégias para a redução desses mesmos impactos (Romeiro *et al.*, 2013).

Nessa perspectiva, o início da vida do produto, ou “nascimento”, começa com a extração da matéria prima, que é processada com o objetivo de gerar insumos para a etapa de produção. Na etapa de desenvolvimento são definidos aspectos como, por exemplo, pesquisa de mercado,

projeto conceitual, detalhamento do projeto, definição de materiais e planejamento de produção. O produto passa então pela etapa de produção e, logo após, para a sua distribuição para os pontos de venda, onde é comercializado e pode ser utilizado por uma grande variedade de usuários enquanto atender o desempenho requerido. Esgotada a etapa de utilização, o produto tende a ir para a etapa de disposição final ou descarte, quando o produto “morre” (Romeiro *et al.*, 2013).

Mas ao final da utilização do produto, ele pode ser recolhido através de mecanismos de logística reversa até uma planta de reaproveitamento, quando é desmontado e suas peças e componentes são limpos, testados e selecionados para reutilização, reciclagem e remanufatura, considerando também suas condições técnicas. Um produto projetado tendo em vista seu ciclo de vida deverá ser de fácil desmontagem, por exemplo, para a reutilização de componentes ou reciclagem de matérias primas. Como consequência, o completo reaproveitamento das peças e componentes do produto através da reutilização, reciclagem ou remanufatura faz com que ele retorne ao sistema produtivo, economizando-se energia e matéria prima. Tal economia pode trazer ganhos em termos de redução de custos de produção e de impactos ambientais associados ao produto (Romeiro *et al.*, 2013).

Para a presente pesquisa, serão consideradas as etapas do ciclo de vida na visão do desenvolvimento de um novo produto apresentada por Francisco e Ortenzi (2023), como mencionado: concepção (projeto), fabricação, logística, montagem, uso e disposição final do produto ou suas partes.

No início do século XXI surge um novo paradigma para empresas de manufatura, a Gestão de ciclo de Vida do Produto (*Product Life-cycle Management* – PLM), que permite que as empresas gerenciem seus produtos em seus ciclos de vida, da ideia inicial até o fim de sua vida útil. Não apenas um dos produtos de uma empresa, mas toda a gama de forma integrada, desde a peça individual até o produto individual e todo o portfólio de produtos (Stark, 2022).

O PLM reúne o que era anteriormente separado, por exemplo, desenvolvimento de produto e suporte ao produto. Ele é uma atividade empresarial holística que aborda, além dos produtos e dados de produtos, também processos, aplicações, pessoas, estruturas organizacionais,

métodos de trabalho, estruturas de informação, sistemas de informação, técnicas e equipamentos. Este novo paradigma para a situação particular de uma empresa de produtos, mercado, clientes, concorrentes e tecnologia, leva a novas oportunidades e novas maneiras de organizar recursos para obter benefícios. O objetivo do PLM é aumentar a receita, reduzir custos, maximizar o valor do portfólio dos produtos atuais e futuros para clientes e acionistas (Stark, 2022).

Para as empresas, o PLM traz benefícios econômico, social, ambiental, técnico e organizacional. Duda, Oleszek e Santarek (2024) apresentam que a literatura identifica quatro áreas nas quais as empresas obtêm benefícios com o uso do PLM: desempenho financeiro, com redução de custos e aumento de receita; redução de tempo, com otimização dos processos; melhoria da qualidade, com aumento do grau de atendimento aos requisitos de negócios nos produtos e maior satisfação do cliente; e melhoria na eficiência geral da gestão empresarial (Duda; Oleszek; Santarek, 2024).

A melhoria na gestão empresarial é alcançada através do aumento da taxa de inovação, acesso mais fácil aos dados e documentação técnica, maior reutilização de componentes existentes, maior rastreabilidade do produto e seus componentes ao longo do ciclo de vida. Além disso, maior facilidade e rapidez nas tomadas de decisão, melhor comunicação durante todo o processo e entre as partes envolvidas, redução da necessidade de alterações de produtos em fases finais do desenvolvimento, gestão mais eficaz do portfólio global de produtos e garantia da conformidade do produto com as leis, regulamentos internos, padrões de mercado e requisitos em mercados individuais (Duda; Oleszek; Santarek, 2024).

O ambiente PLM, além de garantir uma integração contínua, facilita a ligação de programas e projetos de inovação em andamento com o portfólio de produtos. Também estabelece conexões com atividades detalhadas relacionadas à implementação de produto, engenharia paralela e processos de produção (Duda; Oleszek; Santarek, 2024).

O PLM é multifuncional e, no ambiente de Empresa Estendida do início do século XXI, geralmente é também multiempresarial. Os participantes do ciclo de vida do produto geralmente estão em fusos horários diferentes, usam aplicativos diferentes e trabalham para empresas

diferentes. Em momentos diferentes, pode ser com grupos de *marketing*, engenharia, gerenciamento de produtos, manufatura, finanças, vendas e serviços em empresas diferentes. Chegar a um acordo sobre uma abordagem comum entre todas essas organizações é um desafio e o PLM ajuda a fazer com que todos trabalhem juntos de forma eficaz (Stark, 2022).

A partir do conceito da abordagem PLM, foram desenvolvidos os sistemas PLM, que especialmente no contexto da Indústria 4.0, desempenham um papel fundamental na transformação digital das empresas, como a integração das várias tecnologias da Indústria 4.0 e a centralização de armazenamento, processamento e distribuição de informações coletadas por meio da utilização de tecnologias da Indústria 4.0 (Duda; Oleszek; Santarek, 2024).

No ambiente PLM, existem milhares de aplicativos fornecidos por diferentes fornecedores, como os aplicativos de Gestão de Dados do Produto (*Product Data Management* – PDM), Análise por Elementos Finitos (*Finite Element Analysis* – FEA), Engenharia Auxiliada por Computador/ Manufatura Auxiliada por Computador (*Computer Aided Engineering/Computer Aided Manufacturing* – CAE/CAM), Prototipagem Virtual, Simulação, Manufatura Digital (ou Fábrica Virtual), entre muitos outros (Stark, 2022).

Ainda nesse contexto, surgem novas ferramentas integradas ao PLM como a Trilha Digital (*Digital Thread*), que ajuda as empresas a registrarem e gerirem os seus dados de forma eficiente ao longo de todo o ciclo de vida do produto, promovendo a colaboração, a tomada de decisão e a melhoria contínua. É frequentemente usado em conjunto com outras tecnologias da Indústria 4.0, como o Gêmeo Digital (*Digital Twin*) (Lehner *et al.*, 2024).

Os aplicativos de Manufatura Digital ajudam em atividades como estimativa de custos de fabricação, *layout* e simulação de fábrica e planejamento de processos. Eles também são usados para programar robôs, máquinas, ferramentas e equipamentos de inspeção (Stark, 2022).

O uso da IA generativa (IAG) pode impulsionar a manufatura inteligente em todas as fases do PLM, incluindo projeto, manufatura, logística, operação e reciclagem e remanufatura (Leng *et al.*, 2026):

- Projeto: O uso da IAG no processo de projeto pode reduzir custos de produção, acelerar ciclos de inovação, permitir personalização em larga escala e diminuir as emissões ao

longo da vida útil de cada produto. O projeto generativo aprimora o processo de *design*, gerando soluções otimizadas, estimulando a criatividade e automatizando tomadas de decisão complexas com base em objetivos e restrições definidos pelo usuário.

- **Manufatura:** O planejamento, o controle e a otimização de processos garantem uma produção eficiente, definindo fluxos de trabalho, monitorando a qualidade e refinando processos para melhor desempenho. Pesquisas atuais utilizam IAG para o planejamento de processos, como a otimização do planejamento da produção, aumentando a produtividade e reduzindo custos em todas as suas operações.
Manufatura Colaborativa: A IAG aprimora a colaboração humano-robô, permitindo que os robôs analisem dados de produção em tempo real e informações ambientais, fornecendo suporte inteligente à decisão e otimizando a eficiência da interação.
- **Marketing e Logística:** A IAG pode prever o comportamento do consumidor, otimizar recursos do produto, analisando dados de mercado, e melhorar a previsão de demanda. A IAG otimiza a logística e o estoque usando dados em tempo real para adaptar rotas, cortar custos e melhorar a precisão da previsão de estoque.
- **Operação e Manutenção:** Os modelos de IAG melhoram a eficiência operacional e a confiabilidade dos equipamentos de aferição, abordando dados desbalanceados e aprimorando a detecção de anomalias e o diagnóstico de falhas. A manutenção preditiva aprimorada pela IAG aumenta a precisão das previsões de falhas, utilizando técnicas avançadas de IA para simular o comportamento dos equipamentos e gerar dados sintéticos. Isso permite que os modelos preditivos façam previsões confiáveis mesmo com dados reais limitados, levando a estratégias de manutenção mais eficientes e proativas. Desenvolvimentos recentes incluem principalmente métodos baseados em IAG para previsão da Vida Útil Restante.
- **Reciclagem e Remanufatura:** A IAG pode projetar produtos considerando o fim de vida útil, facilitando a desmontagem e a recuperação de materiais. Pesquisas avançam na desmontagem colaborativa humano-robô e estratégias adaptativas de reprogramação para remanufatura de peças.

Os sistemas PLM reúnem essas aplicações dentro de um ambiente unificado, o que permite o gerenciamento holístico de todos os aspectos associados com amplo gerenciamento do desenvolvimento e do ciclo de vida de produtos (Duda; Oleszek; Santarek, 2024).

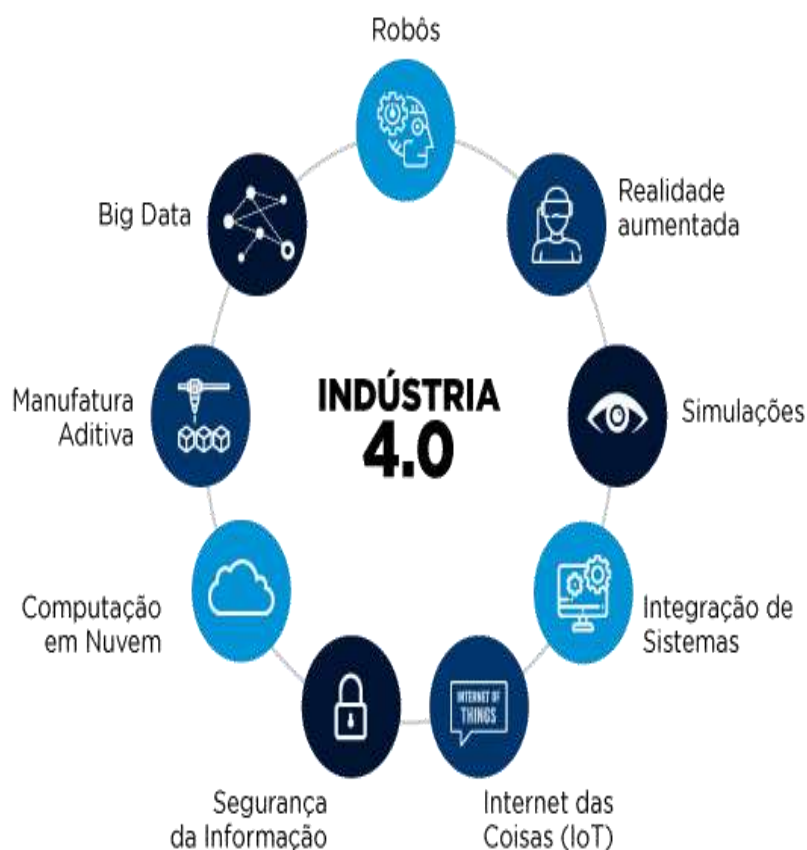
A indústria da construção civil é ainda lenta e atrasada, mas já passa por transformações e inserção de ferramentas digitais e pode se beneficiar da adoção de práticas inspiradas na indústria de manufatura, como o PLM. Porém, a integração direta de soluções PLM na construção não é ideal, pois são adaptadas a contextos industriais específicos. Assim, a busca por uma construção mais industrializada, eficiente e colaborativa apresenta-se como opção para essa evolução (Blampain *et al.*, 2022).

2.3 Indústria 4.0

Segundo Lima e Gomes (2020), além do termo Indústria 4.0 (*Industry 4.0*), são empregados também como termos correlatos: Quarta Revolução Industrial (*Fourth Industrial Revolution*), Manufatura Avançada (*Advanced Manufacturing*), Indústria Integrada (*Integrated Industry*), Indústria Inteligente (*Smart Industry*), ou ainda Manufatura Inteligente (*Smart Manufacturing*) e todas remetem a novas tecnologias, como ilustra a Figura 13, muitas ainda em desenvolvimento, que permitem maior produtividade, maior interligação entre as áreas de produção e que, por vezes, podem gerar novos produtos e serviços.

A Indústria 4.0 e suas tecnologias digitais são basicamente determinadas pela conectividade e inteligência. Em robótica avançada, máquinas e equipamentos são capazes de se adaptarem às atividades programadas, uma vez que são controladas por inteligência artificial em conexão remota e comunicação integrada. A manufatura aditiva permite que, através da digitalização de modelos, seja feita a impressão de produtos diversos, possibilitando a criação de bens com formas geométricas diversas e eliminando desperdícios próprios dos processos produtivos tradicionais, além de possibilitar a flexibilização da linha de produção e a customização em massa. Enfim, automação e diminuição de falhas na produção características desses sistemas levam ao aumento da produtividade (CNI, 2017).

Figura 13 – Componentes da Indústria 4.0



Fonte: Google Imagens

No conjunto digital, os sensores são dispositivos que captam e registram informações a partir de estímulos (como movimentos e luminosidade), podendo ativar outras ações do sistema integrado com base nesses estímulos. Além de capturar informações, os sensores podem transmitir os dados coletados via IoT para serem armazenados e tratados na central composta pela tecnologia *Big Data*, interligada à computação em nuvem. Em linhas gerais, *Big Data* é uma infraestrutura de armazenamento de dados bastante superior quanto à capacidade e desempenho se comparado aos métodos tradicionais. As informações são transmitidas via IoT, que permitem a conexão de equipamentos à internet e, dessa maneira, viabiliza a troca de dados entre equipamentos, sistemas, sendo que é a principal base da Indústria 4.0, por permitir a interação entre sistemas, objetos, plataformas e aplicativos, fazendo com que esses possam trabalhar em conjunto com objetivos em comum (CNI, 2017; FIRJAN, 2016)

Em combinação com a robótica avançada, o conjunto de soluções acima permite a interligação entre componentes físicos e virtuais que geram os CPS. Esses sistemas, além da

capacidade de captar e trocar informações, aumentam o retorno do “chão de fábrica” e a eficiência da produção, possibilitando uma maior capacidade de criação e aperfeiçoamento dos bens e do processo de produção. Há também uma expansão da capacidade logística, posto que os dados de produção, distribuição e vendas estão disponíveis em tempo real. Além disso, com o maior controle do que é produzido e vendido, é ampliada também a capacidade de acompanhamento pós-venda (Lima; Gomes, 2020).

Os CPS são sistemas capazes de integrar o ambiente físico com infraestruturas de computação e comunicação automatizada, ou seja, é um ambiente virtual capaz de gerar respostas automáticas a partir do monitoramento virtual do processo real. Eles são compostos por subsistemas que controlam sensores e atuadores, tecnologias de identificação, mecanismos de armazenamento e análises dos dados (FIRJAN, 2016).

Correa (2018) propõe uma estrutura para CPS na construção civil, que são baseados em modelos virtuais de processos de construção, implementados via Redes de Petri, e conectados tanto aos modelos BIM (*Building Information Modelling* – Modelagem da Informação da Construção) quanto ao *hardware* no local, via sensores e atuadores, para acompanhamento do andamento da obra em tempo real, sem necessidade de medição por humanos, e integração de informações BIM.

Grande montante de dados (*BigData*) computação em nuvem (*cloud computing*) e internet das coisas (*Internet of Things - IoT*) são tecnologias que permitem a captura e armazenamento de dados para serem utilizados em simulações, interpretação com inteligência artificial (IA) e a integração dos sistemas. Entre os resultados dessas interações, estão a impressão 3D ou manufatura aditiva, a atuação de máquinas e sistemas autônomos e uma maior integração nas ações entre humanos e máquinas. A realidade aumentada permite a imersão do mundo virtual no mundo real, oferecendo maiores possibilidades de estudos de previsibilidade. Todos esses sistemas digitais devem estar protegidos pela segurança da informação (*blockchain*), desenvolvida de modo a evitar perdas de informações por meio de ataques terroristas, por exemplo (Lima; Gomes, 2020).

Pesquisas atuais utilizam agente de IA generativa (IAG) para planejamento de processos

de estruturas compósitas com fibras. Empresas como a Siemens, por exemplo, líder global em manufatura industrial, utiliza a IAG para otimizar o planejamento da produção, aumentando a produtividade e reduzindo custos em suas operações. Para controle e otimização de processos, vários estudos utilizaram abordagens baseadas em IAG, como a modelagem de comportamentos dinâmicos de soldagem robótica inteligente, a combinação de memória de longo prazo com IAG para prever a morfologia de tanque de fusão, além do uso dessas ferramentas para a classificação e geração de tanques de fusão em tempo real em fusão a laser em camada de pó (*Laser Powder Bed Fusion*) (Leng *et al.*, 2026).

Derivado da Indústria 4.0, surge o novo conceito de Construção 4.0, resultado de recentes avanços tecnológicos que permitiram que a indústria da construção alcançasse um rápido crescimento e maiores lucros. Mas como o conceito de Construção 4.0 é muito novo, não há ainda uma definição e escopo de aplicação muito claros, mas pode ser considerada como uma estrutura que inclui o uso extensivo de BIM para projeto e construção, a produção industrial de componentes e módulos pré-fabricados, o uso de sistemas físico cibernéticos sempre que possível, inclusive na área de robótica, monitoramento digital da cadeia de suprimentos e do trabalho em canteiros de obras, e análise de dados, como *Big Data*, IA, computação em nuvem e *blockchain* (Chen *et al.*, 2022).

Porém, a indústria da construção, apesar de estar mudando seus processos e métodos de trabalho para atender aos requisitos de sustentabilidade no contexto de uma cidade inteligente (por exemplo, economia de energia, redução de resíduos, garantia de uma construção de qualidade e um ambiente interno inteligente), a construção ainda é considerada uma indústria tradicional, relutante em usar novas tecnologias e ineficiente, com muito a desenvolver (Chen *et al.*, 2022).

2.3.1 Redes Neurais

As redes neurais artificiais, ou simplesmente redes neurais (RNs), são modelos computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano, compostos por unidades chamadas de neurônios artificiais, organizados em camadas sequenciais que processam

informações de maneira interconectada. Cada neurônio recebe sinais de entrada, executa operações matemáticas aplicando pesos específicos e, através de funções de ativação, transmite o resultado adiante até produzir uma saída, formando uma rede de processamento paralelo e distribuído capaz de aprender e generalizar padrões complexos a partir de dados, que pode ser utilizada para tarefas como classificação, regressão e reconhecimento de padrões (Arbabi *et al.*, 2022; LeCun; Bengio; Hinton, 2015).

Uma RN típica é formada por três tipos de camadas: a camada de entrada, a camada oculta e a camada de saída. A camada de entrada é responsável por receber os dados brutos do problema a ser resolvido. Cada neurônio de entrada representa uma variável ou característica dos dados e transmite essas informações para a próxima camada sem processamento adicional. A quantidade de neurônios nesta camada corresponde, em geral, ao número de variáveis independentes ou características do conjunto de dados utilizado (LeCun; Bengio; Hinton, 2015)

A camada oculta é o núcleo do processamento em uma RN, sendo composta por neurônios artificiais que recebem os sinais dos neurônios da camada de entrada, aplicam pesos sinápticos ajustáveis e funções de ativação não lineares, e transmitem os resultados para a camada seguinte, que pode ser outra camada oculta ou a camada de saída de dados (LeCun; Bengio; Hinton, 2015).

A definição da quantidade de neurônios numa camada oculta e do número de camadas ocultas não segue uma regra fixa universal: frequentemente, são definidos com base em experimentação, conhecimento prévio do domínio do problema e validação empírica. Em problemas simples, uma única camada oculta pode ser suficiente, enquanto tarefas mais complexas podem exigir múltiplas camadas e maior quantidade de neurônios, de modo a capturar abstrações e padrões de maior complexidade (Ersavas; Smith; Mattick, 2024; LeCun; Bengio; Hinton, 2015).

A escolha do número de nós ocultos pode considerar fatores como: a dimensionalidade das entradas, o grau de não linearidade esperado, o número de variáveis de saída e o risco de sobreajuste. Não existe uma relação direta e obrigatória com o número de entradas ou incógnitas, mas recomenda-se evitar tanto uma quantidade insuficiente (que leva a subajuste)

quanto excessiva (que pode causar sobreajuste). Métodos de regularização e técnicas como validação cruzada são geralmente empregados para ajustar esses parâmetros e garantir a melhor capacidade de generalização da rede (Müller; Kornblith; Hinton, 2019).

O processamento das informações nas camadas ocultas possibilita à rede a construção de representações internas dos dados, identificando padrões não lineares, combinações complexas de variáveis e regularidades não evidentes na entrada. Esse princípio é a base do sucesso das RNs em aplicações como reconhecimento de padrões, previsão de séries temporais, processamento de linguagem natural e análise de grandes volumes de dados heterogêneos. Arquiteturas modernas, como as Redes Neurais Convolucionais (*Convolutional Neural Networks* – CNNs), mostraram que a escolha adequada da topologia, das funções de ativação e do número de camadas ocultas permite não apenas reconhecimento eficiente de imagens, mas também o tratamento de bases de dados com alta dimensionalidade, inclusive em áreas além da visão computacional (Ersavas; Smith; Mattick, 2024).

Durante o treinamento do algoritmo, os pesos sinápticos de todas as conexões entre neurônios são ajustados iterativamente para minimizar o erro entre a saída prevista e a saída real desejada. O algoritmo de retropropagação (*backpropagation*) é amplamente utilizado para essa finalidade, propagando o erro de saída para trás, pela rede, e ajustando os pesos por gradiente descendente ou métodos derivados. Estratégias como a suavização de rótulos (*label smoothing*), que se trata de uma técnica computacional para reduzir o excesso de confiabilidade ao longo do aprendizado de máquina, também podem ser incorporadas para melhorar a estabilidade e generalização (Müller; Kornblith; Hinton, 2019).

A robustez das RNs, especialmente em aplicações críticas, depende também de sua estabilidade matemática e do controle de propriedades como dissipatividade e resposta a atrasos temporais, asseguradas por métodos de análise baseados em funcionais de *Lyapunov*² e outras ferramentas matemáticas avançadas (Manivannan *et al.*, 2017). Assim, as RNs representam um

² Funcionais de *Lyapunov* é a generalização da função escalar de *Lyapunov*, que é usada para analisar a estabilidade de sistemas de equações diferenciais, que envolvem sistemas dinâmicos ou em que estão presentes variáveis contínuas e discretas. Aleksandr M. Lyapunov (1857-1918), matemático e astrônomo russo.

paradigma de modelagem universal, onde o número de neurônios e camadas ocultas é um parâmetro de ajuste fundamental, influenciado tanto pela natureza dos dados de entrada quanto pelos requisitos de generalização, estabilidade e robustez do sistema (LeCun; Bengio; Hinton, 2015; Wang *et al.*, 2018).

No contexto do desenvolvimento integrado de produtos, as RNs têm se mostrado ferramentas valiosas para otimizar processos de *design* e inovação. Por exemplo, elas podem ser empregadas na análise de grandes volumes de dados de clientes para identificar preferências e tendências, auxiliando na criação de produtos mais alinhados às necessidades do mercado. Além disso, as RNs podem ser utilizadas na simulação de condições operacionais, permitindo ajustes no projeto antes da produção física, o que contribui para a redução de custos e tempo de desenvolvimento (Arbabi *et al.*, 2022).

Outro uso relevante das RNs no desenvolvimento de produtos é sua aplicação na geração de protótipos baseados em dados preditivos. Por meio de modelos de aprendizado profundo (*deep learning*), as redes podem analisar padrões de consumo e preferências de projeto, auxiliando empresas a criar produtos mais personalizados e com maior aceitação no mercado. Essa abordagem não apenas melhora a experiência do usuário final, mas também aumenta a eficiência operacional, pois reduz a necessidade de iterações manuais no desenvolvimento (Gera; Kumar, 2023).

Além disso, as RNs são amplamente empregadas em sistemas de recomendação e otimização de produtos, especialmente no setor de manufatura. Por exemplo, podem ser usadas para identificar soluções ótimas de projeto com base em simulações virtuais, permitindo que os engenheiros ajustem parâmetros em tempo real para maximizar a funcionalidade e reduzir desperdícios. Estudos recentes mostram que essas tecnologias têm elevado o padrão de eficiência no setor industrial, criando produtos mais competitivos em menor espaço de tempo (Arbabi *et al.*, 2022).

Sendo assim, as RNs são ferramentas poderosas que, inspiradas no cérebro humano, têm evoluído significativamente nos últimos anos. Sua capacidade de aprender e modelar relações complexas as torna valiosas em diversas aplicações, incluindo o desenvolvimento integrado de

produtos, onde contribuem para inovações mais eficientes e alinhadas às necessidades do mercado. Por isso elas são uma das duas principais metodologias de desenvolvimento de *softwares* de IA, juntamente com os algoritmos genéticos (Arbabi *et al.*, 2022; Voskoglou, 2022).

2.4 Projeto de *Layout* de Instalações

O *layout* apresenta o resultado do processo de organizar os elementos físicos de uma empresa para maximizar a eficiência e a produtividade. A elaboração de *layout* envolve técnicas de trabalho, avaliação e o planejamento da distribuição de elementos em uma planta para melhorar a produção, a produtividade e reduzir custos e erros e, conseqüentemente, melhorar a eficiência e a competitividade da empresa. Esta é uma ferramenta importante para empresas de todos os tamanhos e setores (Quispe-Vasquez *et al.*, 2024).

De acordo com Quispe-Vasquez et al. (2024), uma boa distribuição de *layout* proporciona benefícios como:

- Melhora a comunicação entre os trabalhadores.
- Minimiza os atrasos na produção.
- Otimiza o espaço disponível.
- Melhora o controle de qualidade e a supervisão.
- Otimiza a produção na planta.
- Otimiza o fluxo de trabalho e os processos produtivos, melhorando e aumentando assim a eficiência e a produtividade da empresa.
- Contribui para a melhor utilização de recursos de uma planta.
- Pode diminuir os custos de transporte de materiais.

O estudo de Quispe-Vasquez et al. (2024), desenvolvido em uma empresa de recauchutagem de pneus, demonstra que uma distribuição deficiente pode causar problemas como gargalos de produção, espaços limitados e falta de flexibilidade, o que impacta negativamente na produção. Por outro lado, a implementação de um *layout* otimizado, como proposto através da simulação com o ProModel, demonstrou um aumento na produção e uma melhoria nos tempos. Os autores concluem que a distribuição da planta é uma tarefa significativa,

pois pode melhorar a taxa de produtividade e traz benefícios para a empresa, seus trabalhadores e seus clientes, permitindo estabelecer uma estrutura de custos menor que eleva sua competitividade.

Villar e Nóbrega Júnior (2014) consideram que atualmente uma boa distribuição de *layout* é aquela que consegue incorporar facilidades nas futuras mudanças, menores investimentos nas futuras expansões da indústria, permitindo ampliações mais suaves, sem crises de crescimento, e protegendo a instalação contra os males das soluções de emergência e os riscos das modificações impensadas.

Para Ardalani, Rankin e Lei (2025), o Projeto de *Layout* de Instalações (*Facility Layout Design* – FLD) tem importância estratégica em uma indústria, devido ao seu impacto na eficiência e produtividade dos sistemas de produção. Um *layout* de fábrica bem projetado deve estar alinhado com os objetivos estratégicos da organização.

Ao projetar um novo *layout* de manufatura, os autores destacam como objetivos críticos (Ardalani; Rankin; Lei, 2025):

- Fornecer espaço ideal para maximizar o armazenamento e o fluxo de tráfego, garantindo a segurança dos funcionários.
- Minimizar o volume de logística entre locais e reduzir a movimentação de pessoal, matérias-primas e equipamentos.
- Facilitar mudanças no processo de produção para acomodar novos produtos ou melhorias tecnológicas.
- Aumentar a capacidade de produção e a eficiência operacional geral.

Os autores mostram muitas pesquisas realizadas sobre FLD, a maioria das quais empregou estratégias e ferramentas para alocar espaço e zonas dentro do chão de fábrica. No desenvolvimento da sua pesquisa, empregaram uma metodologia para o desenvolvimento de *layout* que integra Simulação de Eventos Discretos (*Discrete Event Simulation* – DES), Mapeamento do Fluxo de Valor (*Value Stream Mapping* – VSM) e Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling* – BIM). A estrutura de trabalho proposto para o projeto de *layout* é baseada em simulação e planejamento de produção, com intercâmbio de

informações entre as diferentes aplicações (Ardalani; Rankin; Lei, 2025).

As etapas do Projeto da Linha de Produção propostas por Ardalani, Rankin e Lei (2025) são:

- 1) Configuração do *Layout*: Escolher dentre as configurações de *layout* a mais adequada para o volume de produção e a variedade de produtos que será fabricado.
- 2) Número de Estações de Trabalho: Determinar o número de estações de trabalho necessárias para executar as tarefas de produção com base na identificação das regiões de trabalho, no caminho mais longo e nos subcaminhos identificados no processo de produção. Esse novo conceito de planejamento da produção visa otimizar o processo produtivo, com o objetivo de integrar, organizar e regular as múltiplas atividades envolvidas nas etapas de produção do produto.

Na próxima etapa, com base nos gargalos identificados na fase anterior e nas novas máquinas e equipamentos que serão considerados para serem adicionados à nova instalação, quaisquer alterações associadas aos tempos de processamento das tarefas serão refletidas no plano de produção e um novo cronograma será estabelecido (Ardalani; Rankin; Lei, 2025).

- 3) Carga de Trabalho Balanceada e Alocação de Trabalhadores: Um atraso na conclusão de uma estação de trabalho causa um atraso na conclusão da estação de trabalho subsequente. Por outro lado, quando uma estação de trabalho é concluída antes do prazo, a equipe é colocada em espera até que a estação de trabalho seguinte fique vaga. Para equilibrar a linha de produção, o tempo de ciclo de produção de cada estação de trabalho deve ser um igual ao outro. A alocação de trabalhadores é feita considerando as habilidades e a carga de trabalho, de modo que consigam concluir todas as tarefas alocadas em tempo hábil, buscando o balanceamento entre as estações de trabalho.
- 4) Caso a empresa queira aumentar a capacidade de produção, deve-se expandir a força de trabalho. Porém, um número limitado de trabalhadores adicionais pode ser atribuído a cada estação de trabalho, caso contrário, muitos trabalhadores podem levar a congestionamentos e conflitos.

Segundo os autores, as próximas etapas para elaboração do Projeto de *Layout* são (Ardalani; Rankin; Lei, 2025):

- Projeto de *Layout* do Estoque: São levantados os insumos necessários, quantidades e posição de alocação de forma a garantir o abastecimento necessário para a produção e minimizar os fluxos de transporte.
- Locação de Máquinas e Equipamentos: São analisados os equipamentos em termos de custo e produtividade, assim como sua posição em planta, de forma a alcançar a melhor eficiência no processo em termos de produtividade e redução de tempos de transporte.
- Análise do Sistema de Produção: A partir do modelo de simulação do *layout* proposto, é avaliada a eficiência da instalação por meio de suas medidas de desempenho.
- Propostas de Melhorias: A partir da análise e identificação de problemas, incorporar alterações que visem resolvê-los, de forma a garantir um fluxo de produção contínuo e otimização do espaço de armazenamento. Assim, são elaborados outros cenários com relação à sequência de produção, linha de produção adicional e variações do produto para avaliar os possíveis efeitos dessas mudanças no sistema. E nova análise é feita para os novos cenários.

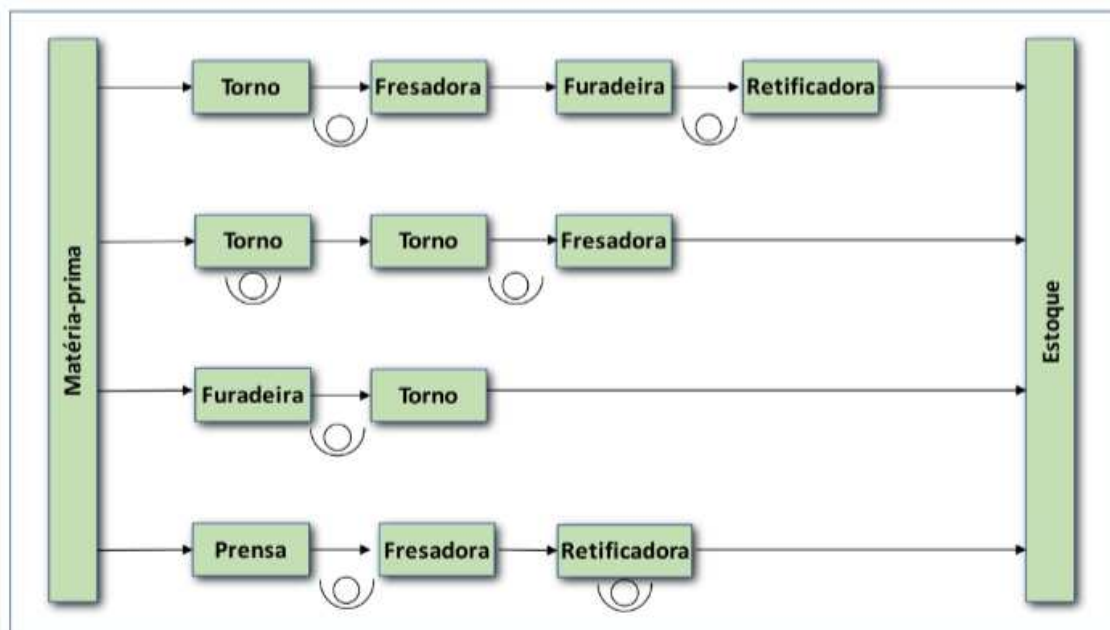
Como resultado da pesquisa dos autores, feita por meio de um estudo de caso de *layout* já existente, foi identificado no novo sistema de produção, através da simulação, um aumento na produção mensal de 41,1% e uma diminuição no volume de logística de 31%. O novo plano de *layout* foi configurado para máxima flexibilidade, permitindo a produção de uma variedade maior de produtos. Eles concluíram ainda que quanto mais próximo forem os tempos de produção das estações de trabalho da mesma linha de produção, maior será sua produtividade (Ardalani; Rankin; Lei, 2025).

Dentre os tipos de configuração de *layout*, a literatura apresenta os tipos a seguir. A escolha do tipo de *layout* é feita considerando o tipo de processo produtivo para o qual se destina: contínuo, repetitivo em massa, repetitivo em lotes e por projeto (Pansonato, 2020; Silvestri *et al.*, 2025; Villar; Nóbrega Júnior, 2014).

- *Layout* Linear ou Por Produto (*Flow Shop*): Adequado para processos contínuos e

processos repetitivos em massa. Nestes processos, há produção de bens e serviços com uniformidade ou produtos padronizados em grande escala. A disposição física das máquinas e equipamentos obedece, em certa medida, o fluxo do processo produtivo, como na Figura 14. Caracteriza-se por pouca flexibilidade e grandes investimentos em equipamentos e instalações.

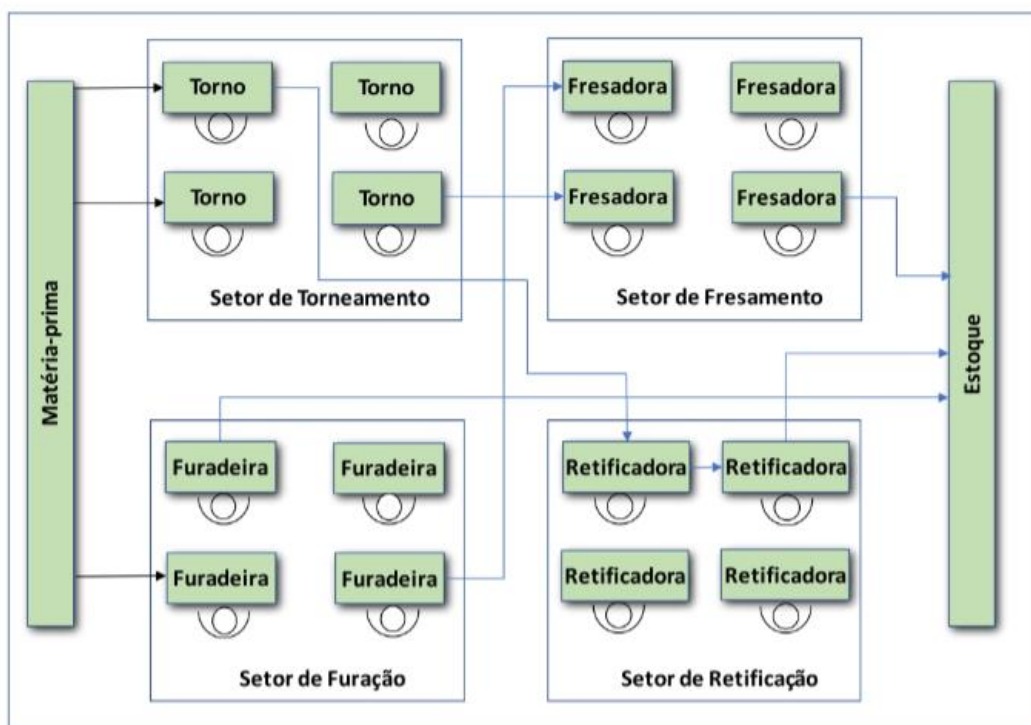
Figura 14 – Exemplo esquemático de *Layout* por Produto



Fonte: Pansonato (2020)

- **Layout Funcional ou Por Processo (*Job Shop*):** Empregado para processos repetitivos em lotes. Nestes processos, produz-se um volume médio de bens ou serviços padronizados em lotes, e cada lote segue uma sequência de operações diferenciada. O sistema produtivo é flexível, empregando equipamentos universais e mão de obra polivalente para atender a diferentes pedidos e flutuações da demanda. Máquinas e equipamentos que realizam operações semelhantes localizam-se em um mesmo espaço físico (departamento), como na Figura 15.

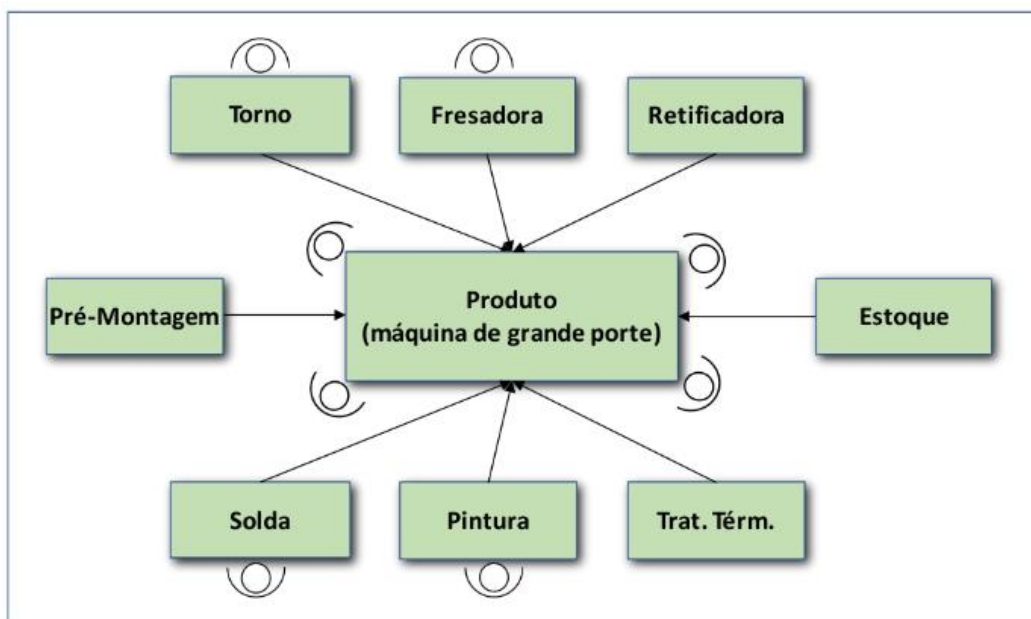
Figura 15 – Exemplo esquemático de *Layout Funcional*



Fonte: Pansonato (2020)

- **Layout Posicional ou Fixo (*Project Shop*):** Característico de processos por projeto. O produto permanece em uma posição fixa, e um grupo de operários e equipamentos se desloca ao redor dele para realizar as atividades de produção, como na Figura 16. É considerado adequado para produtos de grande peso e/ou volume, como um edifício.

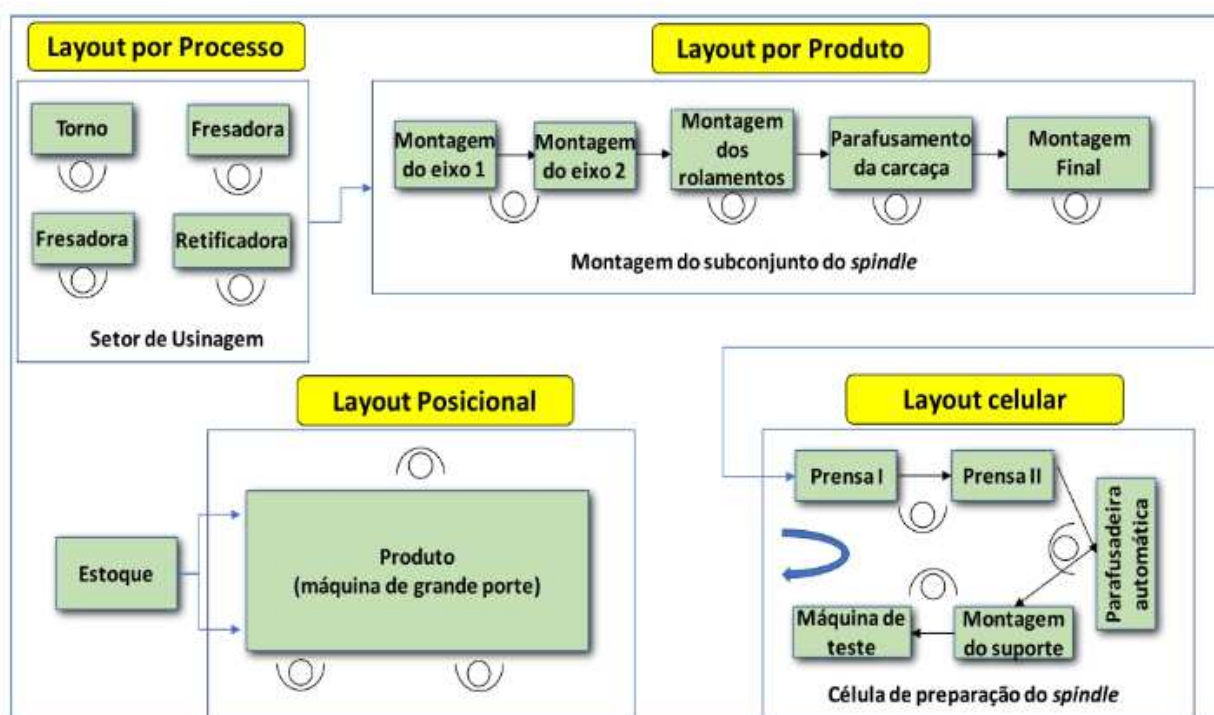
Figura 16 – Exemplo esquemático de *Layout Posicional*



Fonte: Pansonato (2020)

finalidade atender às diferentes demandas de produtos com características variadas de volume e roteiros de fabricação, ao mesmo tempo em que se busca a otimização do fluxo de materiais, a redução dos deslocamentos internos e a melhoria da flexibilidade operacional. Esse tipo de *layout* é frequentemente empregado em ambientes produtivos que exigem adaptabilidade elevada e é fundamentado no uso de técnicas de agrupamento de máquinas, tecnologias de grupo e modelos matemáticos ou heurísticos de otimização para o planejamento modular das áreas produtivas.

Figura 18 – Exemplo esquemático de *Layout* Híbrido com quatro tipos de *Layout*



Fonte: Pansonato (2020)

Villar e Nóbrega Júnior (2014) também mencionam formas básicas de fluxo que servem como orientação para o projetista, como em linha reta, em U, em S e quebrado ou misto. Estes descrevem o percurso do material dentro de um determinado tipo de arranjo físico, mas são distintos dos tipos estruturais de *layout* (Linear, Funcional, Posicional, Celular).

2.5 Fábrica Virtual

A crescente competitividade, novas regulamentações e demandas por mudanças e inovação fazem com que as empresas de manufatura precisem se adaptar a esse novo ambiente, reformulando simultaneamente seus modelos de produtos, processos e sistemas, bem como metas e estratégias para permanecerem competitivas. No entanto, a complexidade cada

vez maior e os ciclos de vida cada vez mais curtos de produtos, processos e sistemas desafiam as abordagens convencionais da organização de manufatura para analisar e formalizar modelos e processos, bem como gerenciamento, manutenção e simulação de ciclos de vida de produtos e sistemas. Destaca-se ainda a importância de soluções que considerem essa complexidade de forma integrada, indo além de abordagens focadas em tecnologias isoladas (Souza; Sacco; Porto, 2006; Yildiz; Møller; Bilberg, 2021, 2022).

Surge então na década de 1980 a Fábrica Virtual (*Virtual Factory* – VF) ou Manufatura Virtual (*Virtual Manufacturing*) como uma estratégia revolucionária para otimizar e agilizar todo o ciclo de vida da produção de produtos e serviços, também intimamente ligada ao desenvolvimento de tecnologias digitais avançadas e à evolução da manufatura ao longo das últimas décadas (Yildiz; Møller; Bilberg, 2021).

A introdução da Indústria 4.0 trouxe ainda outras tecnologias digitais integradas, incluindo Internet das Coisas (IoT), Blockchain e Gêmeos Digitais (*Digital Twins* – DT), além da Fábrica Inteligente (*Smart Factory*) ou Manufatura Inteligente (*Smart Manufacturing*) e da Inteligência Artificial (IA), com capacidade preditiva usando dados em tempo real (Yildiz; Møller; Bilberg, 2021).

Fábrica Inteligente é um sistema multiagente auto-organizado assistido com retorno de dados, uma planta de manufatura que pode fornecer organização dinâmica, usando linhas de produção sensíveis ao contexto e responsivas ao ser humano, mantendo máquinas inteligentes conectadas, repositório central de dados (*data warehouses*), *big data* e tecnologias de sensoriamento integradas. A Fábrica Inteligente é a implementação prática da VF (Yildiz; Møller, 2021).

A VF é um conceito que envolve a criação de um ambiente digital integrado, utilizando tecnologias avançadas como Modelagem e Simulação 3D, Realidade Virtual (RV), Realidade Aumentada (RA) e Gêmeos Digitais (DT). Esse ambiente permite a criação de protótipos virtuais manipuláveis em tempo real, verificação de interferências entre peças, simulação e otimização de processos de manufatura e montagem, análise de desempenho da fábrica e avaliação de mudanças em processos, proporcionando uma representação digital detalhada do sistema de

produção antes da implementação física. Essa abordagem inovadora fornece uma capacidade avançada de suporte à decisão e permite às empresas otimizar seus processos, reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos. Além disso, facilita o treinamento e a reconfiguração de sistemas de produção, criando um ambiente de produção simulado altamente eficiente (Souza; Sacco; Porto, 2006; Yildiz; Møller; Bilberg, 2021, 2022).

A literatura mostra a VF como possível solução para integrar os ciclos de vida do produto, do processo e da fábrica para que as empresas sejam capazes de se adaptar às demandas e tecnologias em constante mudança em tempo real (Yildiz; Møller, 2021).

A VF também é considerada uma plataforma de Modelagem e Simulação (M&S) empresarial adaptável, para projetar e desenvolver novas competências.

Nesta pesquisa foi empregado o *software FlexSim Simulation Tool*. Estudos demonstram que, em relação à modelagem 2D, o 3D oferece melhor desempenho geral no desenvolvimento de modelos, além de permitir verificação, validação, experimentação e análise dos resultados em um tempo menor, apesar de aumentar o tempo de desenvolvimento do modelo. As ferramentas de simulação apresentam capacidades significativas para integrar os dados em toda a cadeia de valor da manufatura. A integração de dados em tempo real entre simulações de VF habilitadas para RV são consideradas modelos com maior precisão, exatidão e confiabilidade (Yildiz; Møller, 2021).

O *FlexSim®* é um software de simulação 3D que tem recursos visuais abrangentes e de arrastar e soltar fáceis de usar, considerados valiosos para experimentação rápida. O recurso de RV incorporado do *FlexSim®* permite que os usuários modelem, executem e manipulem as simulações e coletem os dados estatísticos em um ambiente de RV gráfico 3D. Esse recurso traz vantagens significativas na redução do tempo de validação após cada reconfiguração/*redesign* da VF. No entanto, a sintaxe única da ferramenta torna desafiador o desenvolvimento de modelos personalizados (Yildiz; Møller, 2021).

A M&S pode ser considerada uma base para projeto e desenvolvimento devido às suas capacidades de integração de dados, análise de dados, geração de dados e projeto baseado em modelos. A engenharia de sistema de manufatura de desenvolvimento de projeto e produtos,

em particular as atividades de prototipagem virtual, podem ser suportadas pelas ferramentas de VF. A VF também pode ser usada para simulação *in-situ* de produção para dar suporte a operações em tempo real, produção e planejamento de manutenção (Yildiz; Møller, 2021).

A VF pode ser usada também para treinamento por simulação da produção, acelerando a curva de aprendizado, que pode ser apresentada pelo *software* em tempo real. A execução do treinamento de RV como parte do VF permite não apenas um ambiente de treinamento realista, mas também uma melhor previsão do desempenho do operador para o planejamento da produção. Os usuários também têm a chance de observar e entender o efeito de seu desempenho em todo o sistema de manufatura. O ambiente de VF permite que os usuários coordenem suas tarefas, com base em operações relacionadas no chão de fábrica (Yildiz; Møller, 2021).

A integração bidirecional de dados entre sistemas de execução e engenharia, como PLM, Planejamento de Recursos Empresariais (*Enterprise Resource Planning* – ERP) e Sistema de Execução de Fabricação (*Manufacturing Execution System* – MES) demonstrou a criação, relação e manipulação da VF em modelos virtuais abrangentes, bem como o controle dos sistemas atuais por simulações das ferramentas de VF. Assim, a VF permitiu a facilitação dos Sistemas Cyber-Físicos (*Cyber-Physical Systems* – CPS). Além disso, o conceito VF favorece ambientes virtuais estendidos integrando vários níveis e resoluções de simulações que facilitam o alinhamento entre domínios de produto, processo e sistema. Junto com recursos colaborativos de RV, a integração de vários modelos, recursos, capacidades e processos podem fornecer capacidade de coordenação incorporada e, portanto, Engenharia Simultânea (Concurrent Engineering – CE) (Yildiz; Møller; Bilberg, 2022).

A VF pode também ser empregada para estudos de *layout* e simulação de planejamento logístico (Feng; Gao, 2019; Jefroy; Azarian; Yu, 2024). Uma pesquisa, utilizando o *software Tecnomatix Plant Simulation*, procurou otimizar o transporte de estruturas de plantio em um parque industrial agrícola, analisando diferentes soluções logísticas e seus respectivos requisitos, considerando variáveis como tamanho, peso e quantidade. A pesquisa utilizou análise de materiais e simulações virtuais para melhorar o processo logístico da fábrica. O objetivo final

foi aprimorar a eficiência da produção na fábrica automatizada e a virtualização favoreceu a escolha do melhor cenário antes de sua aplicação real, possibilitando a redução de perdas e otimização do processo (Feng; Gao, 2019).

Ainda em relação ao planejamento logístico, a VF favorece (Jefroy; Azarian; Yu, 2024):

- **Visualização e Interatividade:** A simulação gráfica permite visualizar o *layout* da fábrica e os fluxos de materiais em tempo real, facilitando a identificação de gargalos e áreas de melhoria.
- **Flexibilidade e Reconfiguração:** A VF permite testar diferentes configurações de *layout* e sistemas de manuseio de materiais, ajudando a encontrar soluções mais flexíveis e adaptáveis às mudanças na demanda e no *design* do produto.
- **Identificação de Colisões e Pontos Inalcançáveis:** A simulação permite monitorar os movimentos dos robôs e detectar possíveis colisões ou pontos inalcançáveis, garantindo um *design* mais eficiente e seguro.
- **Otimização do Fluxo de Materiais:** A VF pode simular diferentes cenários de fluxo de materiais, ajudando a minimizar o tempo e os custos de transporte interno, além de melhorar a eficiência do sistema de manuseio de materiais.
- **Interação Humana:** A simulação considera a interação dos trabalhadores com o ambiente de produção, permitindo avaliar a ergonomia, a segurança e a eficiência das operações manuais.

Essas capacidades permitem que as empresas tomem decisões com mais informações e mais eficazes sobre o *layout* e a logística de suas instalações, resultando em melhorias significativas na produtividade e na redução de custos (Jefroy; Azarian; Yu, 2024).

No entanto, pesquisas existentes ainda destacam a necessidade de protocolos padronizados para melhorar a interoperabilidade de dados entre os diferentes sistemas (Souza; Sacco; Porto, 2006) e entre as tecnologias de manufatura digital (More; Buktar, 2024). Um estudo, usando dados de uma fábrica de manufatura, conecta a manufatura digital com modelos computacionais avançados para otimizar produtividade, qualidade, tempo e utilização de recursos. Ele identifica parâmetros-chave, incluindo disponibilidade da máquina, horas de

produção, velocidade do transportador, contagem de carrinhos, peças produzidas, acabamento de superfície, tempo de inatividade e taxa de descarte, e investiga mudanças de *layout* para melhorar esses parâmetros. Os *softwares* Tecnomatix Plant Simulation e Delmia V5 foram empregados para analisar quatro projetos de linha de produção, alcançando melhorias substanciais. A confiabilidade do estudo é confirmada pela Metodologia de Superfície de Resposta (More; Buktar, 2024).

Melhorias adicionais nas ferramentas de simulação através da implementação de algoritmos de IA podem abrir novos horizontes para organizações em aprendizado, eficiência e otimização para cenários altamente complexos. Portanto, novas melhorias no conceito VF como incorporar inteligência artificial, aprendizado de máquina ou algoritmos de otimização mais abrangentes para suportar decisões gerenciais devem ser exploradas em novas pesquisas (Yildiz; Møller; Bilberg, 2022).

2.5.1 Modelo Conceitual

Na fase inicial de um projeto de simulação, pode-se observar uma primeira modelagem a ser realizada, ainda na fase de concepção. Dá-se a esta modelagem o nome de modelo conceitual. Nessa etapa, o modelo que está na mente do analista (modelo abstrato) deve ser representado de acordo com alguma técnica de representação, a fim de torná-lo um modelo conceitual, de modo que possa ser compreendido (Montevecchi *et al.*, 2010).

O modelo conceitual é uma descrição do modelo que se deseja construir, independente do *software* de simulação que se utilizará e pode orientar a etapa de coleta de dados, de forma a definir os pontos de coleta, além de agilizar o processo de elaboração do modelo computacional. Ele exige do modelador a seleção prévia de uma técnica de modelagem e não há um único método que possa modelar completamente um sistema complexo de manufatura (Montevecchi *et al.*, 2010).

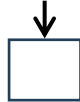
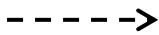
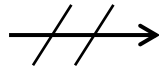
Neste contexto, Montevecchi *et al.* (2010) propuseram uma técnica de modelagem de processo que fornece suporte ao projeto de simulação, de forma a facilitar o trabalho encontrado na fase de modelagem computacional, reduzindo o tempo gasto, chamada de IDEF-SIM

(*Integrated Definition Methods – Simulation*). A construção da lógica de modelagem conceitual, focando projetos de simulação, foi desenvolvida a partir das técnicas de modelagem consagradas (IDEF0 e IDEF3), adaptadas às necessidades encontradas em projetos de simulação, além do símbolo de fluxograma. Regras envolvendo a movimentação, o uso de recursos e controles, além das transformações de entidades, possibilitam ao modelador construir um modelo conceitual mais próximo das exigências de um modelo computacional. Desta forma, diminuiu-se a distância entre a modelagem clássica de processos e a modelagem conceitual com foco na simulação (Montevecchi *et al.*, 2010). A técnica foi empregada e validada por diversas pesquisas subsequentes (Lopes; Lima; Leal, 2020; Oliveira *et al.*, 2025). A Figura 19 apresenta a simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM.

Segue descrição detalhada da função de cada elemento apresentado (Montevecchi *et al.*, 2010):

- a) Entidade: são os itens a serem processados pelo sistema, representando matéria prima, produtos, pessoas, documentos, entre outros. Elas podem ser agrupadas ou divididas ao longo do processo produtivo e são movimentadas por meios próprios ou por meio de recursos. Uma vez representada, o símbolo somente aparecerá quando uma nova entidade for criada. Desta forma, torna-se claro o número de entidades a serem utilizadas e em que pontos do modelo a entidade sofrerá uma transformação.
- b) Funções: representam os locais onde a entidade sofrerá alguma ação. Entende-se como funções: postos de trabalho, esteiras de movimentação, filas e estoques, postos de atendimento. Estas funções podem modificar uma entidade, como no caso de postos de trabalho, ou mesmo alterar o ritmo de tempo desta entidade no fluxo, como uma espera (fila, estoque).
- c) Fluxo da entidade: direcionamento da entidade dentro do modelo, caracterizando os momentos de entrada e saída da entidade nas funções.
- d) Recursos: representam elementos utilizados para movimentar as entidades e executar funções. Os recursos podem representar pessoas ou equipamentos. Em um sistema pode haver recursos estáticos ou dinâmicos. Os recursos estáticos não são dotados de movimento. Os recursos dinâmicos, por sua vez, podem se mover sobre um caminho definido.

Figura 19 – Simbologia utilizada na técnica proposta IDEF-SIM

Elemento	Símbolo	Descrição
Entidade		Entidade que entra no sistema
Funções		Locais onde a entidade irá sofrer transformações
Fluxo de entidade		Entrada e saída da entidade dos locais de processamento
Recursos		Elementos que executam funções e/ou movimentam as entidades
Controles		Regras utilizadas nas funções, como regra de filas
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos		Regra E: Representa que dois caminhos podem ser executados em conjunto
		Regra OU: A partir desta função os caminhos são alternativos
		Regra E/OU: Permitido ambas as regras explicitadas acima
Movimentação		Deslocamento da entidade no modelo
Informação explicativa		Informações explicativas para facilitar a compreensão do modelo
Fluxo de entrada no sistema modelado		Entrada ou criação de uma nova entidade no sistema
Ponto final do sistema		Final do modelo
Conexão com outra figura		É utilizado para conectar um modelo particionado em várias figuras

Fonte: Adaptado de Montevechi et al. (2010, p. 1629)

- e) Controles: regras utilizadas nas funções, como sequenciamento, regras de filas, programações, entre outros.
- f) Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos: Dois ou mais caminhos, após uma função, podem ser executados juntos (junção E), ou de forma alternativa (junção OU), ou permitindo ambas as regras (junção E/OU).
- g) Movimentação: representa um deslocamento de entidade, no qual o modelador acredita possuir efeito importante sobre o modelo. Ao representar este elemento, espera-se encontrar no modelo computacional uma programação específica para este movimento, como tempo gasto e recurso utilizado.
- h) Informação explicativa: utilizado para inserir no modelo uma explicação, com o objetivo de facilitar o entendimento do modelo.
- i) Fluxo de entrada no sistema modelado: define a entrada ou criação das entidades dentro do modelo.
- j) Ponto final do sistema: defini o final de um caminho dentro do fluxo modelado.
- k) Conexão com outra figura: utilizado para dividir o modelo em figuras diferentes.

2.6 Materiais Compósitos

Um material compósito é formado pela combinação de dois ou mais materiais para fornecer uma combinação única de propriedades. Esta definição é mais geral e pode incluir ligas de metais, copolímeros de plástico, minerais e madeira. Os compósitos reforçados com fibra diferem dos materiais citados, pois seus materiais constituintes são diferentes no nível molecular e são mecanicamente separáveis. Combinados, os materiais constituintes trabalham juntos, mas permanecem em suas formas originais (Mazumdar, 2002).

O conceito de compósitos não foi inventado, mas mimetizado ao longo da história, pelos seres humanos, é encontrado na natureza. Um exemplo é a madeira, que é um compósito de fibras de celulose em uma matriz de cola natural chamada lignina. A concha de invertebrados, como caracóis e ostras, é mais forte e resistente que os compósitos avançados feitos pelo homem. As fibras retiradas da teia de uma aranha são mais fortes que as fibras sintéticas. Na

Índia, Grécia e outros países, há milênios tais povos já usavam fibras e outros materiais para processar diversos utensílios e materiais, para melhorar as propriedades resistentes de um deles, fosse com partículas ou fibras (Mazumdar, 2002).

Os compósitos feitos com uma matriz polimérica tornaram-se mais comuns e são amplamente utilizados em vários setores, e podem ser resinas termofixas ou termoplásticas (Mazumdar, 2002).

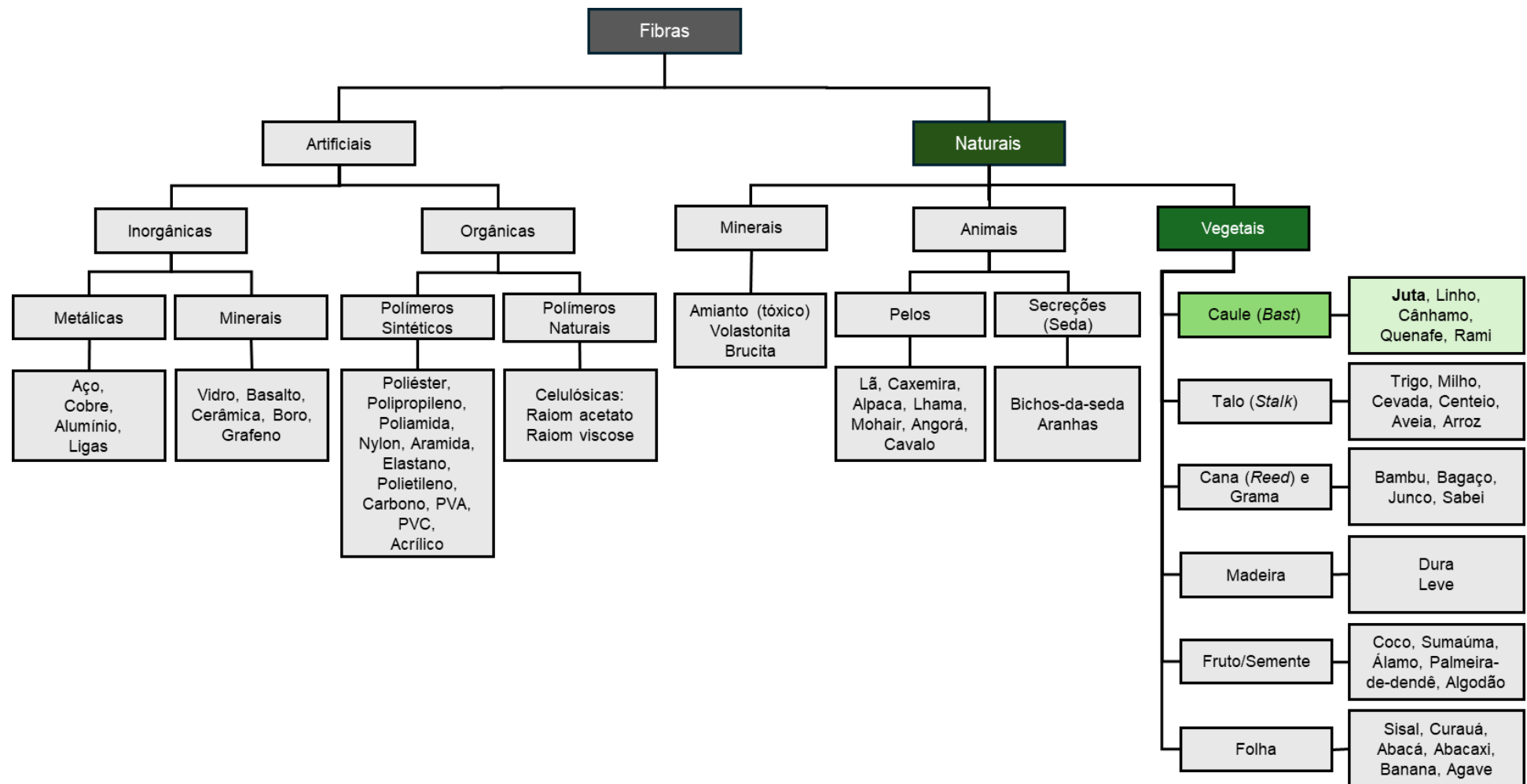
A seguir são apresentados materiais compósitos de polímero termofixo reforçado por fibras, dando ênfase ao processo de fabricação de produto empregando esse tipo de material, em especial o compósito de bioepóxi reforçado por fibras de juta no formato de tecido pré-impregnado, denominado prepreg, material este utilizado na produção dos painéis modulares de vedação vertical da presente pesquisa.

2.6.1 Fibras

As fibras são materiais têxteis fibrosos que podem ser processados em tecidos. Elas têm a característica comum de serem longas em relação à sua seção transversal e suficientemente fortes e flexíveis. Somente as fibras podem ser processadas em um fio. No entanto, também há fibras mais curtas e grossas das quais, por exemplo, podem ser produzidos não-tecidos (que não são feitos por tecelagem e não requerem a conversão das fibras em fio) ou cerdas (Veit, 2023).

Existem inúmeros tipos de fibras das quais são produzidos comercialmente fios e tecidos industriais e de vestuário (Thapliyal *et al.*, 2023). Em relação à sua origem, as fibras podem ser classificadas como sintéticas ou naturais, conforme elencado na Figura 20, onde são relacionados alguns exemplos.

Figura 20 – Classificação das fibras



Fonte: Adaptado de Akil et al. (2011), Thapliyal et al. (2023) e Veit (2023)

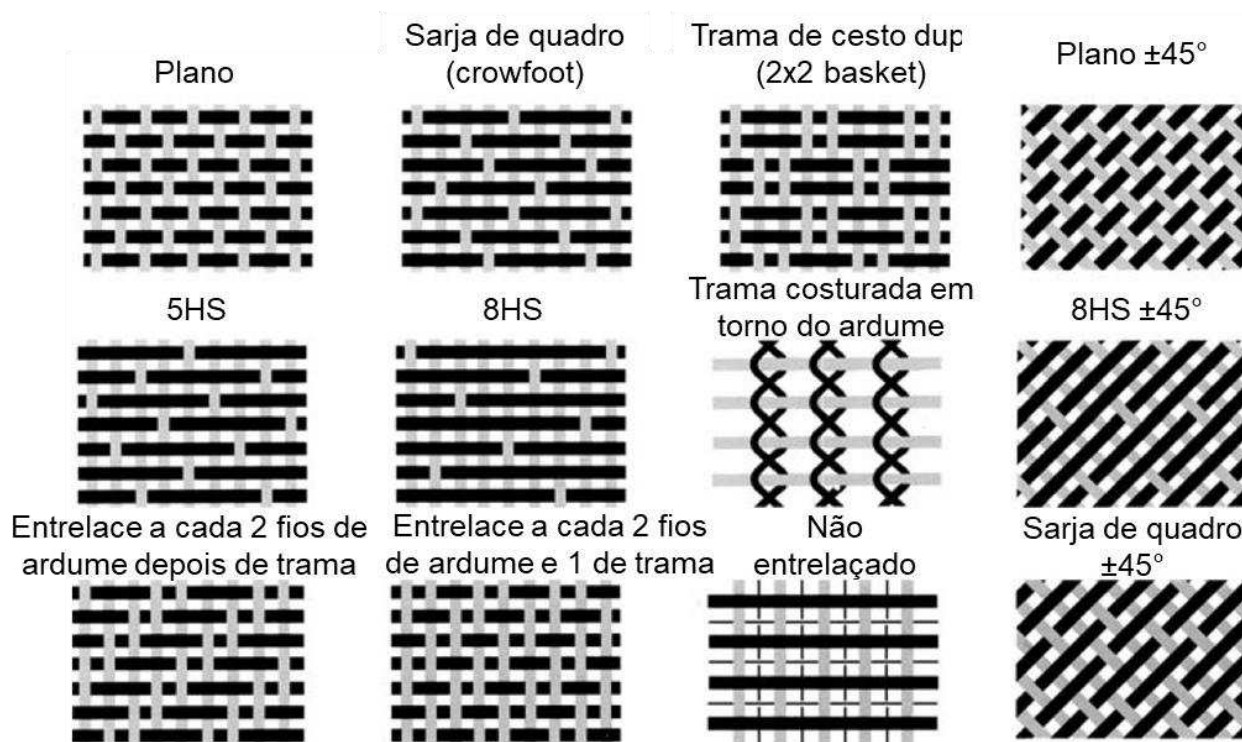
Em materiais compósitos, o reforço de fibras pode ser dividido de acordo com o comprimento, dimensão e orientação. As fibras podem vir em muitas formas, de fibras contínuas (orientadas ou aleatórias) a fibras descontínuas (picadas ou moídas), fibras longas a fibras curtas, fibras orgânicas a fibras inorgânicas. O tipo de reforço de fibras é escolhido conforme a aplicação pretendida e as propriedades mecânicas desejadas (Akil *et al.*, 2011; Mazumdar, 2002; Thapliyal *et al.*, 2023). Os reforços fibrosos se constituem de grande variedade e a cada dia novas tecnologias de processamento de filamentos surgem para ampliar essa lista, que pode ser de fibras longas e contínuas, fibras descontínuas, fibras curtas, nanofibras, monofilamentares ou multifilamentares (Veit, 2023)

As principais funções das fibras em um compósito são (Mazumdar, 2002):

- Conduzir a carga. Em um compósito estrutural, 70 a 90% da carga é transportada por fibras.
- Fornecer rigidez, resistência, estabilidade térmica e outras propriedades estruturais nos compósitos.

Fornecer condutividade elétrica ou isolamento, dependendo do tipo de fibra usada. Existem dois tipos principais de tecidos disponíveis na indústria de compósitos: tecidos tramados (*woven*) e tecidos não tramados (*noncrimp*) (Mazumdar, 2002).

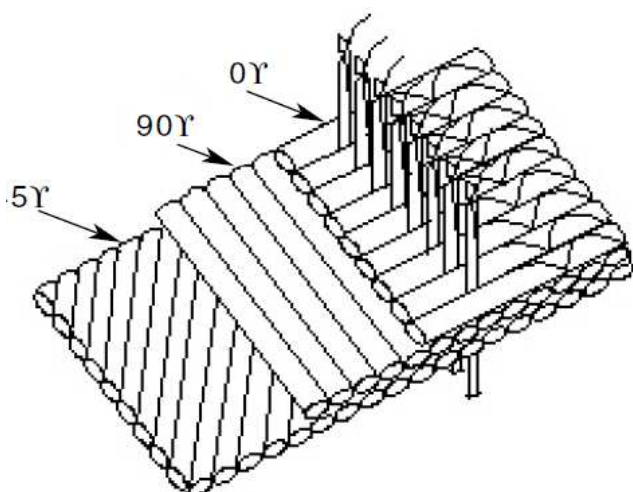
Os principais tipos de fibras tecidas são apresentados na Figura 21. A quantidade de fibra em diferentes direções é controlada pelo padrão de trama. Por exemplo, em tecidos tramados em uma direção, as fibras são tecidas de tal forma que as fibras em 0° sejam até 95% do peso total do tecido. Em um padrão de trama simples, as fibras nas direções 0° e 90° são igualmente distribuídas. Tecidos híbridos em várias combinações, como vidro/carbono e aramida/carbono, também estão disponíveis (Mazumdar, 2002).

Figura 21 – Alguns estilos de tramas de tecidos

Fonte: Mazumdar (2002)

O tecido tramado também é usado para fazer pré-impregnados (prepregs), bem como em processos RTM (*Resin Transfer Molding* – Moldagem por Transferência de Resina) e SRIM (*Structural Reaction Injection Molding* – Moldagem por Injeção de Reação Estrutural) como matéria-prima. Tecidos tramados têm a vantagem de serem baratos (Mazumdar, 2002).

Em tecidos não tramados os fios são colocados paralelos uns aos outros, como mostrado na Figura 22 e, em seguida, costurados juntos usando linha de poliéster (Mazumdar, 2002).

Figura 22 – Esquema de tecidos não tramados

Fonte: Mazumdar (2002)

O aumento da consciência ambiental e interesse público, novas restrições ambientais e o uso insustentável do petróleo têm levado a se pensar em materiais mais sustentáveis. Acredita-se que a fibra natural seja um dos materiais mais benéficos ao meio ambiente, superando a fibra sintética em muitos aspectos. As fibras sintéticas apresentam propriedades mecânicas mais altas do que as fibras naturais, no entanto, as fibras naturais apresentam maior sustentabilidade e reciclabilidade que as fibras sintéticas (Thapliyal *et al.*, 2023).

A planta da juta pertence ao gênero botânico *Corchorus*, podem ser das espécies *Corchorus capsularis* e *Corchorus olitorius*, e são de grande importância para a produção de fibras. Elas crescem de forma selvagem, mas também podem ser cultivadas. A juta é a mais importante fibra proveniente da entrecasca do caule (*bast fiber*) em termos de volume, com uma produção anual mundial de cerca de 3 milhões de toneladas (Veit, 2023).

Estima-se que cerca de 40 milhões de lares em todo o mundo produzem fibras naturais, das quais 29 milhões estão envolvidas na produção de algodão, 6 milhões de juta e 5 milhões de lã. Cerca de 200 milhões de pessoas trabalham na produção de fibras naturais. A Índia domina a produção de algodão e juta (Veit, 2023).

A juta é uma planta herbácea anual, que cresce até uma altura de 2 a 5 m (Figura 23a) e desenvolve-se principalmente em países tropicais e subtropicais. Quando as plantas atingem 30 cm de altura, elas são separadas. Após 3 a 4 meses, a floração começa. As flores se desenvolvem em cápsulas (vagens) e após outras 4 semanas, a colheita começa, mesmo antes das cápsulas amadurecerem (Veit, 2023).

Na colheita, os caules de juta de 1,5 a 3 m de comprimento são cortados. Isso é seguido pela secagem no campo (Figura 23b), as folhas são removidas por batidas e depois descaroçadas ou agitadas. A maceração em água da juta é o principal processo para redução da polpa. Depois disso, as fibras são obtidas por preparação mecânica (oscilação, secagem), e sua duração depende do tipo de água, da maturidade da planta e da temperatura, e leva entre 10 e 35 dias para completar o processo (Veit, 2023).

Figura 23 – Plantação de juta



Fonte: Google Imagens (2025)

Como outras fibras naturais, a juta necessita de tratamentos superficiais para que a superfície das fibras (fibrilas) se torne compatível com os polímeros que irão reforçar, sendo comum o processo de alcalinização em solução de NaOH (hidróxido de sódio) (Veit, 2023).

2.6.2 Matrizes Poliméricas

Os polímeros têm por características possuírem baixos módulos, elevada resistência ao impacto, agentes ambientais e químicos, menor peso específico que a maioria dos outros materiais de engenharia e elevada tenacidade à fratura, ao contrário dos materiais cerâmicos, cimentícios e de muitas ligas metálicas, especialmente em temperaturas criogênicas. Para melhorar suas propriedades mecânicas, se faz uso de reforços fibrosos, gerando assim um novo material denominado compósito (Mazumdar, 2002).

As funções mais importantes da matriz incluem (Mazumdar, 2002):

- O material da matriz une as fibras e transfere a carga para as fibras. Ele fornece rigidez e forma à estrutura.
- A matriz isola as fibras para que fibras individuais possam agir separadamente. Isso interrompe ou retarda a propagação de uma rachadura.
- A matriz fornece uma boa qualidade de acabamento de superfície e auxilia na produção de peças em forma líquida ou quase líquida.
- A matriz fornece proteção às fibras de reforço contra ataques químicos e danos mecânicos (desgaste).

- Dependendo do material da matriz selecionado, características de desempenho como ductilidade e resistência ao impacto também são influenciadas. Uma matriz dúctil aumentará a tenacidade da estrutura. Para maiores requisitos de tenacidade, compósitos à base de termoplásticos são selecionados.
- O modo de falha é fortemente afetado pelo tipo de material da matriz usado no compósito, bem como sua compatibilidade com a fibra.

A Figura 24 apresenta uma gama de polímeros denominados termofixos e termoplásticos (Kibet; Githinji; Nziu, 2025; Mazumdar, 2002).

Os polímeros termofixos, uma vez curados, não podem ser refundidos ou recuperados ao seu estado original, pois sofrem uma transformação química em sua cadeia molecular. Durante a cura, eles formam cadeias moleculares tridimensionais, chamadas de reticulação, que causam ligações covalentes, impedindo a reversão do processo, sendo normalmente utilizados em processos industrializados diversos devido ao seu estado líquido viscoso inicial antes da cura, que o torna mais versátil que os polímeros termomoldáveis ou termoplásticos (Mazumdar, 2002).

Figura 24 – Polímeros utilizados na produção de compósitos

Termofixos	Termoplásticos
Fenólicos Epóxi Poliéster Poliamidas Poliuretano (PU) Polissulfona (PSU) Polieter-eter-eter cetona (PEEK) Polieter-eter cetona (PEK) Tereftalato de polietileno (PET) Policarbonato (PC) Silicone Resina de ureia-formaldeído (UF) Ésteres vinílicos Resina de fenol-formaldeído (PF) Resina de melamina-formaldeído (MF) Polieterimida (PEI) Uréia Éster de cianato de poliéster Acrylates Resinas alílicas Resinas alquídicas	Náilon Acetato de celulose Poliestireno (PS) Polipropileno (PP) Polietileno (PE) Policarbonato (PC) Cloreto de polivinila (PVC) Polieter-eter cetona (PEK) Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) Polimetil metacrilato (PMMA) Poli-hidroxialcanoatos (PHAs) Poli-hidroxibutirato (PHB) Tereftalato de polibutileno (PBT) Polioximetileno (POM) Ácido polilático (PLA) Óxido de polifenileno (PPO) Sulfeto de polifenileno (PPS) Politetrafluoroetileno (Teflon) (PTFE) Copolímero de estireno-acrilonitrila (SAN) Elastômero termoplástico (TPE)

Fonte: Adaptado de Kibet, Githinji e Nziu (2025) e Mazumdar, 2002

Os polímeros termoplásticos são, em geral, mais dúcteis e mais resistentes ao impacto do que os termofixos e se caracterizam por estarem em estado natural sólido, e para seu

processamento necessitam de aplicação de calor para liquefazê-los antes de serem reforçados por fibras, tornando sua aplicação menos versátil e de maior custo para produção de materiais (Mazumdar, 2002).

Devido à crescente consciência ambiental e às demandas das autoridades legislativas a partir dos acordos mundiais para a redução do consumo energético e aumento da sustentabilidade em todos os setores produtivos, a fabricação, o uso e a substituição de estruturas compósitas tradicionais, geralmente feitas de fibras de vidro, carbono ou aramida incorporadas em resinas epóxi, poliéster insaturado, poliuretano ou fenólicos, são considerados críticos (Mohanty *et al.*, 2000), o que tornaram os compósitos de fibras naturais muito atraentes para aplicações de consumo e engenharia. Isso se deve às suas características biodegradáveis. No entanto, o desenvolvimento de biopolímeros totalmente derivados de fontes renováveis e recicláveis ainda é um desafio do ponto de vista comercial. Portanto, as inovações em biopolímeros, feitos de derivados de celulose, amido, ácido láctico, fornecem uma solução como matriz verde na fabricação de compósitos de fibras naturais totalmente biodegradáveis (Cionita *et al.*, 2024). No que diz respeito às propriedades mecânicas, os compósitos de base biopolimérica reforçados por fibra lignocelulósica são comparáveis aos conhecidos plásticos reforçados com fibra de vidro (Mohanty *et al.*, 2000).

Certos polímeros derivados de fontes naturais podem perder sua biodegradabilidade devido à alteração química, como os polímeros de Nylon 9 derivados da polimerização de monômeros de ácido oleico ou os polímeros de Poliamida 11 derivados da polimerização de monômeros de óleo de rícino. Enquanto isso, vários polímeros à base de petróleo, como o tereftalato de adipato, são biodegradáveis (Cionita *et al.*, 2024).

A disponibilidade de biopolímeros no mercado atual ainda é limitada. Atualmente, os biopolímeros representam menos de um por cento da produção anual de mais de 367 milhões de toneladas de polímeros. No entanto, o desenvolvimento do mercado de biopolímeros continuou a crescer positivamente em comparação com o padrão do mercado global de polímeros, que apresentou leve declínio (Cionita *et al.*, 2024).

Alguns dos biopolímeros encontrados na literatura são o ácido polilático (PLA) (Cionita *et*

al., 2024), o Amido termoplástico (TPS), material rígido produzido pela combinação de amido nativo com o uso de plastificantes (Kibet; Githinji; Nziu, 2025), o Poli-hidroxialcanoato (PHAs): poliésteres biogênicos plásticos (Cionita *et al.*, 2024) e a borracha natural (Torres *et al.*, 2023).

2.6.3 Compósitos derivados de fontes renováveis

Os compósitos têm sido projetados e fabricados para aplicações nas quais são necessários alto desempenho e leveza. Eles oferecem várias vantagens sobre materiais de engenharia tradicionais (Mazumdar, 2002).

A resistência específica (razão resistência-densidade) de um material compósito é muito alta. Devido a isso, aviões e automóveis se movem mais rápido e com melhor eficiência de combustível. A resistência específica é tipicamente na faixa de 3 a 5 vezes a do aço e ligas de alumínio. Devido a essa maior rigidez e resistência específicas, as peças compósitas são mais leves do que seus semelhantes de outros materiais (Mazumdar, 2002).

A resistência à fadiga (limite de resistência) é muito maior para materiais compósitos em comparação com as ligas metálicas convencionais, pois apresentam boa resistência à fadiga de até cerca de 50% de sua resistência estática (Mazumdar, 2002).

Os materiais compósitos (Figura 25) podem apresentar seu reforço em forma fibrosa, contínua ou descontínua, ou particulado, picado ou moído, disperso na matriz polimérica, cerâmica ou metálica (Mazumdar, 2002).

Figura 25 – Tipos de compósitos

Fibrosos	Particulados
Fibras contínuas (tecidos tramados e tecidos não tramados)	Picado
Fibras descontínuas	Moído

Fonte: Adaptado de Mazumdar (2002)

As duas principais razões para o interesse por materiais biodegradáveis são: o crescente problema do desperdício, resultando na escassez geral de aterros sanitários, e a necessidade do uso ambientalmente responsável dos recursos, juntamente com o aspecto da neutralidade de CO₂. Limitações de desempenho e altos custos restringiram a adoção de plásticos biodegradáveis a nichos muito pequenos até o momento, mas pesquisas estão sendo

desenvolvidas no sentido de minimizar essas restrições (Mohanty *et al.*, 2000). Os compósitos com fibras naturais têm sido usados em diversos setores produtivos como o automotivo (componentes internos e externos), no setor aeroespacial (painéis internos de aeronaves para reduzir peso e consumo de combustível) e em menor escala pela IC (compósitos de matriz cimentícia e polimérica em componentes de edificações) (Palanisamy *et al.*, 2024).

Os compósitos de matriz polimérica reforçada por fibras (CPRFs) atualmente são empregados em materiais de embalagem, caixilhos de portas e persianas, geotêxteis, painéis de construção e aglomerados (Palanisamy *et al.*, 2024). A resistência à tração do compósito de matriz polimérica reforçada por fibras de juta (lignocelulósica) (CPRFJ) varia bastante, de 320-800 MPa, assim como seu módulo de elasticidade E , de 8-78 GPa, sugerindo sua adequação para uma grande variedade de aplicações onde são primordiais resistência e flexibilidade (Palanisamy *et al.*, 2024).

Tezara et al. (2022) analisaram como as sequências de camadas, as orientações das fibras e o tratamento químico alcalino afetam as propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica híbridos feitos de juta (J) e rami (R) reforçados com éster de vinil, observando as variações ocorridas com diferentes empilhamentos e direções das fibras.

Sriranga, Kirthan e Ananda (2021) exploraram as propriedades mecânicas de compósitos híbridos produzidos com matriz de resina epóxi, fibra natural de juta e fibra de vidro S. Através de técnicas de laminação manual, diferentes composições foram criadas e submetidas a testes de tração, flexão e impacto, seguindo normas ASTM (*American Society for Testing and Materials* - Sociedade Americana para Testes e Materiais). A análise dos resultados revelou que a adição de 20% de fibra de juta em um compósito com 30% de fibra de vidro e 50% de resina epóxi, pode melhorar a resistência do material compósito em comparação com a base de resina epóxi e fibra de vidro S pura. Adicionalmente, a microestrutura dos materiais foi examinada para compreender os mecanismos de falha.

Gupta et al. (2023) pesquisaram suas propriedades mecânicas, visando aplicações sustentáveis e de baixo custo, em que os resultados demonstraram o potencial da combinação de juta e vidro para melhorar a resistência mecânica, embora a configuração das camadas

influencie significativamente o desempenho.

Mohanty et al. (2000) investigaram como a modificação química de fios de juta afeta o desempenho de compósitos biodegradáveis feitos com matriz de Biopol® (PHBV). Os pesquisadores prepararam compósitos usando variedades de fios de juta e aplicaram técnicas como tratamento alcalino e copolimerização por enxertia para alterar as propriedades dos fios. Os resultados demonstraram que a incorporação de fios de juta geralmente melhorava as propriedades mecânicas do Biopol®, através de diversos ensaios mecânicos, verificando que a alcalinização da juta melhorou suas propriedades como reforço, indicando que os compósitos de juta e Biopol® têm potencial para diversas aplicações, oferecendo uma alternativa mais ecológica aos materiais tradicionais.

Cionita et al. (2024) examinaram a utilização dos biopolímeros de ácido polilático (PLA) e poli-hidroxialcanoato (PHA) como matrizes ecológicas na produção de compósitos reforçados com fibras naturais totalmente biodegradáveis. Identificaram que as propriedades térmicas do PLA e do PHA são compatíveis com as da fibra natural no processo de fabricação do compósito. O ponto de fusão de 160°C permite que o PLA e o PHA sejam produzidos por meio de um processo de fabricação de biocompósitos antes que as fibras naturais sejam degradadas, concluindo que a combinação de PLA e PHA com fibras naturais é uma opção promissora para o desenvolvimento de materiais compósitos totalmente renováveis e biodegradáveis.

Torres et al. (2023) pesquisaram biocompósitos combinando matriz de borracha natural reforçada com fibras de juta, tanto não tratadas quanto tratadas com hidróxido de sódio (álcali), em proporções baixas. O objetivo foi desenvolver materiais sustentáveis para a indústria de calçados. Essas melhorias estruturais e de processamento resultaram em melhores propriedades mecânicas e de resistência à abrasão em comparação com os compósitos reforçados com fibras de juta não tratadas, e em alguns casos, permitiram que o compósito atingisse propriedades semelhantes às da borracha natural sem adições.

Malik (2025) estudou o poliglicerol citrato (PGC), polímero termofixo totalmente biodegradável e solúvel em água, sintetizado pela policondensação de ácido cítrico e glicerol. Para superar suas propriedades limitadas, a matriz de PGC foi reforçado com fibra de juta para

melhorar a resistência mecânica, e posteriormente com trihidreto de alumínio (ATH) para aumentar a estabilidade térmica e a resistência ao fogo. Os resultados mostraram que a incorporação de ATH aprimorou significativamente as propriedades mecânicas, a resistência à chama e a estabilidade térmica do compósito juta/PGC. Além disso, o estudo confirmou a biodegradabilidade do compósito, embora a presença de ATH tenha diminuído ligeiramente a taxa de degradação.

2.6.4 Técnicas de Fabricação

A produção de CPRF é influenciada pela geometria específica do componente pretendido, e vários métodos de fabricação são empregados, todos embasados no conceito fundamental de polimerização. Essa versatilidade permite a adaptação de processos de fabricação com base nos requisitos exclusivos e nas complexidades de *design* de cada componente. A literatura descreve uma variedade de métodos e processos de fabricação empregados na produção de compósitos reforçados com fibras naturais, especificando a matriz e o reforço para cada técnica, refletindo a exploração e o desenvolvimento contínuos na área (Palanisamy *et al.*, 2024):

- Laminação manual (*Hand layup*) em que uma camada de matriz é depositada em um molde e sobre ela camadas alternadas de reforço-matriz são sobrepostas, enquanto os laminadores compactam e consolidam matriz e reforço manualmente.
- Laminação por spray (*Spray layup*): O método evoluiu a partir da técnica de laminação manual, utilizando uma pistola de spray para aplicar resina e reforços de fibra de forma controlada. A passagem de um rolo sobre a superfície garante a integração das camadas e elimina bolhas de ar. Ideal para produções de baixo volume, oferece um acabamento preciso e econômico.
- Moldagem por injeção (*Injection molding*): O processo envolve o derretimento do material por faixas de aquecimento e movimento de um cilindro de rosca, seguido pela injeção precisa do plástico derretido na cavidade do molde. Após o resfriamento e solidificação, o produto é ejetado, garantindo um acabamento suave e alta eficiência para grandes volumes de produção.

- Bobinagem de fibras contínuas (*Filament winding*): A técnica envolve a bobinagem precisa de filamentos contínuos em um mandril rotativo. Um dispensador deposita fibras de acordo com a configuração desejada, garantindo um compósito bem projetado. Ideal para formas convexas, é usada na fabricação de vasos de pressão, tubos, estruturas e componentes complexos.
- Moldagem por compressão (*Compression molding*): É uma técnica versátil usada para criar compósitos reforçados com fibras soltas ou em mantas, tanto em matrizes termofixas quanto termoplásticas. O processo envolve o aquecimento e a compressão das fibras e resinas, garantindo a integridade e a resistência do material. É ideal para atender às diversas demandas da engenharia moderna.

A Figura 26 mostra os métodos de fabricação empregados na produção de compósitos reforçados somente de fibras de juta ou com outras fibras, especificando a matriz e o reforço.

Figura 26 – Métodos e processos de fabricação de compósitos de juta com ou sem outras fibras.

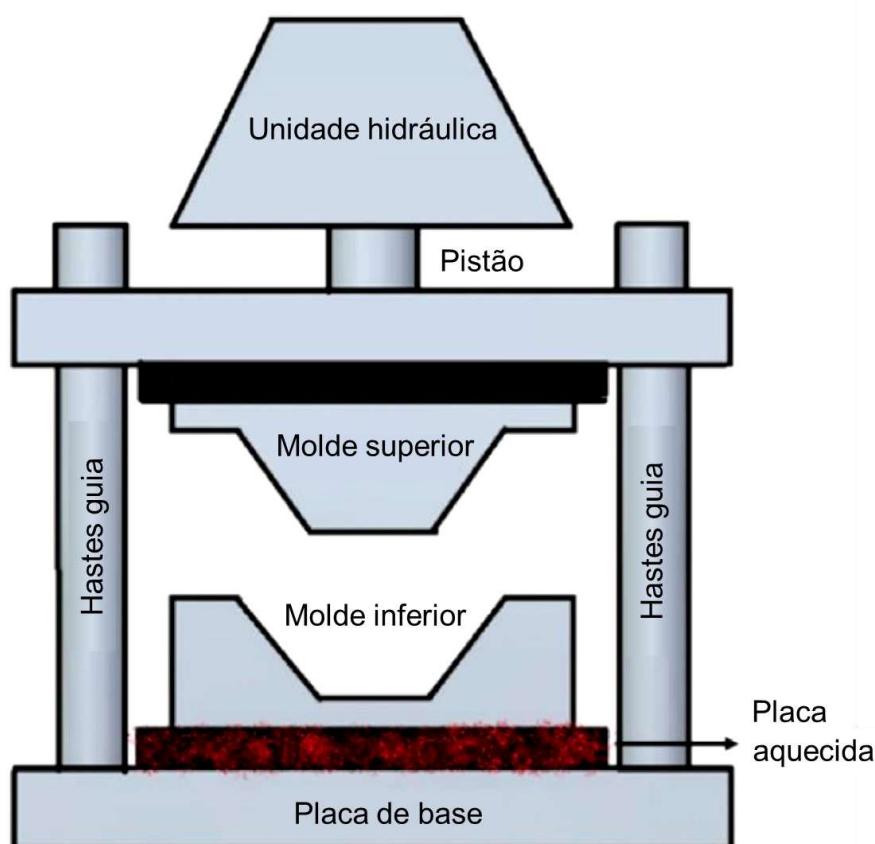
Método	Matriz	Reforço
Laminação manual	Poliéster	Sisal, juta e fibras de vidro
	Epóxi	Fibra de juta bidirecional
	Epóxi	Fibras de vidro e sisal/juta
Laminação por spray	Epóxi	Fibras de sisal e juta
Bobinagem de fibras contínuas	Biopolímero	Fio de juta
Moldagem por compressão	Poliéster/epóxi	Fibras de juta

Fonte: Adaptado de Palanisamy et al. (2024)

A moldagem por compressão utiliza qualquer tipologia de fibras e matrizes já descritas. Essas configurações de fibras podem exibir uma estrutura altamente irregular ou intencionalmente alinhada, oferecendo versatilidade na adaptação a requisitos de aplicação específicos. A moldagem por compressão (Figura 27) pode ser aplicada a matrizes termofixas e termoplásticas. O processo de preparação, que precede a aplicação de calor e pressão, envolve um arranjo estratégico de fibras. Essas fibras, soltas ou em forma de tecidos, são cuidadosamente empilhadas em várias orientações, geralmente em conjunto com chapas de resina. Esse arranjo visa criar uma estrutura com integridade e resistência melhoradas para a

finalidade pretendida. Uma etapa fundamental no processo de moldagem por compressão envolve o pré-aquecimento do sistema de moldagem. Esta fase inicial de aquecimento é seguida pela colocação do material em um espaço oco aberto, que sofre aquecimento adicional até o limite exigido pela matriz polimérica. A temperatura elevada desempenha um papel fundamental em garantir a maleabilidade do material e facilitar a consolidação das fibras dentro do molde (Palanisamy *et al.*, 2024).

Figura 27 – Processo de moldagem por compressão



Fonte: Adaptado de Palanisamy et al. (2024)

A moldagem por compressão do tipo SMC (*Sheet Molding Compound* – Compósito para Moldagem de Chapas) é o tipo de moldagem por compressão em que emprega uma placa pré-fabricada de reforço, matriz e adições prontas para moldagem. Consiste principalmente de matriz em resina de poliéster ou viniléster, fibras de vidro picadas, enchimentos inorgânicos, aditivos e outros materiais. Normalmente, o SMC contém 30% em peso de fibras de vidro curtas. O propósito de adicionar enchimento é reduzir o custo geral, aumentar a estabilidade dimensional e reduzir o encolhimento durante a moldagem. O espessante é usado para aumentar a

viscosidade da resina. O estireno é adicionado para o processo de cura ou reticulação. Um inibidor previne a cura prematura da mistura de resina. Um agente desmoldante é adicionado ao composto para fácil desmoldagem de peças moldadas por compressão do molde. SMC é uma tecnologia de baixo custo e usada para produção em alto volume de componentes compósitos que exigem resistência moderada. Atualmente, o SMC domina o mercado automotivo por causa de suas capacidades de produção de baixo custo e alto volume. O SMC vai até uma espessura máxima de 6 mm. Ele é cortado em uma tira retangular e então posicionada na cavidade do molde para moldagem por compressão. Durante a moldagem, temperatura e pressão adequadas são aplicadas para espalhar a carga na cavidade e então curá-la. O tempo do ciclo do processo para moldagem por compressão está na faixa de 1 a 4 min (Mazumdar, 2002).

No processo de fabricação do compósito para aplicações em SMC, sobre esteiras e rolos de uniformização e compressão, são intercalados o material da matriz (resina, inibidor, espessante, enchimento, exceto fibra) e de reforço. Esse ciclo pode ser repetido por mais de uma vez, de acordo com a espessura que se deseja. Ao finalizar, uma pele de film de polietileno é colocada nas duas faces da placa produzida para evitar o contato e adesão entre faces, que são em seguida estocadas na forma de rolos. Um SMC à base de poliéster requer de 1 a 7 dias de exposição a cerca de 30°C antes do uso na moldagem por compressão. Este período é chamado de período de maturação, em que a viscosidade da resina reduz para um nível satisfatório para seu uso na operação de moldagem (Mazumdar, 2002).

O SMC pode também empregar um pré-impregnado, ou prepreg, que é uma fibra, tecido ou manta impregnada de resina em forma plana, que é armazenada para uso posterior em operações de moldagem ou laminação manual. Fibras colocadas em orientação a 0° e pré-impregnadas com resina são chamadas de fita unidirecional. A fita unidirecional fornece a capacidade de adaptar as propriedades compósitas na direção desejada. Os prepgs de tecido tramado são usados para fazer peças altamente contornadas nas quais a flexibilidade do material é fundamental. Também é usado para fazer painéis sanduíche usando alvéolos como material central. Os *rovings* prepgs são usados principalmente em aplicações de enrolamento filamentar (Mazumdar, 2002).

Os prepregs fornecem propriedades mecânica estáveis, bem como uma mistura homogênea de fibras/resinas com impregnação completa. Eles eliminam a necessidade de pesagem e mistura de resina e catalisador. Os prepregs termofixos têm uma vida útil limitada e requerem refrigeração para armazenamento. A refrigeração desacelera o processo de cura, uma vez que os polímeros já possuem os agentes de catalisação (Mazumdar, 2002).

Os prepregs de tecido são feitos pela pré-impregnação de tecidos com resina por meio de um processo de fusão a quente ou por tratamento de solução, onde os polímeros mais utilizados são a base termofixa epoxídica ou ester-vinílica, para a construção. Os polímeros termofixos, uma vez curados, não podem ser refundidos ou recuperados ao seu estado original, pois sofrem uma transformação química em sua cadeia molecular. Durante a cura, eles formam cadeias moleculares tridimensionais, chamadas de reticulação, que causam ligações covalentes, impedindo a reversão do processo, sendo normalmente utilizados em processos industrializados diversos devido ao seu estado líquido viscoso inicial antes da cura, que o torna mais versátil que os polímeros termomoldáveis ou termoplásticos (Mazumdar, 2002). Podem também ser produzidos com polímeros termoplásticos, e nesse caso normalmente são usados na indústria automobilística (Fleischer *et al.*, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

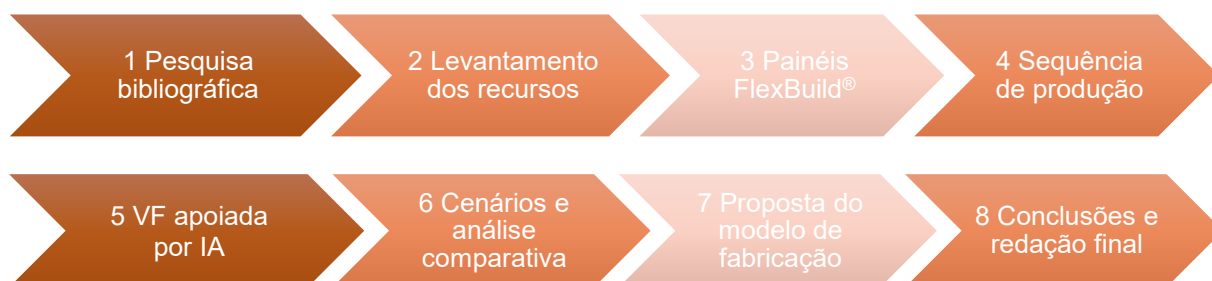
A pesquisa foi desenvolvida dentro do GETIn (Grupo de Estudos em Tecnologia e Inovação) na Universidade Estadual de Londrina (UEL), que é o time de IPD, e compreende a virtualização do processo de fabricação dos PMVV da FlexBuild®, posteriormente extrapolado para outras edificações industrializadas modulares, adotando também os conceitos de PLM e ferramentas associadas, conforme descrito na Introdução e explanado no capítulo 2 Revisão da Literatura.

Para tal, foi realizada uma investigação teórico-analítica computacional, para a partir das partes, subconjuntos e conjuntos criados pelo grupo de desenvolvimento, fosse possível realizar a simulação dos cenários da etapa do ciclo de vida de fabricação do produto apresentado.

3.1 Etapas do Método

As etapas do método proposto para o desenvolvimento da pesquisa são ilustradas na Figura 28 a seguir.

Figura 28 – Fluxograma do método



Fonte: Autora

3.1.1 Pesquisa bibliográfica

Inicialmente foi realizada a Revisão Sistemática da Literatura, descrita no item 1.1.1 Lacuna do conhecimento, partindo de buscas gerais, afinando até eliminar as pesquisas já desenvolvidas e identificar algo que ainda falta ser desenvolvido, como forma de comprovar o ineditismo da pesquisa. A seguir foi desenvolvida a revisão da literatura, a partir dos retornos gerais da Revisão Sistemática da Literatura, expandindo para os assuntos abordados na pesquisa, como forma de embasamento científico.

3.1.2 Levantamento dos recursos

Para a definição dos equipamentos que compõe a fábrica, além da revisão da literatura, foram necessários relatórios de desenvolvimento dos subsistemas pelo time de desenvolvimento integrado de produto, em especial os PMVV, as instalações embutidas e as esquadrias.

Para processamento dos dados foi empregada estação de trabalho com processador Xeon® 4600 MHz, 2 placas gráficas interligadas para processamento via GPU (*Graphics Processing Unit* – Unidade de Processamento Gráfico) e 32 Gb de memória RAM. A modelagem do maquinário da fábrica foi buscada na internet. Para os equipamentos não encontrados, foi empregada a ferramenta computacional SolidWorks® (Dassault Systèmes, 2018) para sua modelagem ou empregada imagem similar para representar a etapa do processo. Além disso, dados de fornecedores foram obtidos por meio de visitas, ligações telefônicas e pesquisa na internet, descritas no decorrer do texto.

Para o desenvolvimento do algoritmo da RN, foi empregada a ferramenta computacional para programação MATLAB (Hossain, 2022). Para a modelagem e análise dos cenários da VF foi empregada a versão educacional da ferramenta computacional de VF FlexSim® 2023.2 da Autodesk (Autodesk, 2024).

3.1.3 Painéis de vedação vertical da FlexBuild®

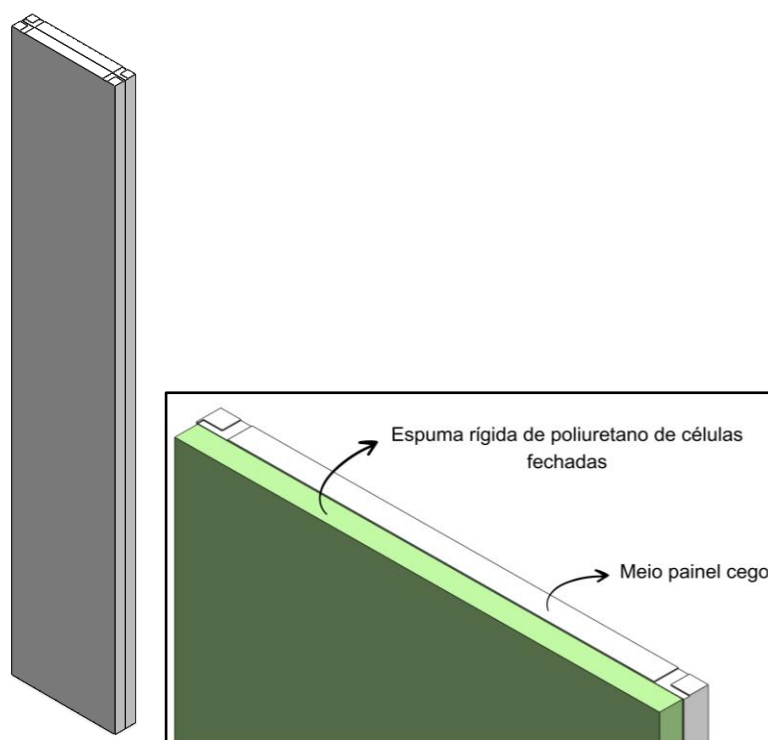
Como descrito no item 1.4 Caracterização do objeto de estudo, a FlexBuild® é um sistema construtivo industrializado modular formado por três componentes principais: fundação, painéis de vedação vertical e cobertura, com instalações e esquadrias embutidas nos componentes ainda na fábrica, como evidenciado no mesmo tópico, pelas figuras 5 a 10. Os elementos são feitos com casca de material prepreg CBRFJ e o núcleo preenchido por espuma rígida PU de células fechadas, formando o sistema sanduíche. Todas as peças saem de fábrica acabadas, sendo apenas montadas no local de uso por encaixe. Para o desenvolvimento da pesquisa, foram empregados os PMVV, com espessura do material prepreg de 3,2 mm, usados pela ferramenta computacional baseada em RN descrita no item 3.1.6.

Os painéis seguem a norma de coordenação modular ABNT NBR 15873:2024 com dimensões múltiplas do módulo básico de 100 mm (10 cm), em módulo de 1000 mm de largura por 2700 mm de altura e 100 mm de espessura; e meio módulo, com 500 mm de largura por 2700 mm de altura e 100 mm de espessura. Os painéis podem ser cegos, ou seja, sem nenhum tipo de instalação ou esquadria; com instalações hidrossanitárias ou elétricas e de comunicação; ou com esquadria, podendo ser porta, janela baixa ou janela grande. Como condição de contorno para simplificação da produção, apenas painéis de módulo inteiro recebem instalações ou esquadrias e apenas uma delas. Além dessas variações, os painéis podem receber reforço para fixação de armários altos ou bancadas. Neste caso, podendo ser painel de módulo inteiro ou meio módulo.

Características específicas dos painéis:

- MPC: Painel com metade da largura (500 mm) e sem instalações adicionais (Figura 29).

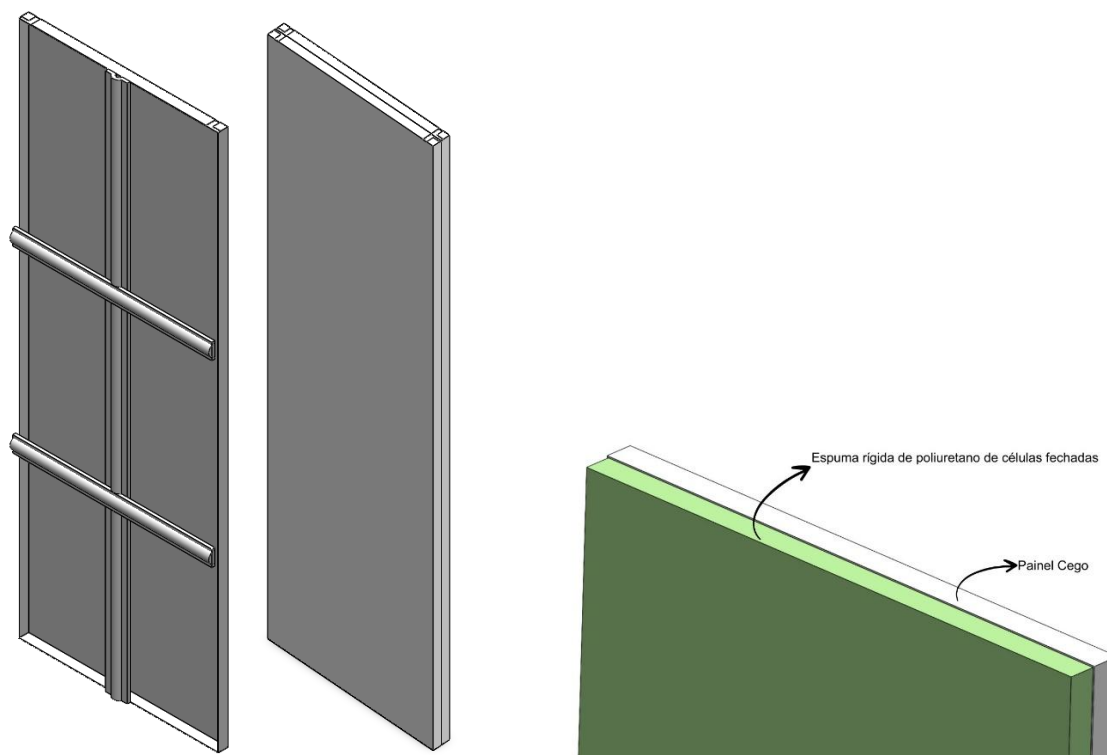
Figura 29 – Painel com metade da largura (500 mm) (MPC) e detalhe do enchimento de PU



Fonte: GETIn (2024)

- MPR: Painel com metade da largura (500 mm), reforço interno para fixação de armários e sem instalações adicionais.
- PC: Painel básico com largura modular (1000 mm) sem características adicionais (Figura 30).

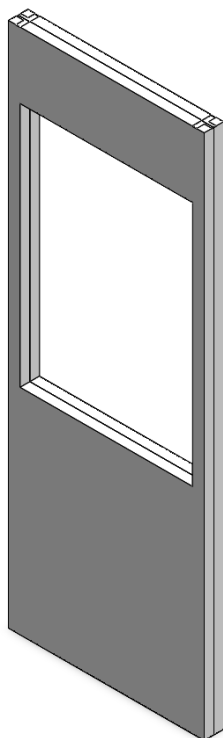
Figura 30 – Painel básico com largura modular (1000 mm) (PC) aberto mostrando nervuras estruturais, fechado e detalhe do enchimento de PU



Fonte: GETIn (2024)

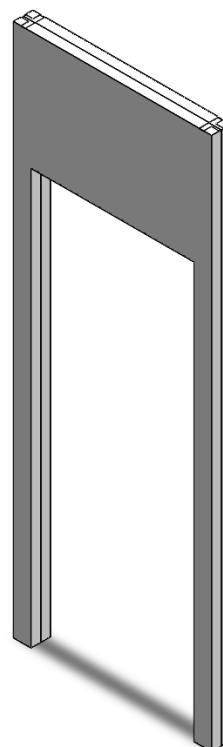
- PR: Painel básico com largura modular (1000 mm), reforço interno para fixação de armários e sem instalações adicionais.
- PH: Inclui insertos para conexões de passagem de água e/ou esgoto.
- PRH: Possui reforço interno para fixação de armários e insertos para conexões de passagem de água e/ou esgoto.
- PEL: Inclui insertos para tomadas/interruptores (Figura 9).
- PRE: Possui reforço interno para fixação de armários e insertos para tomadas/interruptores.
- PJG: Painel com reforços de alumínio para fixação de esquadrias de janelas grandes (Figura 31) e três nervuras.
- PJA: Painel com reforços de alumínio para fixação de esquadrias de janelas altas.
- PP: Painel com reforços de alumínio para fixação de portas (Figura 32).

Figura 31 – Painel para fixação de esquadrias de janelas grandes (PJG)



Fonte: GETIn (2024)

Figura 32 – Painel para fixação de portas (PP)



Fonte: GETIn (2024)

3.1.4 Método da sequência de produção

A partir das especificações dos 11 tipos de PMVV definidas pelo GETIn (2024) e apresentados no item anterior 3.1.3 Painéis de vedação vertical da FlexBuild®, da revisão da literatura, pesquisas em sites e consulta a fornecedores e fabricantes que se assemelhem de alguma forma ao produto a ser fabricado, foram estudadas e identificadas as demandas e as etapas de fabricação, assim como o maquinário necessário. Inicialmente a sequência definida foi apresentada em formato de fluxograma, evoluiu para o detalhamento das etapas, foi realizado estudo por IA com uso de RN e posteriormente traçado o modelo conceitual, virtualização e simulação dos cenários propostos, descritos nos itens subsequentes e no capítulo de Resultados.

Os tempos das etapas de fabricação dos painéis foram referidos a partir de consultas a literatura e a fabricantes de produtos de materiais compósitos constituídos por matriz de epóxi reforçado por fibras, especialmente no exterior, uma vez que não se tem conhecimento, até a data de conclusão desta pesquisa, de empresas brasileiras que façam uso dos sistemas SMC

para produção de componentes e partes direcionados à construção civil ou grandes dimensões em outras áreas de aplicação.

Para a movimentação e manuseio foram empregados robôs industriais (Figura 33), que podem ser instalados sobre trilhos para aumento do alcance, e o AGV (*Automated Guided Vehicle* – Veículo Autônomo) sobre trilhos (Figura 34), que circulam em trilhos sem curvas, rotacionando ao redor do seu próprio eixo para mudança de direção.

O robô KR70 R2100 apresenta as seguintes especificações (Xuanyang, 2025):

- Carga nominal: 70 kg; carga máxima: 85 kg;
- Precisão de posicionamento repetitivo: 0,05 mm;
- Número de eixos: 6 eixos;
- Método de instalação: Solo, teto ou parede em qualquer ângulo;
- Principais aplicações: aplicação/pintura/colagem, soldagem a arco, montagem, corte/separação, processamento, soldagem a laser, usinagem, medição/inspeção.

Figura 33 – Robôs autônomos para movimentação e manuseio

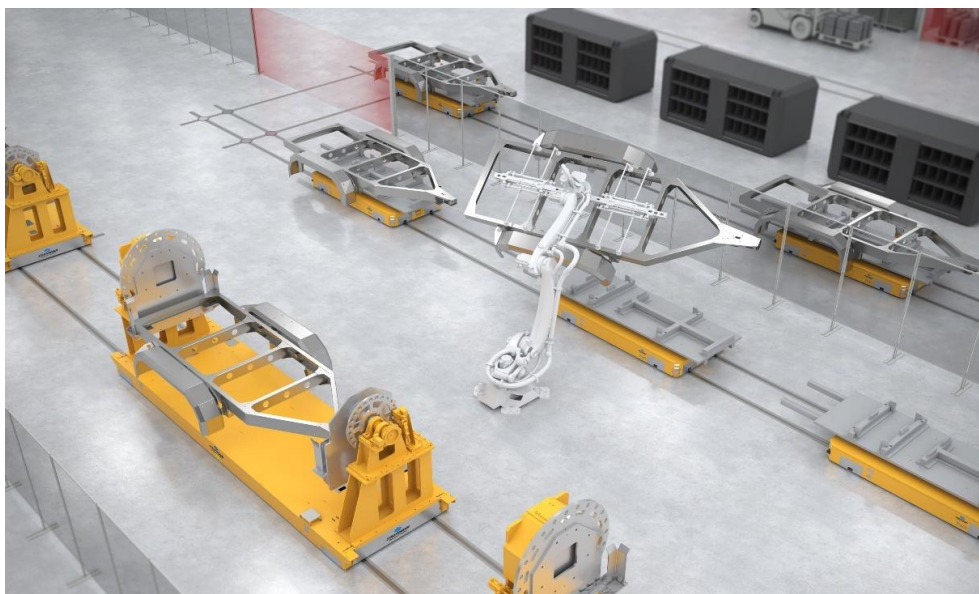


Fonte: Xuanyang (2025)

A AGV empregado foi o UTrack, do qual seguem especificações (a depender do modelo) (Strothmann, 2025):

- Capacidade máxima de carga por carrinho: 5 t a 100 t, podendo chegar a 200 t;
- Dimensões mínimas (L x C x A): 1400 mm x 2500 mm x 300 mm ou 2500 mm x 3200 mm x 440 mm;
- Perfil de viagem: velocidade de 30 m/min (0,5 m/s), podendo chegar a 1 m/s (adotado 0,6 m/s); aceleração máx. de 0,2 m/s²; distância mín. de frenagem (20 m/min = 0,33 m/s) aprox. 300 mm; precisão de posicionamento padrão ± 3 mm.

Figura 34 – AGVs sobre trilhos



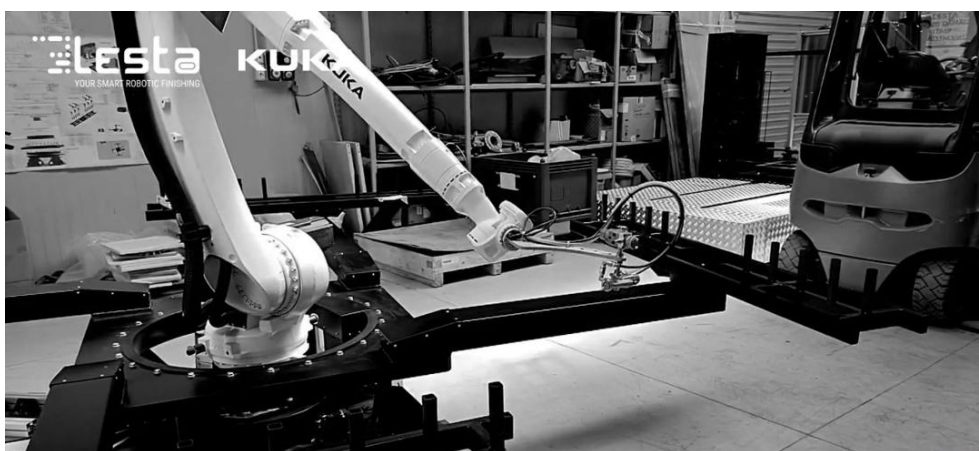
Fonte: Strothmann (2025)

A limpeza dos moldes e insertos removíveis de alumínio é feita de forma robótica (LEBOT I A6 da Lesta), modelo mostrado na Figura 35, com auxílio de operadores, com jato de água e ar comprimido e aspirador, com velocidade que pode variar de 0,2 a 0,4 m²/s para uma pressão de 6 a 8 bar, considerada 0,2 m²/s para a pesquisa, compatível com moldes de geometria complexa e resíduos de desmoldante e *gelcoat*, como na fabricação dos PMVV. Porém, o tempo final para limpeza por painel foi ajustado devido a geometria complexa dos moldes, a necessidade de sobreposição de trajetórias e o tempo de exposição por cavidade. Essa estimativa está alinhada com práticas industriais descritas por fabricantes e garante cobertura uniforme e remoção eficaz de resíduos técnicos (Sun; Guan; Zhang, 2021).

O tempo de *setup* estimado está entre 20 e 30 s por par de moldes, a depender da complexidade, considerando o carregamento do programa de limpeza, ajuste de pressão, posicionamento do bico e sincronização com o sistema de transporte, adequados às características de produção do painel. Essa abordagem permite maior precisão na modelagem do ciclo produtivo e está alinhada com práticas industriais descritas por fabricantes (Lesta 2025).

Para a aplicação do desmoldante e *gelcoat* foi utilizado o mesmo robô industrial, modelo LEBOT I A6 (Lesta, 2025), originalmente destinado a esse uso.

Figura 35 – Robô autônomo para aplicação de desmoldante e *gelcoat* LEBOT I A6



Fonte: Lesta (2025)

A velocidade de aplicação do desmoldante base solvente para moldes com cavidades e insertos é de $0,6 \text{ m}^2/\text{s}$ para aplicação automatizada com robô (Lesta, 2025). O tempo de *setup* estimado está entre 20 e 30 s por par de moldes, a depender da complexidade, considerando carregamento da receita de aplicação, ajuste de parâmetros operacionais e sincronização com o sistema de transporte (Lesta 2025).

A quantidade de desmoldante aplicada pode variar de 8 a 12 g/m^2 (Ecocompositos, 2025) e foi estimada em 10 g/m^2 para esta pesquisa, quantidade compatível com moldes de alumínio utilizados na fabricação PMVV com *gelcoat* e CBFJ.

O tempo de secagem do desmoldante base solvente com estufa a 50°C é de 15 minutos, conforme práticas recomendadas por fabricantes como Chem-Trend (2025), sem comprometer a integridade da película protetora sobre moldes de alumínio, mesmo com geometria complexa. A condição e tempo de secagem adequados garantem a formação de uma película uniforme e

estável, essencial para a aderência do *gelcoat* e a qualidade superficial do painel compósito (Ecocompositos, 2025).

O *gelcoat* apresenta viscosidade alta e maior espessura de aplicação em relação ao desmoldante, necessitando de duas a três vezes maior pressão e vazão. A velocidade de aplicação do *gelcoat* foi estimada em 0,3 m²/s, adotada com base nas especificações do robô Lesta LEBOT I A6 e nas recomendações técnicas de fabricantes como Polynt (2022). Essa velocidade é compatível com moldes de alumínio com geometria complexa e garante cobertura uniforme e controle de espessura da camada aplicada. O tempo de *setup* estimado está entre 20 e 30 s por par de moldes, a depender da complexidade, considerando carregamento da receita de aplicação, ajuste de parâmetros operacionais e sincronização com o sistema de transporte (Lesta 2025).

O tempo de cura do *gelcoat* fornecido para processos industriais com controle térmico em moldes metálicos é de 11 min em temperatura máxima de 165 °C, garantindo estabilidade superficial e adesão adequada ao compósito prepreg epóxi reforçado por fibra (Ecocompositos, 2025).

Para a determinação do tempo de corte do material prepreg, foi considerada a máquina automatizada de corte (retira o comprimento e corta) de compósitos R90 apresentada na Figura 36, com velocidade máxima de trabalho de 90 m/min (1,5 m/s) e espessura máxima de corte de 90 mm (Bullmer, 2025). Com base nas especificações da cortadora e na geometria do PMVV com CBFJ, os tempos de corte foram estimados considerando: velocidade média ajustada de 0,6 m/s para o material com espessura de 3,2 mm; desaceleração e retorno típicos em sistemas industriais de alta precisão estimado em 7 s por segmento de corte, com base na lógica de controle de trajetória da cortadora e na geometria técnica dos painéis; e estimativas industriais de tempos de *setup* 10 e 20 segundos, considerando a troca de ferramenta e carregamento do programa de corte (Bullmer, 2025).

Ainda anterior ao corte, o tempo para retirada do rolo de prepreg do compartimento refrigerado, desbobinamento e alimentação da cortadora, foi considerado com pré-ajustagem

automatizada fora da máquina, estimada em 70 s (Haimer, 2024). Após o corte, a retirada da película, enrolamento do prepreg cortado foi estimado em 45 s; já a colocação no molde, desenrolamento e retirada da película do outro lado foi definido em 60 s (3M, 2024; Hexcel, 2013).

Figura 36 – Máquina automatizada de corte a laser de compósitos



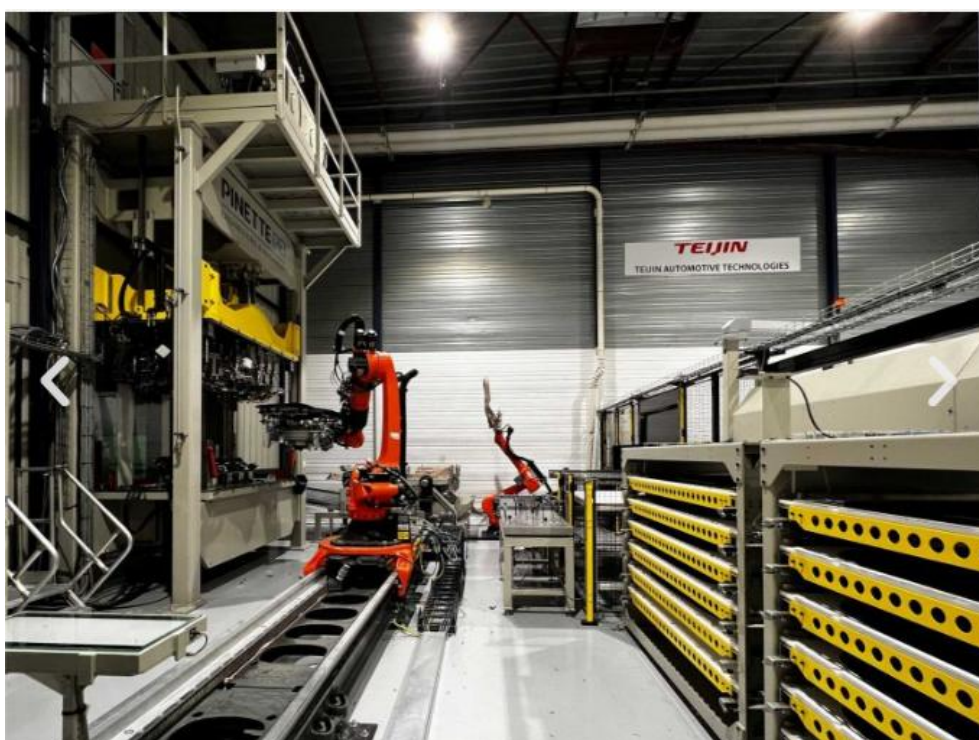
Fonte: Bullmer (2025)

Para o ajuste do prepreg na forma foram considerados: posicionamento do prepreg, adaptação à geometria da cavidade, correção de tensões, bolhas ou sobreposições e fixação inicial para laminação ou prensagem. Os fatores que influenciam o tempo de ajuste são: número de cavidades e insertos, curvatura e profundidade da geometria, espessura e flexibilidade do prepreg e método de aplicação (manual, semiautomático, robótico). As dimensões já foram especificadas e o método de aplicação será manual, realizado por dois operadores, conforme já descrito. A conformação apresenta desafios significativos relacionados ao atrito interlaminar e à restrição de cisalhamento, especialmente em geometrias complexas, fatores que impactam diretamente o tempo de ajuste do prepreg nos moldes, que pode variar de 45 a 120 s (Budelmann; Schmidt; Meiners, 2020; Dutta; Thibault; Åkermo, 2025). Os painéis foram agrupados em três níveis de complexidade para fins de simulação, adotando-se um valor de tempo de ajuste para cada grupo. Para o tempo de colocação das sobras do prepreg no compartimento refrigerado, foi considerado manuseio do material residual (Budelmann; Schmidt; Meiners, 2020), caminhada do operador com velocidade de 1,3 m/s (dentro da faixa de 1,2 a 1,5

m/s para caminhada normal) para ir e voltar da cortadora ao compartimento refrigerado (Giannoulaki; Christoforou, 2024) e o tempo de abertura e fechamento do compartimento (Osorio-Castañeda; Orejuela-Cabrera; Bravo-Bastidas, 2025).

Para a moldagem da casca do painel foi empregada a prensa SMC da Pinette PEI (Figura 37). Aqui foi desconsiderado o tempo de posicionamento no molde, pois é feito de forma automática pelo AGV e medido na simulação pela velocidade de deslocamento (0,6 m/s), aceleração e desaceleração (0,33 m/s) (Pinette PEI, 2024).

Figura 37 – Equipamento de moldagem por compressão do tipo SMC



Fonte: Pinette PEI (2024)

O ciclo de fechamento, prensagem e abertura da prensa determinaram o tempo do processo de moldagem. Seguem características da prensa SMC adotada (Pinette PEI, 2024):

- Tamanho da placa: até 4000 mm x 3000 mm;
- Capacidade: De 5.000 kN a 50.000 kN
- Abertura máxima: 3.000 mm;
- Altura máxima de compressão: 2.000 mm;
- Velocidade de fechamento máxima: 600 mm/s;
- Velocidade de trabalho máxima: 20 mm/s;

Velocidade de abertura máxima: 600 mm/s. Os moldes utilizados são aquecidos por compressão e apresentam superfície em alumínio com 10 mm de espessura (MDC, 2025) (Figura 38). O molde é fixo no AGV e o contramolde, na prensa SMC, que contém o sistema de aquecimento. Os moldes foram considerados pré-aquecidos à temperatura de 165°C, detalhado a frente, na cura do prepreg. Assim, o tempo de aquecimento dos moldes foi desconsiderado no tempo total do ciclo. O tamanho do par de painéis lado a lado define o tamanho da placa: 3000 mm x 2600 mm. A altura total de abertura é de 1400 mm, sendo 1250 mm a altura de trabalho ergonômica para o operário (média entre homens e mulheres), para trabalhos com altos requisitos para inspeção visual e habilidades motoras finas (Bosch-Rexroth, 2012), adotada para a altura do AGV com molde, mais 150 mm de distância de segurança (ABNT NBR 13930:2008). Porém, foi considerada que a prensa SMC já está aberta no momento da chegada no AGV, sendo assim, sem ter esse tempo computado na etapa.

Figura 38 – Molde de alumínio para equipamento SMC



Fonte: MDC (2025)

Para a altura de fechamento foi considerada a distância de segurança citada anteriormente de 150 mm (ABNT NBR 13930:2008). A altura de compressão é de 50 mm, metade da espessura de um painel acabado, assim, a profundidade de cada molde. A abertura após a moldagem é de 200 mm, 50 mm da distância de moldagem somada à distância de segurança, de modo que a prensa fique preparada para a moldagem do próximo painel.

O tempo de cura do material é definido pelo polímero usado, sendo seu comportamento reológico (endurecimento) similar aos derivados de petróleo. Esse sistema leva 60 s para aquecer a 60 °C, depois mais 25 s para aquecer até a temperatura de cura do prepreg, que é $\pm 85\%$ da Tg do epóxi (*glass transition temperature* – temperatura de transição vítrea), que é de 165°C (Wulfsberg *et al.*, 2014), ou seja, a temperatura de cura do prepreg é em torno de 140°C. Como mencionado, foi considerado que os moldes estão pré-aquecidos no momento da chegada do AGV e esse tempo não é somado ao ciclo.

O tempo de cura do prepreg de matriz epóxi reforçado por fibras lignocelulósicas varia entre 15 e 25 minutos a temperaturas entre 120 °C e 140 °C, dependendo da temperatura, densidade da fibra, teor de umidade e tipo de agente de cura, sendo ligeiramente superior ao de fibras sintéticas (como vidro ou carbono) devido à estrutura porosa e à absorção de resina das fibras lignocelulósicas (Somarathna *et al.*, 2024).

A remoção de rebarbas nas bordas dos moldes foi realizada por robô colaborativo com supervisão de dois operadores e emprega IA para detecção e acabamento das bordas, com tempo médio de 4,2 min por par de moldes. A interação humano-robô permite precisão dimensional e controle de qualidade em ambiente seguro e adaptável (Rahul; Chiddarwar, 2023).

A limpeza interna dos resíduos gerados pela rebarbação deve ser realizada pelo mesmo sistema automatizado integrado ao robô colaborativo, por aspersão e aspiração. O processo incluiu lavagem de cavidades internas, remoção de partículas soltas e secagem rápida, com tempo médio de ciclo de 2,8 min por par de moldes. Essa etapa garante a eliminação de contaminantes em superfícies internas, prevenindo falhas de adesão e garantindo qualidade dimensional para a montagem subsequente (Rahul; Chiddarwar, 2023).

Os tempos de instalações elétricas e hidrossanitárias foram estimados a partir de tempos dessas instalações apresentadas pelos Caderno Técnico de Composições (CEF, 2023a, 2023b).

A aplicação de adesivo nas bordas dos painéis foi realizada por robô colaborativo com sistema de dispensação automatizado. O tempo médio de aplicação é de 2,5 a 3,0 min, com controle de volume e largura do cordão de adesivo. O sistema permite aplicação contínua e uniforme ao longo das bordas, garantindo qualidade dimensional e preparação adequada para o fechamento (Guin *et al.*, 2019).

O fechamento dos moldes foi realizado por sistema hidráulico automatizado fixo no AGV, com controle de força e velocidade para evitar impacto nas bordas do painel. Sistemas hidráulicos para moldes de compósitos estruturais requerem perfis de velocidade controlados, com tempo de fechamento entre 6 e 10 segundos, dependendo da geometria e dos parâmetros de amortecimento, de forma a manter a integridade dimensional e a segurança do fechamento (Zheng *et al.*, 2025). O fechamento é finalizado na posição vertical para aplicação da espuma de PU.

O tempo de injeção da espuma PU é dada pelo fabricante do equipamento de dosagem de alta pressão (Hennecke, 2025) (Figura 39).

Figura 39 – Dosador modular de alta pressão para injeção de PU



Fonte: Hennecke (2025)

A etapa final do processo inclui desmoldagem automatizada, acabamento superficial, montagem complementar, inspeção dimensional e embalagem. A desmoldagem é realizada por sistema hidráulico integrado ao AGV, com tempo médio de 1,5 a 2,0 min por painel (Zheng *et al.*, 2025). O acabamento superficial é feito por robô colaborativo com micro retífica, levando cerca de 2,5 min (Rahul; Chiddarwar, 2023). A inspeção combina sensores ópticos e validação humana, com duração de 2 minutos (Salem *et al.*, 2025). A montagem complementar de

componentes secundários é realizada por robô com assistência de dois operadores, com tempo de 3 min (Budelmann; Schmidt; Meiners, 2020). Por fim, a embalagem automatizada é realizada em 1,5 min por painel (Guin *et al.*, 2019).

Devido à FlexBuild® ser um sistema inovador, algumas das etapas do processo de produção não podem ser estimadas nem mesmo por correlação. Para a previsão de tais etapas foi empregada ferramenta de IA com uso de RN, descrita no item a seguir e no capítulo de Resultados. Os tempos levantados e estimados são apresentados na Tabela 2 no capítulo de Resultados.

3.1.5 Método da investigação de cenários aplicando ferramenta computacional de VF apoiada por IA

Antes da virtualização do processo de fabricação na ferramenta de VF FlexSim®, foi realizado um estudo por meio de IA caracterizado pelo uso de RN com duas funções principais:

- Analisar a ordem e tempos das etapas de produção dos PMVV e estabelecer os componentes mais críticos em termos de tempo para fabricação em função da complexidade de cada painel;
- Gerar tempos ao longo do processo, os quais não foram conhecidos a partir de fabricantes dos equipamentos, da literatura, ou mesmo da fabricação de produtos similares, por meio da correlação de complexidade entre os tipos de painéis e suas etapas e as áreas de aplicação desses componentes.

A RN tem como variáveis de entrada os seguintes parâmetros:

- 1 - Características dos produtos a serem verificados, descritas no item 3.1.3 Painéis de vedação vertical da FlexBuild®;
- 2 - Discriminação das etapas de produção por tipo de painel para todos os painéis a serem analisados, apresentada no Apêndice B;
- 3 - Características gerais de produção, apresentadas no item 4.1 Sequência de Produção;
- 4 - Tempos estimados das etapas de fabricação dos PMVV da EIM, relacionados na Tabela 2 ao final do item 4.1.

Para que a RN reconhecesse as diferenças de tempo e processos, cada tipo de painel a ser fabricado foi caracterizado de forma individual associada em termos de especificações e etapas do processo e requisitos de projeto e materiais. Devido à grande quantidade e complexidade desses dados, estes foram incorporados à programação do algoritmo. Para cada etapa que compõe cada painel, foram inseridos tempos diferentes para cada tipo de painel, repetindo quando fossem iguais.

A partir dos dados de entrada, a RN retorna a quantidade de opções mais críticas solicitada como saída: os três tipos de painéis mais críticos para esta pesquisa, dentre os componentes utilizados para produzir uma tipologia específica da FlexBuild®; além dos tempos não conhecidos, que são as variáveis incógnitas. Nesta pesquisa, a RN foi empregada apenas para os painéis, mas pode ser extrapolada para todos os componentes da EIM estudada.

Com a associação de cada tipo de painel, das etapas do processo envolvidos e tempos conhecidos, utilizou-se o cálculo multivariacional para se estimar as variáveis incógnitas. Para esta pesquisa, elas foram os tempos para colocar cada tipo diferente de insertos, nos painéis onde esses são aplicados, e o tempo de fixação dos diferentes tipos de reforços e nervuras.

Os tempos de colocação dos insertos foram obtidos a partir da correlação das áreas dos inserto e do número de parafusos utilizados para a fixação de cada inserto com a complexidade do painel e dos tempos das outras etapas do processo de montagem de cada tipo de painel. A RN só considerou a retirada do inserto, mas o tempo deve ser considerado também no momento de sua colocação no molde no início do ciclo. Já para os tempos de colagem de reforços para fixação posterior de armários, quando aplicável, e montagem das nervuras, a complexidade e os outros tempos são correlacionados com comprimento de cada tipo de reforço ou nervura.

Os tempos encontrados foram empregados para realimentar a planilha de tempos e reprocessar as simulações dos três cenários de produção propostos para os PMVV da EIM estudada.

3.1.6 Cenários de fabricação e análise comparativa

Considerando as etapas do método da pesquisa apresentadas na Figura 28 no início do item 3.1 Etapas do Método, a etapa 6 Cenários de fabricação e análise comparativa foi desmembrada nas etapas indicadas na Figura 40.

Figura 40 – Fluxograma da subdivisão da etapa 6 do método



Fonte: Autora

F1 Elaboração do Modelo Conceitual

Com as etapas de fabricação definidas, foi elaborado o modelo conceitual segundo o método IDEF-SIM (Montevecchi *et al.*, 2010), indicado para projetos de simulação de processos de produção.

F2 Modelagem dos Cenários

A partir do modelo conceitual e da discriminação das etapas de produção por tipo de painel, procedeu-se a definição e modelagem dos cenários de *layout* fabril propostos, denominados Cenário 1 (C1), Cenário 2 (C2) e Cenário 3 (C3), sendo o C1 baseado no modelo básico fabril do tipo linear (por produto). As reformulações para os cenários seguintes são apresentadas no capítulo de Resultados. Para testes na ferramenta computacional de VF e do funcionamento da virtualização, os cenários propostos foram sendo desenvolvidos e simulados concomitantemente, com tempos arbitrados de 5 s para cada etapa do processo de fabricação de qualquer tipo de painel, para facilitar a visualização de deslocamento e execução de um ciclo completo, até que se ajustassem todas as configurações necessárias no FlexSim®.

Foram inseridos nos modelos, para todos os cenários, os elementos Recurso (*Source*), Fila (*Queue*), Processador (*Processor*), Combinador (*Combiner*), Separador (*Separator*), Operador (*Operator*), Robô (*Robot*), Nó de Rede (*NetworkNode*), Plano (*Plane*) e Saída (*Sink*), relacionados e descritos no item 4.3.2 Modelagem dos Cenários no capítulo de resultados.

Após a modelagem dos três cenários propostas, procedeu-se às simulações.

F3 Simulação dos Cenários

Nesta pesquisa não foi possível fazer o estudo da proporção entre quantidade de PMVV inteiros (PC, PR) para meio-painéis (MPC, MPR), nem da relação de painéis de porta (PP), de janela grande (PJG), janela alta (PJA), elétricos (PE, PRE) e hidráulicos (PH, PRH), mas somente dos três painéis mais complexos, identificados na etapa de estudo da RN.

Os três cenários foram então simulados, primeiro com tempos estimados (Tabela 2 ao final do item 4.1 Sequência de Produção), com o objetivo de entender e explorar as funcionalidades da ferramenta de VF e estudar os processos definidos. O AGV já estava pré-configurado com velocidade de 2 m/s, sendo sua aceleração e desaceleração de 1 m/s/s. Todas as simulações foram realizadas para um dia de trabalho de 8 horas ou 28800 s, das 8:00 h às 16 h ininterruptas, para efeito de estudo.

Ainda nesta etapa da simulação, foram identificadas as funcionalidades do FlexSim® consideradas mais adequadas para proceder às análises definidas, em termos de distância, fluxo, tempo e uso de recursos, os gráficos, relacionados na sequência em F4 Análise comparativa dos Cenários.

Posteriormente, procedeu-se a atualização dos tempos para os três tipos de painéis mais complexos, conforme as fontes de materiais e equipamentos citados no item 3.1.4 Método de sequência de produção e os tempos obtidos pela RN. A Tabela 5 (no item 4.3.3 Simulação dos Cenários) apresenta esses tempos compilados atualizados. Os três cenários foram simulados com os novos tempos, gerando os gráficos para análise e possibilitando a comparação das propostas.

F4 Análise comparativa dos Cenários

A partir dos dados gerados pelas simulações para os três painéis mais complexos, procedeu-se às análises de distância, fluxo, tempo e uso de recursos, comparando-se os três cenários propostos.

A análise dos fluxos foi realizada de forma visual, verificando fluidez, cruzamentos e segurança, conforme NR-12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos (Brasil. MTE, 2019).

Para a análise de distâncias foi empregado o gráfico de Distância de Viagem (*Travel Distance*) do FlexSim®. Porém, esse gráfico mede somente elementos do tipo Executores de Tarefas (*Task Executors*). Deste modo, para este modelo, foi possível medir somente o deslocamento do Operador CNC na etapa E2 CORTE, que desloca o material prepreg da cortadora CNC para o par de moldes sobre o AGV.

O AGV foi inserido neste modelo como Recurso Fixo (*Fixed Resource*), apesar de ser do tipo Caminhão (*Truck*) e possibilitar o deslocamento por conta própria e configurações como velocidade de deslocamento e capacidade máxima de transporte. Por isso não pode ser medido pelo gráfico de Distância de Viagem. Essa estratégia foi escolhida para garantir a entrada do veículo em tempos constantes, considerando a disponibilidade dos processadores na sequência. O deslocamento do AGV foi medido pelas distâncias de trajeto inseridas em cada cenário e são iguais para os três painéis no mesmo cenário.

Os tempos foram analisados por meio dos retornos do gráfico de Tempo de Permanência Composto (*Composite Staytime*), que apresenta o tempo que o item leva para atravessar um conjunto de recursos ou processos agrupados, desde a entrada até a saída, ou seja, o *leadtime* ou tempo de ciclo. Para esse modelo foram medidos os tempos de ciclo da entrada do par de moldes no AGV até sua saída, obtendo o tempo de ciclo do veículo, e da sua entrada até a saída do painel fabricado, para a obtenção do tempo de ciclo do produto.

Por meio da Tempo de Permanência individual (*Staytime*), foi possível medir o tempo de ciclo de cada elemento medido:

- E1 LIMPEZA (processador);
- E1 DESMOLDANTE E GELCOAT (processador);
- E2 CORTE (processador);
- E2 AJUSTE MATERIAL (combinador);
- E3 MOLDAGEM SMC E CURA DO MATERIAL PREPREG (processador)
- E4 MONTAGEM (separador);
- E4 FECHAMENTO (processador);
- E5 DESMOLDAGEM E INSPEÇÃO (separador);

E5 REPARO (processador);

E5 ACABAMENTO E EMBALAGEM (processador).

O uso de recursos, ou utilização das etapas, foi medido pelo gráfico de Estado (*State*), que apresenta as porcentagens de estado dos elementos, como em processamento, ocioso ou bloqueado. Foram medidos os mesmos elementos do gráfico de Tempo de Permanência individual.

A produtividade foi medida de três formas, todas para um dia de trabalho. O Rendimento (*Output*) retorna a quantidade de produto produzido em cada etapa do processo de fabricação, mesmo semiacabado. O gráfico de Trabalho Em Progresso Composto (*Composite WIP*) verifica desde a entrada (Prepreg) até a saída do processo (E5 ACABAMENTO E EMBALAGEM) e mostra a quantidade de produto em processamento, ao final do período, em cada uma das etapas. O de Saída por Hora (*Output by Hour*) mede o número de produtos fabricados em cada etapa do processo a cada hora.

A partir dessas ferramentas foram feitas as análises apresentadas nos resultados no item 4.3.4 Análise comparativa dos Cenários.

3.1.7 Proposta do modelo de fabricação

Com base nas análises dos cenários simulados apresentadas no capítulo de Resultados, foram propostas as alterações consideradas necessárias para um novo modelo de fabricação.

3.1.8 Conclusões e redação final

A partir da consolidação dos cenários analisados, das informações obtidas e dos resultados alcançados, foram identificadas as principais conclusões da pesquisa, delineadas possíveis direções para investigações futuras e elaborada a versão final da redação da tese.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados a sequência de produção definida, o emprego da ferramenta computacional baseada em RN para a definição dos painéis mais complexos a terem seu processo de produção virtualizado, além dos estudos e análise da simulação na ferramenta de VF FlexSim®.

4.1 Sequência de Produção

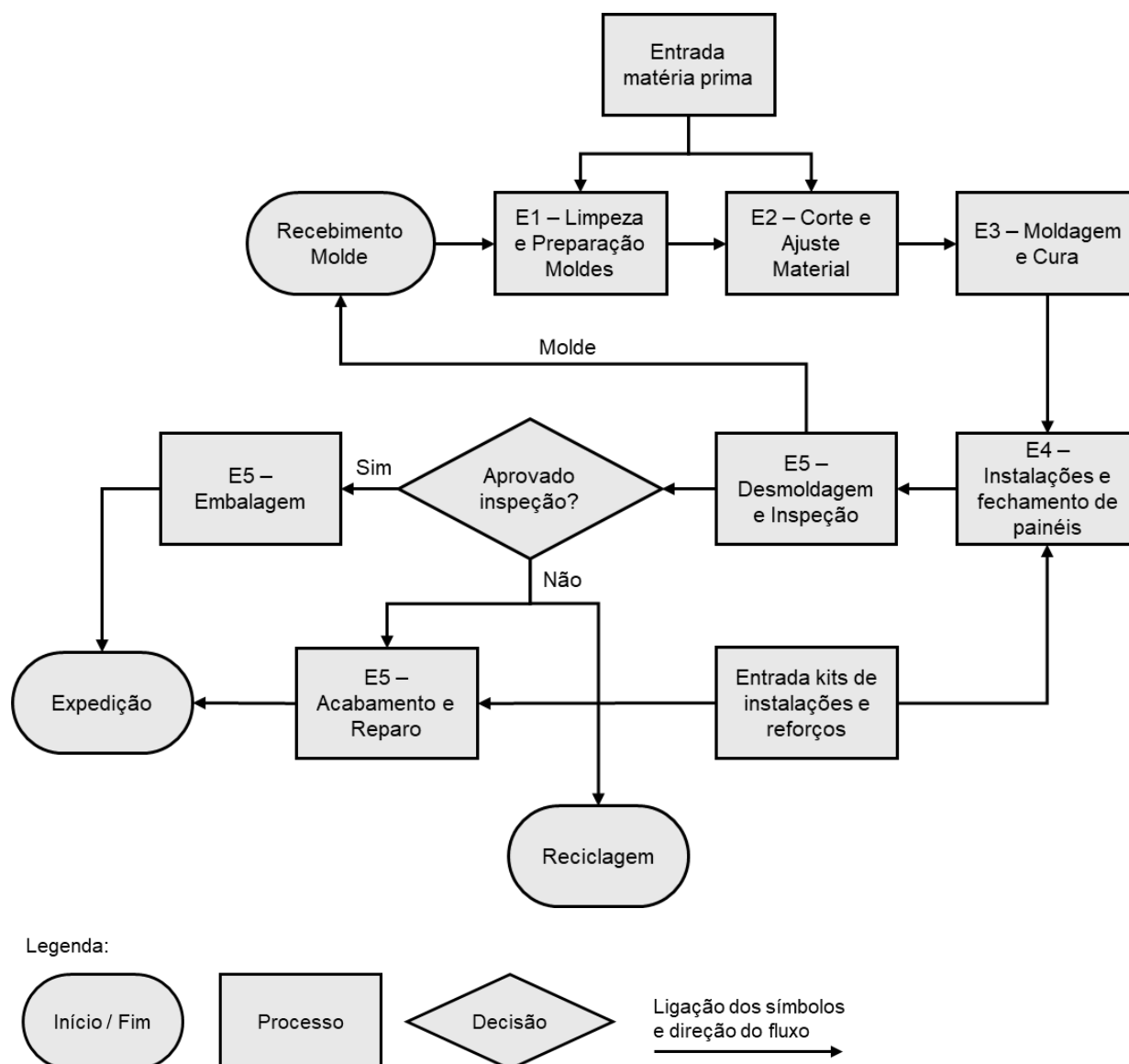
Conforme descrito no método, a partir da revisão da literatura, pesquisas em sites e consulta a fornecedores e fabricantes, foram definidas as etapas de fabricação, assim como o maquinário necessário, e propostos três cenários do processo de fabricação dos PMVV da EIM estudada, utilizados para as simulações. São apresentados ainda os tempos estimados das etapas, usados pela RN para o estudo da sequência de produção e complexidade das tarefas, considerando as restrições descritas.

O processo de fabricação dos PMVV da EIM estudada ocorre em cinco etapas principais, cujo fluxograma é apresentado na Figura 41:

- E1. Limpeza e Preparação dos moldes.
- E2. Corte e Ajuste de Material.
- E3. Moldagem e Cura SMC.
- E4. Montagem de instalações e Fechamento dos moldes para compor painéis completos.
- E5. Desmoldagem, Montagem complementar e Embalagem.

O ciclo de produção dos PMVV em CBRFJ se inicia no recebimento dos moldes do ciclo anterior ou de outro conjunto de moldes. O par de moldes é fixo ao AGV sobre trilhos, que faz toda a movimentação na planta fabril. De forma geral, na etapa E1 os incertos³ e moldes são limpos com jato de ar comprimido, os incertos são fixados novamente conforme tipo de painel e são aplicados o desmoldante e o *gelcoat*.

³ Enchimentos para fixação de algum complemento do painel ou para criar algum nicho na lâmina do material, como para instalação de caixas elétricas.

Figura 41 – Fluxograma do processo de produção dos PMVV em CBRFJ

Fonte: Autora

Na etapa E2 o prepeg é retirado do compartimento refrigerado, cortado por cortadora CNC na medida necessária para o molde, feitos os recortes adicionais para o tipo de painel que está sendo produzido, retirado o filme de proteção em uma das faces, posicionado nos moldes retirado o filme de proteção da outra face e encaminhado para a moldagem e cura. Na etapa E3 o material é prensado contra os moldes, é realizada a cura e os moldes são direcionados para a montagem.

Na etapa E4 é feita a rebarbação do material nas bordas dos moldes, retirada dos incertos de nichos, retirada de resíduos, fixação de reforços, nervuras e instalações (conforme aplicado para cada tipo de painel), fechamento por compressão das duas partes no próprio AGV, inserção

da espuma de PU e envio para desmoldagem, inspeção e embalagem. Na etapa E5 é feita a desmoldagem, montagem complementar de instalações, fixação de esquadrias, inspeção, correção de falhas superficiais ou rejeição (envio para reciclagem), identificação, embalagem e envio do painel para expedição e dos moldes para o início de um novo ciclo, encerrando assim o ciclo de produção de um painel.

A sequência de produção detalhada de cada um dos 11 tipos de painéis é apresentada no Apêndice B – Discriminação das etapas de produção por tipo de painel. O processo de fabricação foi relacionado para cada tipo de painel, em que todos os painéis são fabricados com prepreg pelo sistema SMC, cujo preparo está discretizado para cada tipo de painel, considerando tempos aproximados aos que ocorrem em linhas de produção de indústria de CPRFs avançados, como indústria automobilística e aeronáutica, considerando onde for aplicável equipamentos robóticos.

A seguir são relacionadas as características gerais de produção, considerando os diferentes dados apresentados:

- C1 - Onze painéis diferentes que devem ser fabricados em pares de moldes e posteriormente fechados, cujas metades são formadas pelo seccionamento na metade da espessura deles igual a 50 mm, cujas dimensões externas são altura de 2700 mm, largura de 1000 mm e espessura de 100 mm, para os códigos PC, PR, PH, PRH, PEL, PRE, PJG, PJA e PP, sendo que a largura muda para 500 mm nos painéis MPC e MPR, cujas descrições foram apresentadas no item 3.1.3 Painéis de vedação vertical da FlexBuild®;
- C2 - O material empregado na fabricação dos painéis é o CBRFJ prepreg em sistema com equipamentos de moldagem por compressão do tipo SMC;
- C3 - Entre cada código informado, referentes a tipos de painéis diferentes, existem variações de complexidade que em função dos tempos das atividades antecessoras e sucessoras causarão um tempo total de produção diferente para cada um, apresentados na Tabela 2;
- C4 - Os painéis MPC e PC só recebem nervuras de reforço interno nas duas metades que os compõem, sendo uma nervura com 2680 mm de comprimento colocadas na parte

- central ao longo da altura de cada tipo de painel, e possui abas com 30 mm de largura onde será aplicado adesivo para colar as nervuras no laminado (Figuras 29 e 30);
- C5 - Os painéis MPC e PC recebem ainda duas nervuras distantes 700 mm da parte inferior e da parte superior da altura, fixadas horizontalmente cruzando na parte central com a nervura longitudinal e depois os moldes com os meio painéis são unidos para formar o painel inteiro (Figuras 29 e 30), e o processo continua até que seja finalizado o ciclo, como explicado adiante;
- C6 - Os painéis MPR e PR, recebem antes das nervuras, chapas de reforço de madeira compensada em ambas as metades, medindo 480 x 200 x 12 mm para o MPR e 980 x 200 x 12 mm para o PR, respectivamente, depois as nervuras longitudinais e depois as transversais;
- C7 - Os painéis PH e PEL, durante o início do ciclo de fabricação de cada um, recebem dois insertos parafusados cada um deles, com dois parafusos em cada inserto, para criar as cavidades por onde os eletrodutos e as tubulações hidráulicas irão chegar aos terminais correspondentes, sendo um no topo desses painéis e outro na lateral em altura variada, conforme o tipo de painel, e ainda, conforme o terminal, como tomada ou interruptor;
- C8 - Os painéis PRH e PRE, além do que foi explicado no item C7, durante a montagem, inicialmente recebem reforços de chapas de madeira compensada em ambas as metades com 980 x 200 x 12 mm em cada metade, depois os eletrodutos, ou os tubos de água, e depois as nervuras longitudinais e transversais em ambas as metades de cada tipo;
- C9 - O painel PJG recebe um inserto no início do ciclo, fixado com 6 parafusos, em cada metade de molde, que posteriormente será o espaço para fixação da esquadria de janela grande (Figura 31);
- C10 - O painel PJG, no momento da montagem, tem os insertos retirados e depois recebe uma nervura longitudinal inferior com 800 mm de comprimento e abas de 30 mm que são coladas internamente no laminado centralizada ao longo da altura, recebe

ainda uma nervura longitudinal superior com 200 mm de altura e abas de 30 mm para colagem, centralizada ao longo da altura e uma nervura transversal disposta a 400 mm da parte inferior do laminado com comprimento de 980 mm sobreposta no centro sobre a nervura longitudinal, e recebe a inserção de quatro reforços de alumínio laminados medindo 100 x 30 x 5 mm no contorno do espaço para a fixação da janela;

- C11 - Após o fechamento das metades do painel PJG, na etapa de embalagem, a esquadria de janela grande é fixada e imobilizada no painel, antes de proceder com as tarefas da etapa de inspeção e embalagem no tópico E5 da descrição de fabricação, detalhada no Apêndice B, conforme mencionado;
- C12 - O painel PJA recebe um inserto no início do ciclo, fixado com 4 parafusos que posteriormente será o espaço para fixação da esquadria de janela alta;
- C13 - O painel PJA, no momento da montagem, tem os insertos retirados e depois recebe uma nervura longitudinal inferior com 1600 mm de comprimento e abas de 30 mm que são coladas internamente no laminado e duas nervuras transversais dispostas a 700 mm da parte inferior do laminado no molde e outra a 1400 mm da base inferior do laminado no molde com comprimento de 980 mm sobrepostas no centro sobre a nervura longitudinal e recebe a inserção de quatro reforços de alumínio laminados medindo 100 x 30 x 5 mm no contorno do espaço para a fixação da janela;
- C14 - Após o fechamento das metades do painel PJA, na etapa de embalagem, a esquadria de janela alta é fixada e imobilizada no painel, antes de proceder com as tarefas da etapa de inspeção e embalagem no tópico E5 da descrição de fabricação;
- C15 - O painel PP no início do ciclo recebe a aplicação dos insertos parafusados com 8 parafusos cada, em cada metade de molde, que irão criar o espaço sem material para poder fixar a porta (Figura 32);
- C16 - O painel PP durante a etapa de montagem, antes que as metades sejam unidas, tem seus insertos retirados e recebe uma nervura longitudinal curta centralizada, medindo 580 mm de comprimento, com abas de 30 mm para colagem, 2 nervuras

longitudinais laterais com 2100 mm e abas de 70 mm para colagem, e recebe quatro reforços internos de 200 mm x 30 mm x 5 mm de alumínio com uma camada do compósito empregado para embuti-los em pontos de fixação dos parafusos das portas, em cada metade de molde;

- C17 - Após o fechamento das metades do painel PP, na etapa de embalagem, a folha de porta é fixada e imobilizada no painel, antes de proceder com as tarefas da etapa de inspeção e embalagem no tópico E5 da descrição de fabricação;

Alguns parâmetros foram fixados para refletir uma indústria real, como o processo de aplicação de desmoldante e *gelcoat* nos moldes, que são realizados por *spray* em cabines isoladas, por robôs (Figura 35). O processo de corte de material será realizado por equipamento de corte CNC (Figura 36). Contudo, complementado por operador devido ao processo de retirada dos filmes protetores das faces do material pré-impregnado, ajuste e inspeção da fixação dos insertos pelos equipamentos robóticos, feitos nas etapas E1 e E2 do processo. Da etapa E2 para a etapa E3, e da etapa E3, para a etapa E4, tudo será automatizado, desde a movimentação dos moldes, fixos em AGV sobre trilhos (Figura 34), até o ajuste sob o equipamento SMC (Figura 37), conforme equipamentos relacionados no item 3.1.4 Sequência de produção, do capítulo de Materiais e Método.

O rolo de prepreg possui 1400 mm de largura e comprimento suficiente para produzir 10 painéis (ou 20 moldes). Essa restrição se deve à largura do tecido bidirecional de juta, que é fornecido na largura de 1400 mm.

Os painéis MPC e MPR terão na sua fabricação um corte transversal do material e depois dois cortes longitudinais para fabricar cada tipo. Os painéis PC, PR, PH, PRH, PEL e PRE terão dois cortes transversais e um corte longitudinal para fabricar cada um deles. Os painéis PJG e PJA, terão um corte transversal inicial, um corte longitudinal inicial, cada um deles, e quatro cortes de contorno onde se situam os insertos das janelas, nas duas metades do molde. Finalmente, o painel PP, terá um corte transversal, um longitudinal ao longo do comprimento total, e dois cortes longitudinais com 2100 mm de comprimento e um transversal com 800 mm de largura onde está posicionado o inserto que constitui o vão da porta. Os tempos de cada

tarefa de corte estão relacionados em E1 da Tabela 2 desta descrição de fabricação.

Para cada tipo de painel terá uma sequência que toma maior ou menor tempo. Assim, os tópicos e subtópicos descritos no Apêndice B devem ser considerados pelo código dos painéis e a sequência de etapas ocorre paralelamente em dois moldes, compostos cada um por uma metade de painel, que devem ser preparados simultaneamente para o mesmo painel. Nunca serão fabricados dois moldes diferentes, um de cada tipo de painel.

Em relação às nervuras, reforços e insertos, esses estão codificados como segue:

- a. Reforço do painel PR: REPR
- b. Reforço do painel MPR: REMPR
- c. Reforço de janela grande: RJG
- d. Reforço de janela alta: RJA
- e. Reforço de porta: RPP
- f. Nervura longitudinal: NLO
- g. Nervura transversal: NTR
- h. Inserto de hidráulica superior: IHS
- i. Inserto de hidráulica inferior: IHI
- j. Inserto de elétrica superior: IES
- k. Inserto de elétrica inferior: IEL
- l. Inserto de janela grande: IJG
- m. Inserto de janela alta: IJA
- n. Inserto de porta: IPP

Na sequência é apresentada a Tabela 2 com os tempos iniciais estimados das etapas de fabricação. Posteriormente os tempos foram realimentados por dados das fontes citadas no item 3.1.4 Método da sequência de produção, e pelos resultados dos estudos da RN.

Tabela 2 – Tempos estimados das etapas de fabricação dos PMVV da FlexBuild® (em segundos) (continuação)

Etapa	ID Painei	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Descrição / Código Painei	MPC	MPR	PC	PR	PH	PRH	PEL	PRE	PJG	PJA	PP
E4 MONTAGEM DE INSTALAÇÕES E FECHAMENTO DOS MOLDES PARA COMPOR PAINÉIS COMPLETOS												
E4.1	Rebarbação bordas	900	900	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1450	1400	1550
E4.2	Limpeza interior	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
E4.3	Retirada insertos	N/A	N/A	N/A	N/A	420	420	420	420	600	600	600
E4.4	Chapa reforço	N/A	420	N/A	420	N/A	660	N/A	660	N/A	N/A	N/A
E4.5	Instalações ou reforços esquadria	N/A	N/A	N/A	N/A	500	500	480	500	1200	1200	900
E4.6	Teste de pressão	N/A	N/A	N/A	N/A	300	300	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
E4.7	Nervuras longitudinais	480	480	480	480	480	480	480	480	500	420	480
E4.8	Nervuras transversais	900	900	900	900	900	900	900	900	520	900	420
E4.9	Adesivo bordas	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
E4.10	Fechamento molde	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
E4.11	Rotação molde	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
E4.12	Espuma PU	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
E4.13	Transporte	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
E4 Total		3.045	3.465	3.345	3.765	4.565	5.225	4.245	4.925	5.035	5.285	4.715
E5 DESMOLDAGEM, MONTAGEM COMPLEMENTAR E EMBALAGEM												
E5.1	Desmoldagem	780	780	780	780	780	780	780	780	780	780	780
E5.2	Retirada PU e acabamento	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
E5.3	Inspeção	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
E5.4	Correção falhas superficiais	780	780	780	780	780	780	780	780	780	780	780
E5.5	Tampar orifícios ou fixar esquadrias	N/A	N/A	N/A	N/A	240	240	240	240	360	360	480
E5.6	Selo <i>QR-Code</i>	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
E5.7	Fixação EPS	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
E5.8	Embalagem	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
E5.9	Engradado de madeira	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
E5.10	Transporte	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
E5.11	Retorno dos moldes início	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
E5 Total		4.305	4.305	4.305	4.305	4.545	4.545	4.545	4.545	4.665	4.665	4.785
TOTAL GERAL		11.130	11.550	11.895	12.315	14.315	14.975	13.995	14.675	15.895	16.145	15.815

Fonte: GETIn (2025)

4.2 Investigação de Cenários Aplicando Ferramenta Computacional de VF Apoiada por IA

A partir das especificações do produto, da sequência de montagem definida, das características gerais de produção e da estimativa inicial de tempos das atividades, ainda antes da virtualização, foi realizado estudo empregando uma ferramenta computacional baseada em RN para analisar a ordem de produção e estabelecer os componentes mais críticos em termos de tempo para fabricação e complexidade, além de fazer a correlação desses tempos e complexidade com dados informados para a obtenção de tempos não conhecidos.

Foram consideradas todas as etapas de produção incluindo limpeza das formas e insertos, fixação de insertos que vão em cada tipo nas duas metades do molde, aplicação de desmoldante e *gelcoat*, recorte e ajuste do material, recorte de rebarbas, limpeza, reforços de suporte e de fixação de esquadrias, retirada de insertos e montagem de instalações, nervuras diversas, fechamento, injeção de PU, desmoldagem, correções de finalização nas bordas, inspeção, fixação das esquadrias, correções de *gelcoat*, etiquetagem com o QR-Code, imobilização, proteção, embalagem e movimentações, conforme descrito de forma detalhada no item 4.1 Sequência de Produção.

A partir dos dados de entrada, a RN retorna as três opções mais críticas como saída, dentre os componentes utilizados para produzir uma tipologia específica da FlexBuild® (Figura 3 no item 1.4 Caracterização do Objeto de Estudo: FlexBuild®), além dos tempos para fixação e remoção dos insertos e para a montagem de nervuras.

A função considera os onze tipos de PMVV da EIM estudada, descritos no item 3.1.3 Painéis de vedação vertical da FlexBuild®, cujas características comuns de todos e individuais entre cada um foram consideradas pelo algoritmo para encontrar os três painéis mais complexos de fabricar em relação ao tempo para produzi-los. Por exemplo, todos os painéis possuem nervuras de enrijecimento internas, assim como todos são preenchidos com espuma rígida PU. Contudo, um painel não pode ser simultaneamente hidráulico e elétrico ou ser hidráulico e conter porta ou janela. Diante desses critérios, o algoritmo trabalhou as hipóteses possíveis de produção, associadas aos componentes internos individuais de cada tipo de painel, e comum a

todos, simultaneamente, para chegar à avaliação requerida, a qual foi selecionada para simular os cenários de projeto da fábrica que demande o menor tempo possível para fabricar o componente mais crítico.

A partir desse componente mais crítico, cujos detalhes como insertos, posicionamentos provisórios e fixações demandam maior quantidade de tarefas e eventualmente tempo, é possível extrapolar para os demais, os quais serão menos complexos em todos os aspectos, como molde, montagens parciais e inserções.

O algoritmo não verifica o menor percurso, nem verifica se as etapas E1 a E3 devem ser feitas sequencialmente ou aos pares. Essa alternativa depende do *layout* fabril e é iterativa, ou seja, depende de quesitos como posição e quantidade de estoques de suprimentos (almoxarifado descentralizado?), capacidade de produção dos equipamentos SMC, tempo de expansão e cura do PU expandido no interior dos painéis, que por sua vez depende da formulação dos dois componentes que reagem entre si, ou como é denominado, sistema PU, e da capacidade e velocidade da etapa E5, que pode ter mais de uma ocorrendo em paralelo. Isso foi possível estimar a partir da simulação dos cenários fabris, escopo deste projeto e apresentado no item seguinte.

O algoritmo atua neste aplicativo específico. Isso é feito caso a caso, ou seja, outro componente, o aplicativo terá que ser reformulado. E se incluir mais de um tipo, por exemplo, painéis de pavimentos, muda novamente.

Segue demonstração do uso da RN:

4.2.1 Algoritmo RN para PMVV da EIM

Entradas

- a. Quantidade de tipos de painéis a serem fabricado e caracterização do produto
- b. Etapas de produção para cada um dos tipos de painéis
- c. Características gerais de produção
- d. Tempos de cada etapa

Rotina de cálculo

- a. Os tempos são ajustados conforme as características específicas de cada painel.
- b. A complexidade final é calculada multiplicando a quantidade pelo tempo total estimado de produção.
- c. Os percursos são calculados admitindo um dos cenários preliminares e extrapolado pela RN.

Saída:

- a. Três painéis com maior complexidade, baseado nos tempos totais ponderados pela quantidade de componentes e complexidade de cada etapa de cada tipo de painel.
- b. Tempos para colocar cada tipo diferente de insertos, nos painéis onde esses são aplicados, e o tempo de fixação dos diferentes tipos de reforços e nervuras.

O algoritmo como foi elaborado criou uma análise baseada na complexidade de tarefas por tipologia de painel, pelos diferentes tempos atribuídos às tarefas inerentes à produção de cada painel, e aplicou, a partir de considerações como tempo médio de paradas técnicas, interrupções imprevistas (falta de energia ou defeito de equipamentos), para criar a RN.

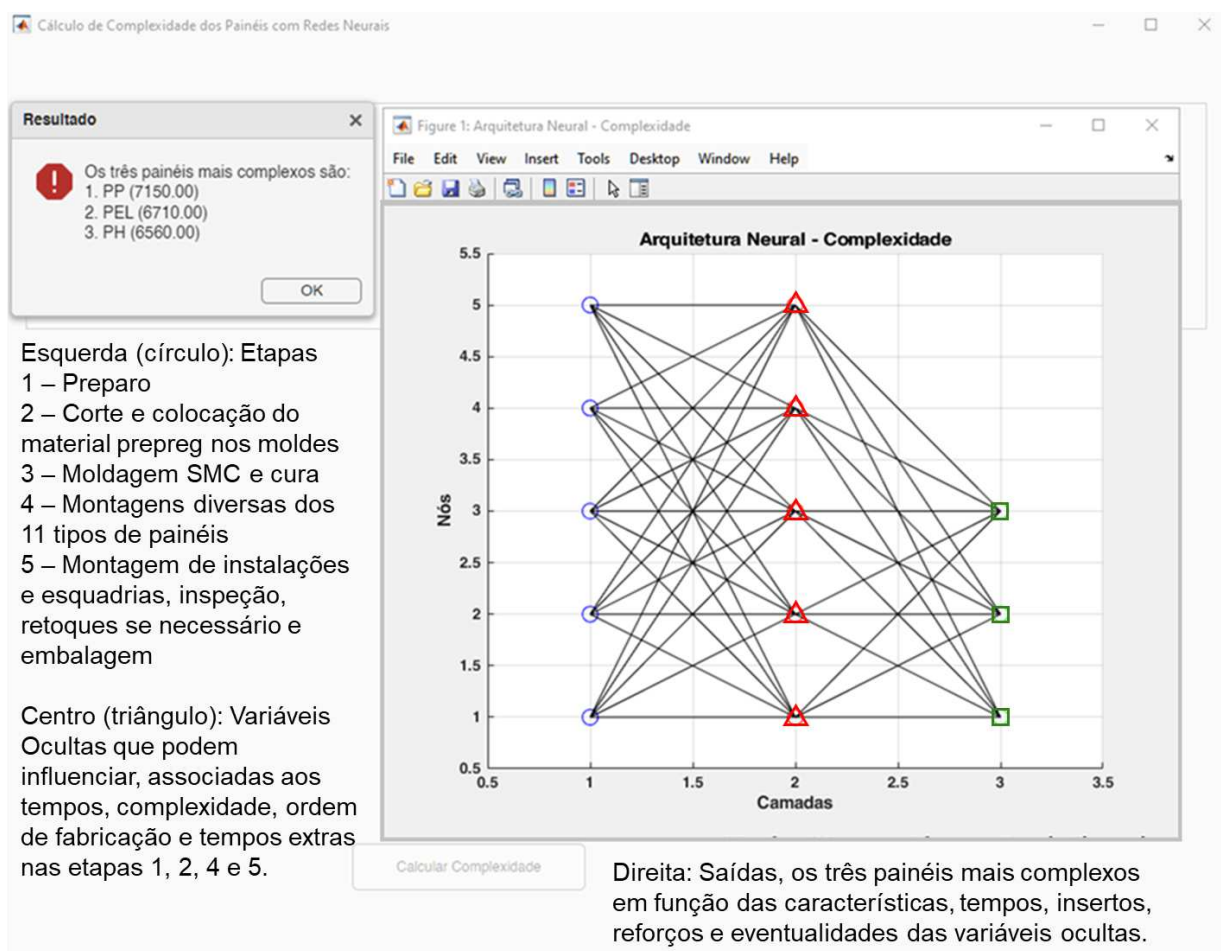
Ao seleccionar o primeiro painel, o algoritmo reprocessa as variáveis de entrada e as ocultas, desconsiderando etapas de produção dos painéis que possuam complexidade e similaridade com o primeiro painel escolhido, para poder verificar o segundo tipo de painel mais complexo. Isso ocorre iterativamente até que o programa atinja o limite que o usuário impõe, isto é, quantos painéis devem ser seleccionados, como parte da entrada de dados.

Com os dados de entrada, foram inseridas as características principais de cada painel, isto é, se lisos, com recortes, com nichos para inserção de tomadas ou conectores hidráulicos, com reforços internos, e outras partes que seriam exclusivas de cada painel especificamente. Por exemplo, painéis de esquadria de porta e janela, possuem reforços laterais curtos em vários pontos onde os parafusos de fixação das esquadrias devem fixar, para manter a rigidez ao longo da vida útil do componente.

As partes comuns como recorte ao longo da altura foram mantidas iguais para todos os painéis, enquanto na largura, foram agrupadas entre meio-painel e painel inteiro.

A Figura 42 mostra o resultado da primeira análise da RN empregada, demonstrando como mais complexos os painéis PP, PEL e PH.

Figura 42 – Cálculo de complexidade de painéis da primeira versão da RN



Fonte: GETIn (2025)

O algoritmo calculou a existência de cinco variáveis ocultas, sendo uma para cada uma das etapas de produção, isto é, em cada compartimento, desde a preparação até a retirada do molde e ajustes finais. Essas são variáveis aleatórias como falta de energia, repositor de fibra esvaziado, ou material de desmoldagem e *gelcoat* em falta no repositor, ou ainda a falta do controlador de algum robô. Ou seja, são as variáveis incontroláveis do sistema.

O algoritmo passou por ajustes e após a revisão e aprofundamento da RN, em que foi inserida mais uma camada de variáveis ocultas, ela retornou de forma mais realista os resultados que poderiam ser potencialmente mais complexos, uma vez que a manipulação e instalação de portas e janelas é uma tarefa que exige maior demanda de tempo para aferições diversas, antes da fixação definitiva. Os kits hidráulicos e elétricos, por virem já pré-instalados com os chicotes de fios no interior e conectores rápidos nas extremidades, ainda que seja necessário realizar

alguns testes locais de passagem de corrente ou pressão por ar comprimido, requerem menor tempo de execução.

Outro parâmetro que foi inserido no algoritmo como fator desconhecido foi o tempo dispendido para aderir as nervuras nas cavidades dos laminados dos pares de meio-painel para cada tipo de painel. Para essa estimativa por parte da RN foram dados os comprimentos totais de nervura por tipo de painel, que pode ser calculado. Outra tarefa que não havia tempo previsto foi a colocação e retirada dos insertos móveis, os quais criam as cavidades e nichos para tomadas, vãos das esquadrias e os acessos às conexões hidráulicas. Todos eles são parafusados conforme indicado pelos fabricantes de moldes diversos. Esses detalhes foram fornecidos à RN sob a forma de área, de quantidade de insertos e de parafusos e a partir de alguns dados de fornecedores usados como base, ela estimou esses tempos, conforme mostra a Tabela 3.

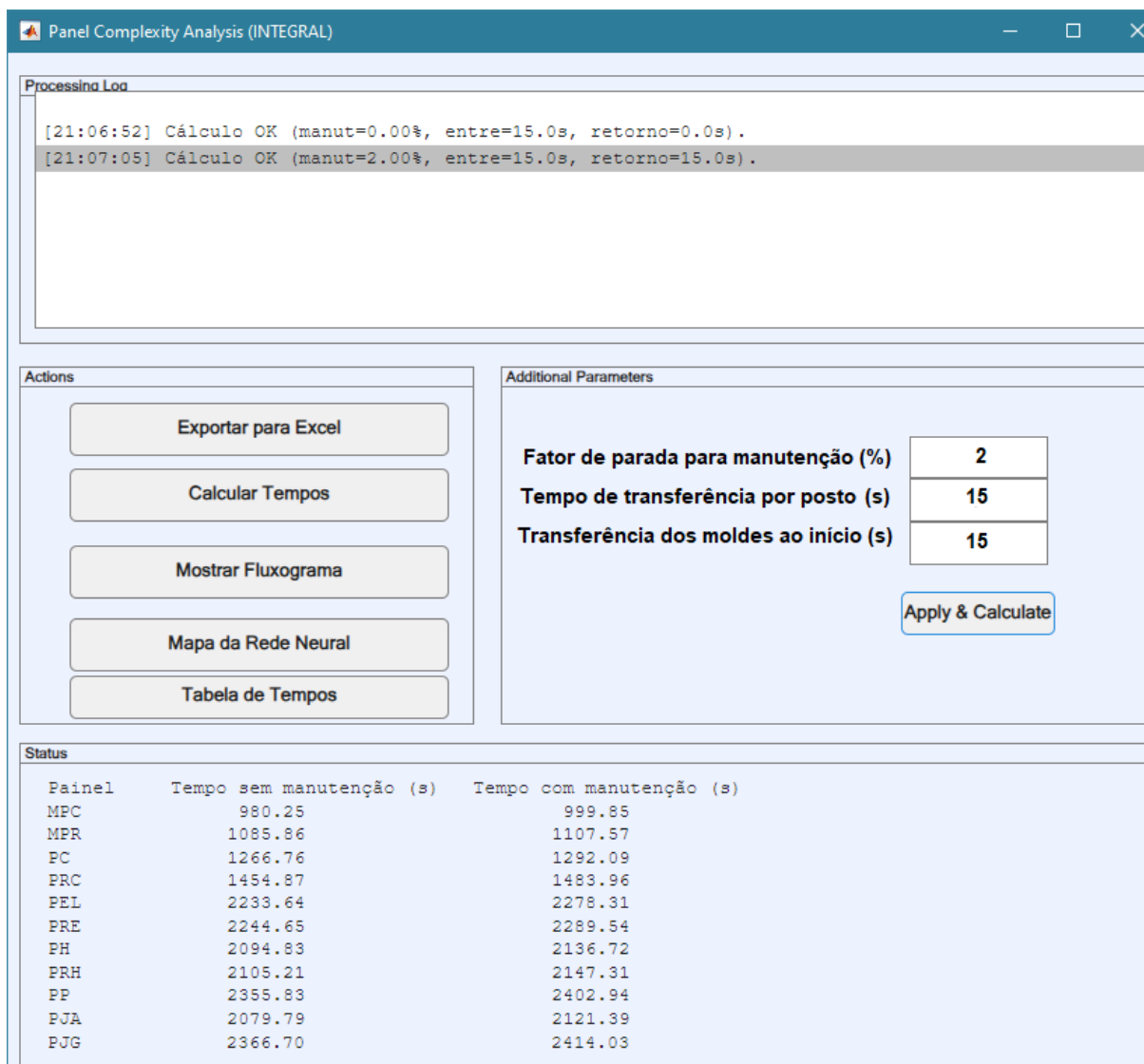
O algoritmo final apresenta a janela de uso mostrada na Figura 43. Na parte superior aparecem os dados inseridos pelo usuário para efetivar o cálculo, na parte central à esquerda os botões para realizar os cálculos, gerar os gráficos e exportar os dados para planilha Excel e à direita três parâmetros que foram introduzidos para manter coerência com o processo produtivo. O primeiro trata das paradas para manutenção preventiva, que foram estabelecidas entre 0% e 2.5% do tempo unitário de produção por painel.

O segundo parâmetro é o tempo de transferência do par de moldes de um posto de trabalho para o sucessor e o último trata do tempo de deslocamento do par de moldes vazio da área de expedição para o reinício do ciclo. Esses parâmetros poderão variar conforme o tipo de movimento do sistema de propulsão, aceleração e desaceleração. Esses tempos são invariáveis por tipo de molde.

A Tabela 3 é gerada pela RN, compondo os tempos inseridos na ferramenta e extrapolados. As linhas em cinza, com tempos de remoção dos insertos e de montagem dos reforços e das nervuras, foram calculadas pela RN e ao final, para realizar a análise de complexidade, ela gerou o parâmetro de majoração da complexidade, na última linha em cinza, uma taxa de complexidade em função das nervuras e dos insertos e dos tempos das outras

etapas, utilizados como dado de entrada intermediário para a geração do tempo total de produção de cada tipo de painel, que é apresentado na Figura 44 na sequência.

Figura 43 – Estimativas de tempos retornadas pela RN



Fonte: GETIn (2025)

Ao inserir os dados que se queira, o usuário clica para gerar os tempos. Se houver algum percentual de parada para manutenção, serão gerados pares de gráficos de barra, do contrário somente um gráfico é apresentado, conforme mostra o gráfico da Figura 44, que foi o resultado efetivo encontrado pela RN para todos os painéis considerados, levando em conta as informações e dados obtidos junto aos fabricantes de equipamentos, robôs industriais, todos aplicáveis ao sistema produtivo proposto neste trabalho.

Tabela 3 – Tempos inseridos na RN e gerados (continua)

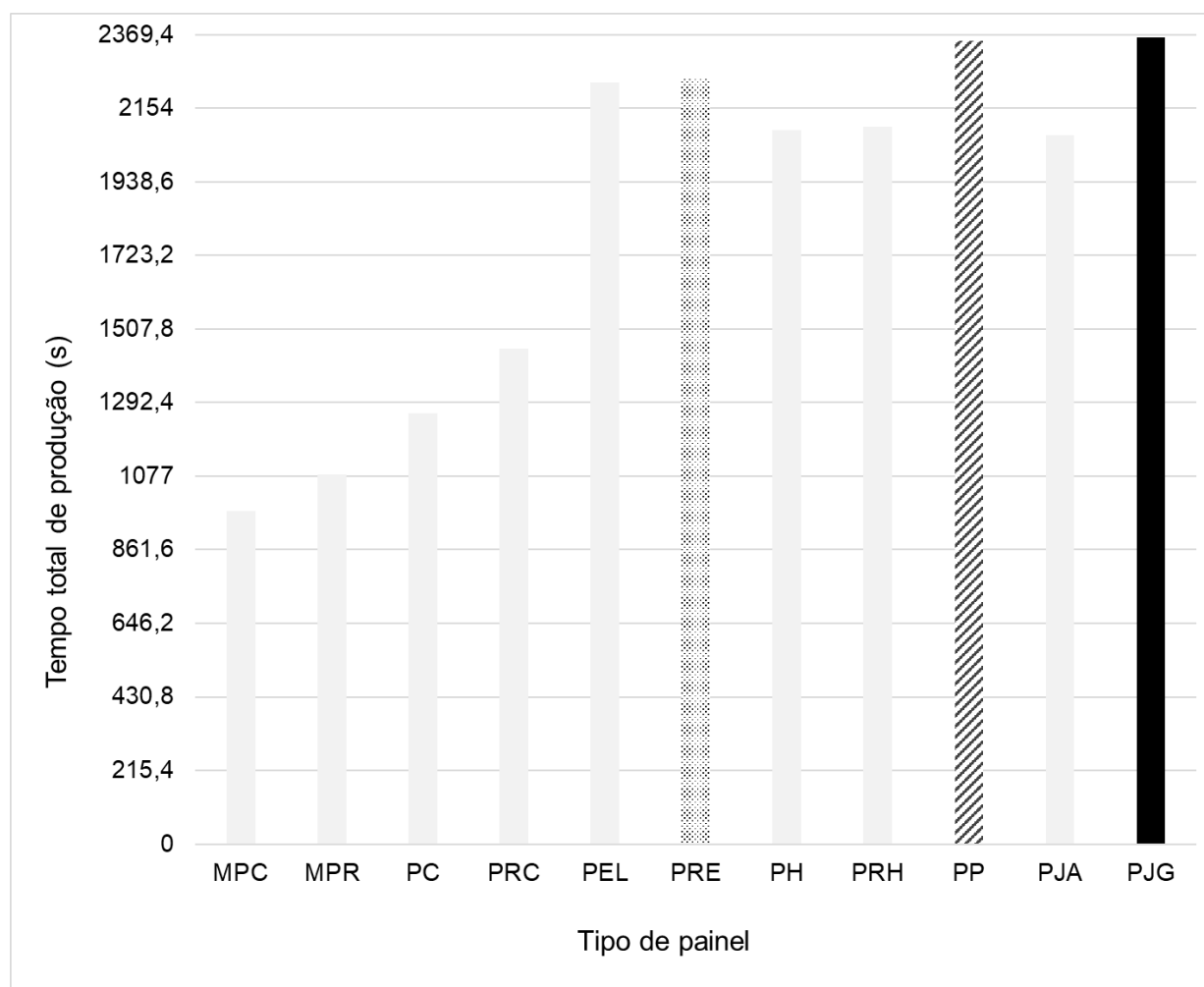
PARTES E ÁREAS ENVOLVIDAS NO PROCESSO	MPC	MPR	PC	PRC	PEL	PRE	PH	PRH	PP	PJA	PJG
Área para limpeza \ par de molde (m²)	3,3600	3,3600	6,1600	6,1600	6,1600	6,1600	6,1600	6,1600	2,3800	5,2600	3,6400
Área limpeza insertos \ par de molde (m²)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1200	0,1200	0,0800	0,0800	2,0400	1,1200	1,8400
Tempo de setup pelo complexidade \ par de molde (s)	20,0000	20,0000	20,0000	20,0000	25,0000	25,0000	25,0000	25,0000	30,0000	30,0000	30,0000
Área aplicar desmoldante \ par de molde (m²)	3,3600	3,3600	6,1600	6,1600	6,1600	6,1600	6,1600	6,1600	2,3800	5,2600	3,6400
Area p/ aplicar gelcoat \ par de molde (m²)	3,3600	3,3600	6,1600	6,1600	6,1600	6,1600	6,1600	6,1600	2,3800	5,2600	3,6400
Quantidade insertos metálicos \ par de painel	0	0	0	0	4	4	3	3	8	6	10
Quantidade parafusos p/ total insertos \ par de painel	0	0	0	0	8	8	6	6	40	20	30
Comprimento de corte de material \ par de painel (m)	7,80	7,80	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	9,20	19,00	12,00	12,80
Tempo de setup pelo complexidade \ par de molde (s)	10,0000	10,0000	10,0000	10,0000	15,0000	15,0000	15,0000	15,0000	20,0000	20,0000	20,0000
Quantidade de segmentos de corte \ par de painel	19	19	18	18	18	18	18	18	24	22	22
Comprimento total nervura \ par de painel (m)	8,00	8,00	16,30	16,30	16,30	16,30	16,30	16,30	6,80	13,40	15,40
Volumes líquidos internos (m³)	0,12241	0,12052	0,24640	0,23842	0,24625	0,23827	0,24627	0,23829	0,15954	0,22639	0,18799
Quantidade de nervuras por painel completo	8	8	10	10	10	10	10	10	24	16	18
TEMPOS DE EXECUÇÃO											
Tempo p/ transporte entre postos de trabalho (s)	Variável com distâncias e risco. Velocidade média do AGV entre 0,4 e 1 m/s (considerado 0,6 m/s, acel/desacel de 0,33 m/s)										
Tempo limpeza \ par de molde (s)	55,0000	55,0000	65,0000	65,0000	85,0000	85,0000	85,0000	85,0000	105,0000	105,0000	105,0000
Tempo limpeza insertos \ par de molde (s)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6000	0,6000	0,4000	0,4000	10,2000	5,6000	9,2000
Tempo p/ aplicar desmoldante \ par de painel (s)	22,02	22,02	23,70	23,70	28,70	28,70	28,70	28,70	31,43	33,16	32,18
Tempo p/ secar desmoldante \ par de molde (s)	900,00	900,00	900,00	900,00	900,00	900,00	900,00	900,00	900,00	900,00	900,00
Tempo p/ aplicar gelcoat \ par de painel (s)	21,01	21,01	21,85	21,85	26,85	26,85	26,85	26,85	30,71	31,58	31,09
Tempo p/ curar gelcoat \ par de molde (s)	660,00	660,00	660,00	660,00	660,00	660,00	660,00	660,00	660,00	660,00	660,00
Tempo cortes \ par de molde (s)	156,0000	156,0000	151,3333	151,3333	156,3333	156,3333	156,3333	156,3333	219,6667	194,0000	195,3333
Tempo SMC fechar/prensar/abrir \ par molde(s)	25,5833	25,5833	25,5833	25,5833	25,5833	25,5833	25,5833	25,5833	25,5833	25,5833	25,5833
Tempo de cura do prepreg epóxi com fibra	900,0000	900,0000	900,0000	900,0000	900,0000	900,0000	900,0000	900,0000	900,0000	900,0000	900,0000
Tempo p/ fixar insertos\metade (segundo)	0,00	0,00	0,00	0,00	247,00	248,00	184,00	185,00	792,00	389,00	589,00
Tempo p/ fixar reforços \ unidade (segundo)	0,00	180,00	0,00	240,00	0,00	240,00	0,00	240,00	540,00	440,00	480,00
Tempo p/ montar kit elétrico \ par de painel (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	244,00	244,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tempo p/ montar kit hidráulico \ par de painel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	413,00	413,00	0,00	0,00	0,00
Tempo p/ retirar insertos \ metade (s)	0,00	0,00	0,00	0,00	247,00	589,00	184,00	185,00	589,00	389,00	589,00
Tempo p/ fixar nervuras \ par painel (s)	200,0000	201,0000	412,0000	414,0000	420,0000	422,0000	418,0000	420,0000	187,0000	362,0000	420,0000
Tempo injeção PU \ tipo painel montado (s)	41,74922	41,10463	83,4285	80,7266	83,3756	80,6737	83,3837	80,6818	54,0192	76,6522	63,6505
Tempo p/ fechamento hidráulico (s)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Parâmetro de majoração da complexidade	1,00000	1,01500	1,0250	1,04500	1,0600	1,07500	1,0500	1,06500	1,0900	1,08000	1,0950

Tabela 3 – Tempos inseridos na RN e gerados (continuação)

DADOS DE REFERÊNCIA P/ CÁLCULO		
Velocidade de limpeza de moldes e insertos	0,2	m²/s
Velocidade de aplicação de desmoldante LEBOT I A6	0,6000	m²/s
Velocidade de aplicação de gel LEBOT I A6	0,3000	m²/s
Velocidade de corte CNC laser R90	0,6	m/s
Tempo injeção PU em volume bruto 1/2 painel	42,00	s
Tempo de injeção PU em volume bruto painel inteiro	84,00	s
Volume interno bruto de meio-painel (2 metades)	0,12315	m³
Volume interno bruto de painel inteiro (2 metades)	0,24809	m³
Área tubos por painel (2 metades)	0,00004	m²
Área nervura por painel (2 metades)	0,00021	m²
Reforço por painel (2 metades)	0,00798	s
Área de janela grande	0,05859	m²
Área de porta	0,08789	m²
Área de janela alta	0,02093	m²

Fonte: GETIn (2025)

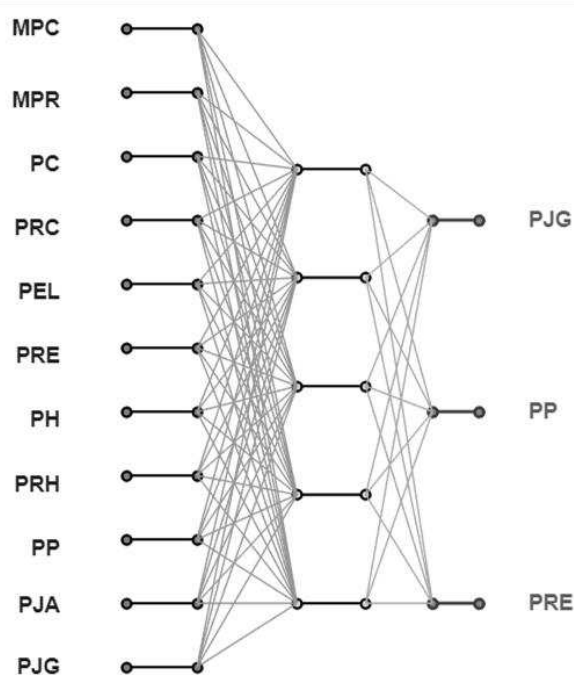
Figura 44 – Gráfico de complexidade dos painéis emitido pela RN, considerando o tempo total de produção



Fonte: GETIn (2025)

O painel PJG (barra preta), demandou maior tempo, o painel PP (hachura inclinada) foi o segundo mais demorado para produzir e o painel PRE (hachura pontilhada), o terceiro painel mais demorado para fabricação. O eixo vertical do gráfico indica os tempos totais por painel calculados pelo algoritmo.

A Figura 45 mostra o fluxo de processamento da RN, conforme já descrito anteriormente, de acordo com os dois parâmetros desconhecidos, os quais ela analisou e determinou os tempos para computar todas as tarefas de produção de cada painel.

Figura 45 – Mapa da RN com duas camadas ocultas

Fonte: GETIn (2025)

À esquerda são os dados de entrada para elaborar a comparação e análise. Na região central, as variáveis ocultas. Neste ponto o algoritmo utilizou dois métodos de mínimos quadrados associados a interpolações não-lineares para realizar as avaliações e estudos de convergência, depois elencou com ponderações em função das áreas totais dos pares de moldes, das áreas de material compósito, do comprimento total de nervuras por tipo de painel, e da quantidade de insertos de cada painel que possui os mesmos. Assim construiu o parâmetro de complexidade que aplicou nas variáveis e incógnitas ponderando entre valores conhecidos e desconhecidos por similaridade.

Não foi possível implementar o sistema de controle e contagem de iterações de cálculo para verificar o grau de recorrência utilizado pelo modelo feito em MATLAB. Também não foi possível estabelecer o critério de análise de robustez, devido à limitação de tempo.

A partir da análise na versão final do algoritmo para esta pesquisa e da indicação dos painéis mais complexos em termos de tempo de produção, foram modelados os cenários para os três painéis indicados e simulados na ferramenta de VF FlexSim®. No item seguinte são apresentados os resultados da simulação dos três cenários propostos com os tempos estimados inicialmente e com os tempos ajustados.

4.3 Virtualização, Simulação e Análise do Processo de Fabricação

Para a fase de virtualização, simulação e análise do processo de fabricação dos PMVV da EIM estudada, procedeu-se com quatro etapas, conforme Figura 40 e descrição no item 3.1.6 Cenários de fabricação e análise comparativa, do capítulo anterior de Materiais e Método, como se segue:

F1 Elaboração do Modelo Conceitual

F2 Modelagem dos Cenários

F3 Simulação dos Cenários

F4 Análise comparativa dos Cenários

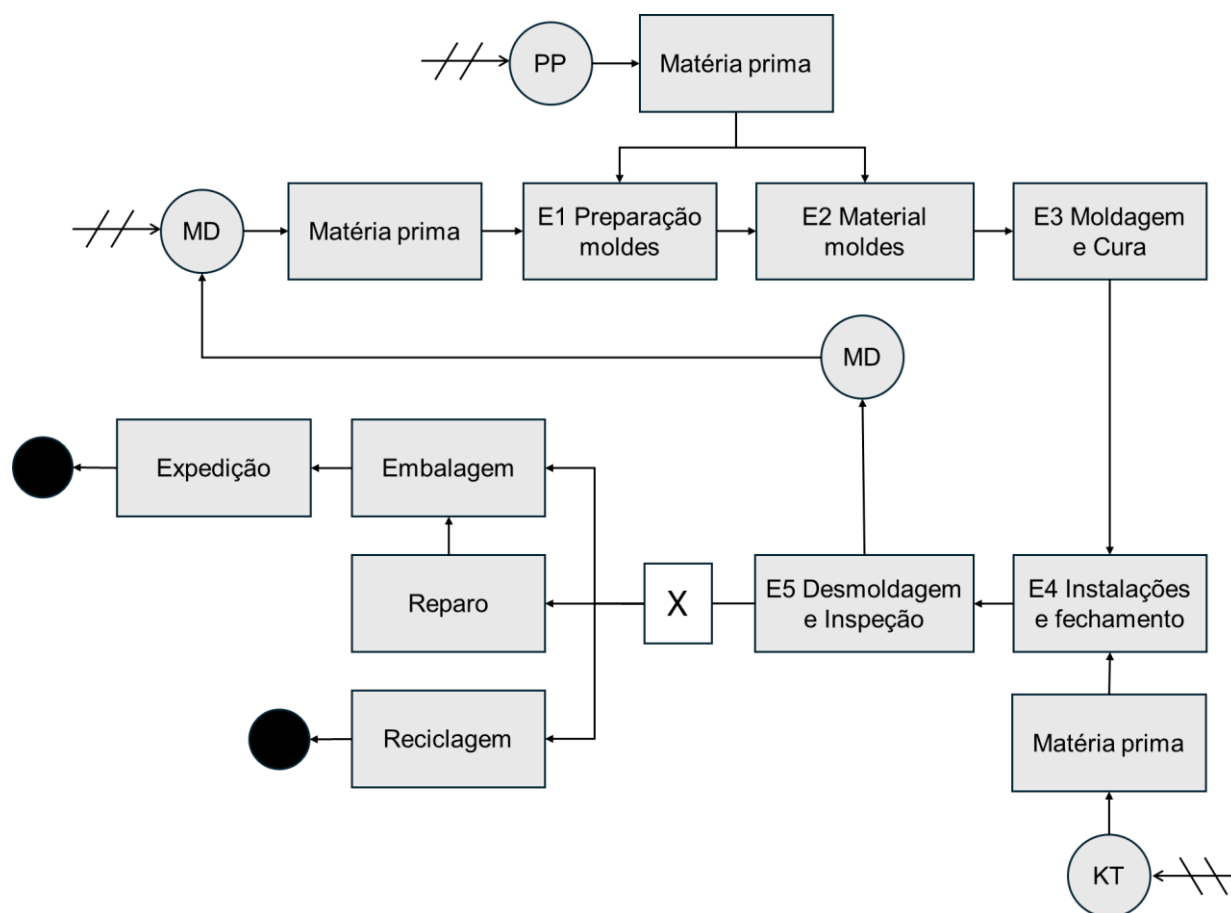
A seguir são apresentados os resultados de cada etapa desta fase da pesquisa.

4.3.1 Elaboração do Modelo Conceitual

Considerando as cinco etapas do processo de produção dos PMVV da EIM definidas e detalhadas no Apêndice B e o fluxograma do processo apresentado na Figura 41 do item 4.1 Sequência de Produção, foi traçado o modelo conceitual indicado na Figura 46.

A planta fabril apresenta um almoxarifado central, que não foi representado na simulação, e se divide em almoxarifados secundários próximos às estações de trabalho.

O início do ciclo acontece na entrada da etapa E1 Preparação moldes, onde entra o veículo AGV sobre trilho com o par de molde de um painel, acoplado no veículo, e faz o deslocamento durante as etapas do processo até a etapa E5 Desmoldagem e Inspeção, quando o painel é desmoldado e o AGV retorno vazio ao próximo ciclo. No mesmo local onde são armazenados os AGVs com os moldes, ficam também os kits de insertos removíveis para criação de nichos de instalações e aberturas para as esquadrias.

Figura 46 – Modelo conceitual do processo de produção dos PMVV da EIM**Legenda:**

MD: Molde fixo no AGV e insertos

PP: Prepreg, desmoldante e gelcoat

KT: Kits de instalações, reforços, fibra, adesivo, acabamentos de instalações e esquadrias

Fonte: Autora

A segunda entrada de matéria prima é posicionada próxima à estação de trabalho da etapa E2 Material moldes, e armazena o desmoldante e o *gelcoat* para a Etapa E1 e o material da casca do painel, o prepreg, para a etapa E2. A terceira entrada de matéria prima é localizada próxima à etapa E4 Instalações e fechamento, e armazena para a esta etapa: kits elétricos e hidrossanitários; reforços de madeira compensada para fixação de armários, aderidos com adesivo; reforços de alumínio para fixação de esquadrias, aderidos com parafusos; fibra para sobrepor os reforços juntamente com o adesivo; adesivo; parafusos e dobradiças. Para a etapa E5 esse local armazena: acabamentos de instalações, esquadrias, portas e janelas; resina para pequenos reparos nos painéis após a inspeção; material para embalagem e etiquetas com código QR-code de identificação de cada produto.

Na etapa E5, após a desmoldagem, o AGV retorna ao ciclo e é feita a inspeção de qualidade no painel, quando é tomada uma decisão: aprovado e enviado para acabamento, instalações complementares e embalagem (95%); identificados pequenos defeitos e feitos os reparos (4%); ou rejeitado com grandes defeitos e enviado para reciclagem (1%). As porcentagens de cada decisão foram arbitradas para efeito de simulação.

Nos painéis que são aprovados, são feitas as instalações complementares (como acabamentos de instalações e fixação de esquadrias caso tenha no tipo de painel), acabamento, embalagem, etiquetagem e encaminhamento por robô para o estoque de expedição, encerrando o ciclo. Os painéis que passam por reparo, recebem nova inspeção e caso aprovados vão para a continuidade do processo. Os painéis que são rejeitados são enviados para a reciclagem, onde se encontra outro ponto de encerramento do ciclo.

4.3.2 Modelagem dos Cenários

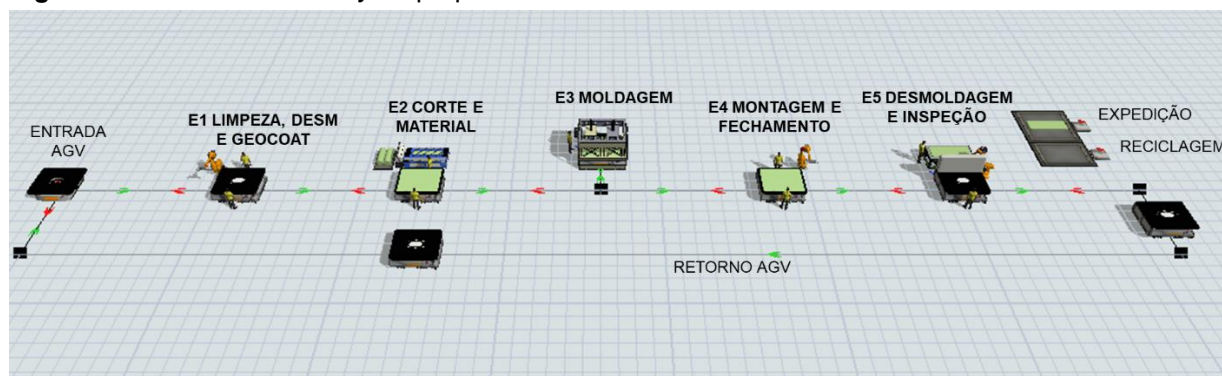
A partir do modelo conceitual apresentado anteriormente, foram elaboradas três propostas de cenários fabris para a produção dos PMVV da EIM estudada, cenários C1, C2 e C3, ainda sem diferenciação entre os tipos de painéis. A modelagem com concomitante simulação com 5 s por etapa do processo de fabricação permitiu a visualização da virtualização de todo o ciclo em detalhes e solução de cada problema técnico da ferramenta de VF que foram surgindo no decorrer da construção dos modelos.

Analisando o modelo conceitual e o tipo de produto a ser fabricado, foi definida para o Cenário C1 a configuração de *layout* do tipo linear ou por produto, com algumas atividades acontecendo em paralelo. Segundo Pansonato (2020), Silvestri et al. (2025) e Villar e Nóbrega Júnior (2014), nesta configuração, a disposição física das máquinas e equipamentos obedece, em certa medida, ao fluxo do processo produtivo (Figura 14 do item 2.4 Projeto de Layout de Instalações).

Nessa primeira configuração, as estações de trabalho foram dispostas em linha reta, como apresentado na Figura 47 e no [Vídeo 1](#) (clique para abrir o link do vídeo). O AGV sobre trilho é Recurso Fixo (*Fixed Resource*), apesar de ser do tipo caminhão e possibilitar configurações

como velocidade e capacidade de transporte, com o par de moldes acoplado sobre ele, passa por cada uma das estações de trabalho, de E1 sequencialmente até E5, onde o painel é desmoldado.

Figura 47 – Cenário C1 de *layout* proposto



Fonte: Autora

Ainda durante o processo de modelagem, mesmo sem a inserção dos tempos diversos, foi identificada a necessidade de subdividir as etapas do processo de fabricação em grupos menores, mesmo que sobrepostos em um mesmo local. Esse recurso foi utilizado para inserção correta dos tempos em cada operação na simulação e para possibilitar as alterações dos materiais em processamento no decorrer da execução das tarefas.

Na Etapa E1, a Limpeza é uma subetapa. A limpeza dos moldes e dos insertos é realizada por jato de água, ar comprimido e aspiração por um robô colaborativo auxiliado por dois operadores. Nesta subetapa são fixados também, pelos mesmos operadores, os insertos, conforme tipo de painel que está sendo produzido. A aplicação de desmoldante e *gelcoat* é a segunda subetapa de E1, onde o mesmo robô colaborativo faz a aplicação de ambos e aferição a laser da camada de *gelcoat*. Essas subetapas estão sobrepostas, acontecem no mesmo local sobre o par de moldes no AGV, quando este passa pela estação de trabalho.

Na Etapa E2, o Corte é a subetapa 1, feita por cortadora CNC a laser, localizada ao lado de onde será aplicado o material, como um apêndice do ciclo. Acontece em paralelo ao ciclo geral, ainda durante a Etapa E1, ou seja, quando o material chega na Etapa E2 para colocação do material, já está cortado. Devido à limitação de largura do material prepreg de 1,40 m, somente é possível o corte de material de um lado do painel por vez. O equipamento é controlado por um operador, que retira o filme de proteção da lâmina e posiciona sobre cada um dos dois

moldes quando o AGV se posiciona na estação de trabalho, iniciando a segunda subetapa de E2 para o ajuste do Material dentro do par de moldes por esse e mais um operador.

A Moldagem e a Cura acontecem em uma única etapa, E3, em prensa SMC. O AGV entra no equipamento já com o material sobre os moldes, que recebe a compressão da contramolde e onde aguarda a cura do prepreg por aumento de temperatura, tudo de forma automática, mas controlado por um operador.

Na Etapa E4, a Montagem interna do painel é a primeira subetapa, composta conforme tipo, e realizada por dois operadores sobre os moldes após o posicionamento do AGV na estação de trabalho, auxiliados por robô colaborativo. A central de armazenamento de kits de instalações, que são montados previamente, e demais materiais desta etapa não foi representada no modelo pois se julgou desnecessários para as análises feitas, foram apenas considerados os tempos das tarefas da operação no momento da simulação dos cenários. A segunda subetapa de E4 é o Fechamento, realizado por máquina hidráulica acoplado ao próprio AGV, e injeção de PU, por injetora automática.

A primeira subetapa da Etapa E5 é a Desmoldagem por injeção de ar comprimido em pontos específicos da forma, por robô autônomo, que transfere para a bancada ao lado de onde o AGV para na desmoldagem, como um anexo do ciclo. O painel é inspecionado por dois operadores, em paralelo enquanto o próximo painel é desmoldado, e caso seja aprovado, é finalizado e enviado por robô à fila de expedição, sendo despachado a cada lote de 50 painéis. Caso o painel necessite de pequenos reparos, são executados na mesma bancada pelos mesmos operadores da instalação. Depois das correções concluídas, o painel é reinspecionado, finalizado e enviado também para a fila de expedição, aguardando junto com os demais a formação do lote para despacho. Caso o painel seja rejeitado na inspeção, é enviado para a reciclagem.

Após a retirada do painel, o AGV retorna para o próximo ciclo com os moldes vazios, em um circuito de trilho fechado, percorrendo um total de 163 m (72 m por 6 m).

A Figura 48 relaciona e descreve os elementos inseridos nos modelos dos três cenários propostos.

Figura 48 – Elementos dos modelos (continua)

Nome no modelo	Tipo de elemento	Ligações	Função
AGV COM MOLDE	Recurso	Saída: E1 LIMPEZA	Gerar AGV.
NNX (X = 1 a 13)	Nó de Rede	Lateral no sentido do fluxo	Definir o trajeto do AGV.
Módulo fabril Y (Y = 1 a 13)	Plano	-	Demarcar espaço de segurança sem robô na estação de trabalho.
Módulo fabril rZ (Z = 1 a 3)	Plano	-	Demarcar espaço de segurança com robô na estação de trabalho.
Módulo fabril p	Plano	-	Demarcar espaço de segurança com prensa SMC na estação de trabalho.
E1 LIMPEZA	Processador	Entrada: AGV COM MOLDE Central: Operador limpeza 1 e 2 Saída: E1 DESM GELCOAT	Processar o tempo de limpeza dos moldes.
Operador de limpeza 1 e 2	Operador	Central: E1 LIMPEZA	Executar a limpeza dos moldes.
E1 DESM GELCOAT	Processador	Entrada: E1 LIMPEZA Central: Robô desm geocoat Saída: E2 MATERIAL	Processar o tempo de aplicação do desmoldante e aplicação, aferição e reaplicação do geocoat. Processo sem visual, locação do AGV.
Robô desm geocoat	Robô	Central: E1 LIMPEZA	Executar a aplicação do desmoldante e aplicação, aferição e reaplicação do geocoat.
PREPREG	Recurso	Saída: E2 CORTE	Gerar material prepreg
ESTOQUE PREPREG	Fila	-	Representar o estoque de prepreg.
Rolo prepreg 1 e 2	FR Básico	-	Representar os rolos de prepreg.
E2 CORTE	Processador	Entrada: PREPREG Central: Operador CNC Saída: E2 MATERIAL	Cortar a laser o prepreg nas medidas exatas para o molde de um lado por vez do tipo de painel. Dimensões de saída representa o material sobre os moldes de cada lado do painel.
Operador CNC	Operador	Central: E2 CORTE	Operar a cortadora CNC, tirar os filmes de proteção do prepreg cortado, deslocar para o AGV e auxiliar no ajuste do material sobre os moldes.
E2 MATERIAL	Combinador	Entrada: E1 DESM GELCOAT e E2 CORTE Central: Operador ajuste Saída: E3 MOLDAGEM	Combinar os moldes sobre o AGV com o material prepreg e processar o tempo de ajuste do material nas formas de cada lado do painel em fabricação. Processo sem visual, locação do AGV.
Operador ajuste	Operador	Central: E2 MATERIAL	Executar o ajuste do material sobre os moldes.

Figura 48 – Elementos dos modelos (continuação)

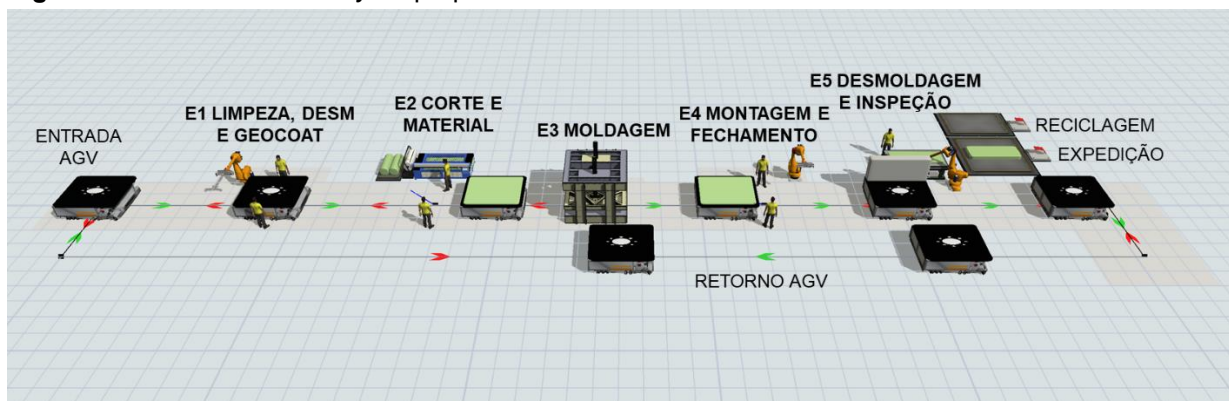
Nome no modelo	Tipo de elemento	Ligações	Função
E3 MOLDAGEM	Processador	Entrada: E2 MATERIAL Central: Operador SMC Saída: E4 MONTAGEM	Processar o tempo de moldagem e cura do material prepreg dentro dos moldes. O AGV entra e se posiciona dentro da prensa SMC.
Operador SMC	Operador	Central: E3 MOLDAGEM	Operar a a prensa SMC
E4 MONTAGEM	Separador	Entrada: E3 MOLDAGEM Central: Operador montagem 1 e 2 e Robô montagem Saída: E4 MONTAGEM Comb e E4 FECHAMENTO	Processar o tempo de montagem do painel e separar temporariamente do AGV, mas mantém na posição. Processo sem visual, locação do AGV.
Operador montagem 1 e 2	Operador	Central: E4 MONTAGEM	Executar a montagem do painel.
Robô montagem	Robô	Central: E4 MONTAGEM	Auxiliar na execução da montagem do painel, como aplicação de adesivo e posicionamento de reforços.
E4 FECHAMENTO	Processador	Entrada: E4 MONTAGEM Saída: E4 MONTAGEM Comb	Processar o tempo de fechamento do painel e mudar o visual para representar o molde fechado. Processo sem visual, locação do AGV na mesma posição.
E4 MONTAGEM Comb	Combinador	Entrada: E4 MONTAGEM e E4 FECHAMENTO Saída: E5 DESMOLD	Combinar novamente o painel (forma fechada) ao AGV para seguir com o processo de fabricação. Processo sem tempo e visual, locação do AGV na mesma posição.
E5 DESMOLD	Separador	Entrada: E4 MONTAGEM Comb Central: Robô desmold Saída: Saída E5 DESMOLD PAINEL e Saída E5 DESMOLD AGV	Processar o tempo da desmold e separar o painel do AGV com os moldes.
Saída E5 DESMOLD AGV	Fila	Entrada: E5 DESMOLD Central: Saída E5 DESMOLD PAINEL Saída: SAÍDA AGV	Receber o AGV provisoriamente para enviar à SAÍDA AGV.
SAÍDA AGV	Saída	Entrada: Saída E5 DESMOLD AGV	Gerar o deslocamento do AGV de volta ao início e retirá-lo do ciclo.
Saída E5 DESMOLD PAINEL	Fila	Entrada: E5 DESMOLD Central: Robô desmold e Saída E5 DESMOLD AGV Saída: E5 ACABAMENTO, E5 REPARO ou E5 ESTOQUE RECILAGEM	Receber os painéis provisoriamente e possibilitar o envio de 95% para E5 ACABAMENTO, 5% E5 REPARO e 1% E5 ESTOQUE RECILAGEM, com escolha aleatória.

Figura 48 – Elementos dos modelos (continuação)

Nome no modelo	Tipo de elemento	Ligações	Função
Robô desmold	Robô	Central: Saída E5 DESMOLD PAINEL, E5 REPARO e E5 ACABAMENTO	Executar a desmoldagem do painel com injeção de ar comprimido e transportá-lo da desmoldagem para acabamento, reparo e saídas do painel.
E5 REPARO	Processador	Entrada: Saída E5 DESMOLD PAINEL Central: Operador acabamento e reparo Saída: E5 ACABAMENTO	Processar o tempo de reparo do painel.
E5 ACABAMENTO	Processador	Entrada: Saída E5 DESMOLD PAINEL e E5 REPARO Central: Robô desmold e Operador acabamento e reparo Saída: ESTOQUE EXPEDIÇÃO	Processar o tempo de inspeção, acabamento e embalagem do painel. Processo sem visual na mesma posição do E5 REPARO.
Operador acabamento e reparo 1 e 2	Operador	Central: E5 ACABAMENTO e E5 REPARO	Executar inspeção, reparo, acabamentos e embalagem do painel.
ESTOQUE EXPEDIÇÃO	Fila	Entrada: E5 ACABAMENTO Saída: SAÍDA EXPEDIÇÃO	Receber os painéis finalizados para envio à expedição com lote máximo de 50 painéis.
SAÍDA EXPEDIÇÃO	Saída	Entrada: ESTOQUE EXPEDIÇÃO	Saída do lote de painéis para a expedição e encerramento do ciclo de produção.
ESTOQUE RECICLAGEM	Fila	Entrada: E5 ACABAMENTO Saída: SAÍDA RECICLAGEM	Receber os painéis finalizados para envio à reciclagem.
SAÍDA RECICLAGEM	Saída	Entrada: ESTOQUE RECICLAGEM	Saída do painel para reciclagem e encerramento do ciclo de produção.

Fonte: Autora

No Cenário C2, representado na Figura 49 e no [Vídeo 2](#) (clique para abrir o link do vídeo), o layout por produto em linha reta foi mantido e as estações de trabalho foram aproximadas, porém, garantindo espaçamento seguro, como manda a NR-12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos (Brasil. MTE, 2019).

Figura 49 – Cenário C2 de *layout* proposto

Fonte: Autora

Aqui foi considerado um espaçamento entre as estações de trabalho de uma medida que foi chamada de módulo fabril, composta pelas dimensões da estação de trabalho acrescida de 1 m antes e depois no sentido do movimento e 70 cm de cada lado onde não acontece o movimento. Para a disposição em C2, a estação de trabalho apresenta as dimensões de 3 m por 2,60 m (os moldes de cada lado de um tipo de painel um ao lado do outro). Assim, o módulo fabril foi dimensionado em 5 m no sentido do movimento por 4 m onde não há robô; 5,70 m no sentido do movimento por 4 m onde há robô, pois este foi incorporado às dimensões da estação de trabalho; e 5,50 m no sentido do movimento por 4,50 na etapa de moldagem SMC, devido às maiores dimensões do equipamento. Essa alteração possibilitou a redução do trajeto para um total de 109 m (50,50 m por 4 m).

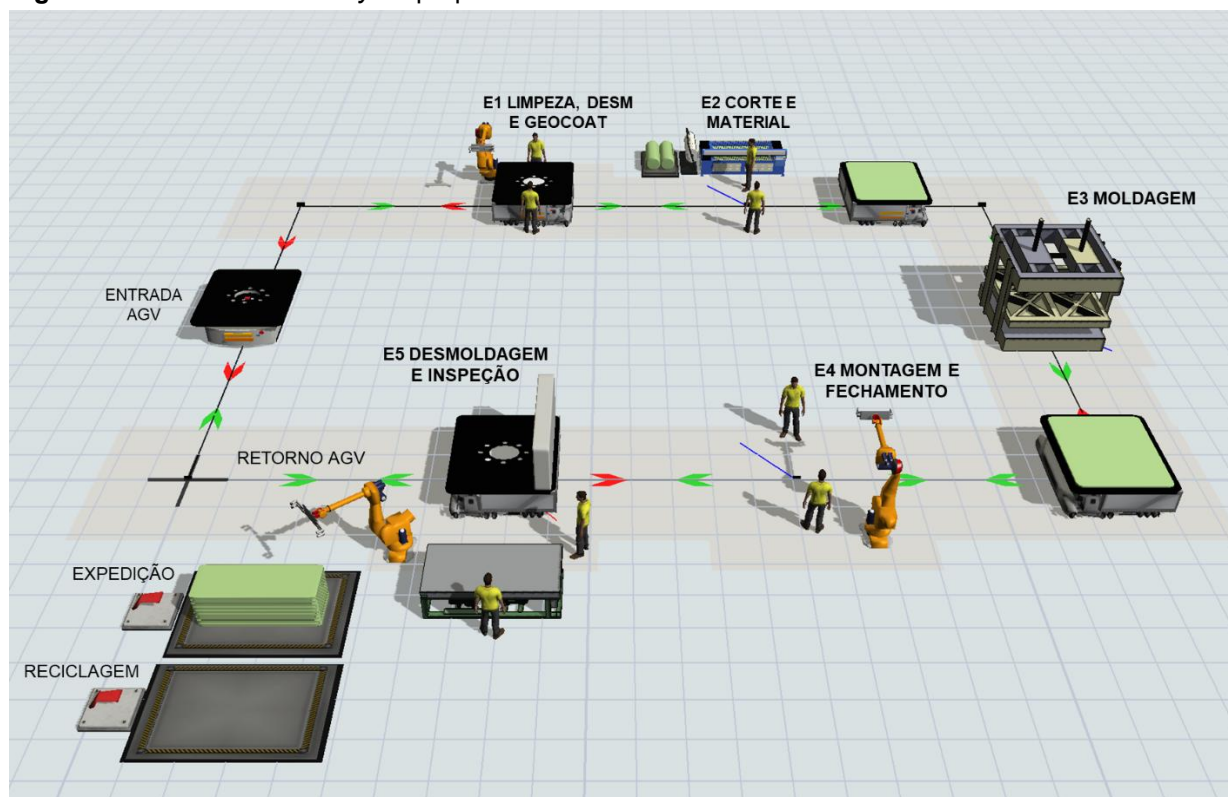
Na etapa E3 de moldagem e cura do material, o equipamento foi deslocado para dentro da trajetória do AGV, que agora passa pela prensa durante o trajeto sem o deslocamento que ocorre no cenário anterior, o que também reduziu distância e tempo.

O estoque para expedição foi invertido em relação ao estoque de reciclagem, deixando-o mais próximo à saída do painel acabado, pois apresenta maior demanda.

No C3, ilustrado na Figura 50 e no [Vídeo 3](#) (clique para abrir o link do vídeo), as dimensões da estação de trabalho foram reposicionadas para a menor dimensão no sentido do movimento, que possibilitou a redução do módulo fabril para 4,60 m no sentido do movimento por 4,40 m onde não há robô; 5,30 m no sentido do movimento por 5,40 m onde há robô; e 5,10 m no sentido do movimento por 4,90 m na etapa E3 de moldagem.

O robô de desmoldagem passa a ter mobilidade (não representada na simulação), garantindo o alcance a todos os locais necessários.

Figura 50 – Cenário C3 de *layout* proposto



Fonte: Autora

Nesse cenário, as estações de trabalho foram distribuídas no decorrer de todo o trajeto do AGV, levando a distância de trajeto a um total de 75,00 m (23 m por 14,50 m).

Estando os três cenários definidos e ajustados, procedeu-se às simulações.

4.3.3 Simulação dos Cenários

Em cada um dos três cenários, C1, C2 e C3, foram simulados os três tipos de painéis retornados como mais complexos pela RN no item 4.2.1 Algoritmo RN para PMVV da EIM: PJG, PP e PRE. Inicialmente foram empregados tempos estimados com o objetivo de entender e explorar as funcionalidades da ferramenta de VF e estudar os processos definidos. Os tempos foram agrupados conforme descrito no item anterior 4.3.2 Modelagem dos Cenários, como destacado na Tabela 4, para inserção nos processos da simulação.

Tabela 4 – Tempos estimados dos três PMVV mais complexos agrupados (em segundos) (continua)

Etapa	Complexidade	1	2	3
	Descrição / Código Painel	PJG	PP	PRE
E1 LIMPEZA E PREPARAÇÃO DOS MOLDES				
E.1.1	Limpeza insertos	600	600	420
E.1.2	Limpeza moldes	940	940	520
E.1.3	Fixação insertos	480	N/A	N/A
E.1.4	Fixação insertos	N/A	600	480
E1 Subtotal 1 LIMPEZA		2020	2140	1420
E.1.5	Desmoldante	420	420	420
E.1.6	Gelcoat e aferição	380	380	420
E.1.7	Reaplicação geocoat	180	180	180
E1 Subtotal 2 DESM E GELCOAT		980	980	1020
E.1.8	Transporte	2 m/s		
E2 Total		3.000	3.120	2.440
E2 CORTE E AJUSTE DE MATERIAL				
E2.1	Retirada prepreg	75	75	75
E2.2	Recorte prepreg	90	90	90
E2.3	Recorte aberturas prepreg	180	180	N/A
E2.4	Retirada filme superior	90	90	90
E2.5	Virar material	45	45	45
E2 Subtotal 1 CORTE		480	480	300
E2.6	Posicionar no molde	60	60	50
E2.7	Retirada filme da face oposta	90	90	90
E2.8	Ajuste prepreg no molde	600	600	360
E2.9	Sobras na refrigeração	45	45	45
E2 Subtotal 2 AJUSTE MATERIAL		795	795	545
E2.10	Transporte	2 m/s		
E2 Total		1.275	1.275	845
E3 MOLDAGEM E CURA				
E3.1	Posicionamento molde	300	300	300
E3.2	Prensagem e cura	600	600	600
E3 Total		900	900	900
E3.3	Transporte	2 m/s		
E4 MONTAGEM DE INSTALAÇÕES E FECHAMENTO				
E4.1	Rebarbação bordas	1450	1550	1200
E4.2	Limpeza interior	300	300	300
E4.3	Retirada insertos	600	600	420
E4.4	Chapa reforço	N/A	N/A	660
E4.5	Instalações ou esquadrias (reforços)	1200	900	500
E4.6	Teste de pressão	N/A	N/A	N/A
E4.7	Nervuras longitudinais	500	480	480
E4.8	Nervuras transversais	520	420	900
E4 Subtotal 1 MONTAGEM		4570	4250	4460
E4.9	Adesivo bordas	240	240	240
E4.10	Fechamento molde	60	60	60
E4.11	Rotação molde	60	60	60
E4.12	Espuma de poliuretano	60	60	60
E4 Subtotal 2 FECHAMENTO		420	420	420

Tabela 4 – Tempos estimados dos três PMVV mais complexos agrupados (em segundos) (continuação)

Etapa	Complexidade	1	2	3
	Descrição / Código Pannel	PJG	PP	PRE
E4.13	Transporte	2 m/s		
E4 Total		4.990	4.670	4.880
E5 DESMOLDAGEM E EMBALAGEM				
E5.1	Desmoldagem	780	780	780
E5.2	Retirada PU	600	600	600
E5.3	Inspeção	300	300	300
E5 Subtotal 1 DESMOLD INSPEÇÃO		1680	1680	1680
E5.4	Correção falhas superficiais	780	780	780
E5 Subtotal 2 REPARO		780	780	780
E5.5	Tampar orifícios ou fixar esquadria	360	480	240
E5.6	Selo QR-Code	90	90	90
E5.7	Fixação EPS	600	600	600
E5.8	Embalagem	420	420	420
E5.9	Engradado de madeira	600	600	600
E5 Subtotal 3 ACABAM EMBALAGEM		2070	2190	1950
E5.10	Transporte	2 m/s		
E5.11	Retorno dos moldes início	2 m/s		
E5 Total		4.530	4.650	4.410
TOTAL GERAL		14.695	14.615	13.475

Fonte: Adaptado de GETIn (2025)

Os tempos de transporte não foram considerados, pois acontecem conforme distância e velocidade configurada no veículo e são constantes para todos os tipos de painel no mesmo cenário. Os deslocamentos foram analisados pelas distâncias. O AGV já estava pré-configurado com velocidade de 2 m/s, sendo sua aceleração e desaceleração de 1 m/s/s. Todas as simulações foram realizadas para um dia de trabalho de 8 h ou 28800 s, o que possibilitou a identificação da quantidade de produtos fabricados em um dia.

Como já descrito no item 3.1.6 Cenários de fabricação e análise comparativa, essa simulação foi utilizada para explorar os recursos da ferramenta de VF empregada. Nessa fase, considerando as análises que foram propostas, em termos de distância, fluxo, tempo e uso de recursos, foram identificadas as funcionalidades que apresentariam dados para esses estudos, que foram os gráficos, identificados no item 3.1.6 Cenários de fabricação e análise.

A partir das simulações estruturadas, foram inseridos os tempos das etapas do processo de fabricação dos três painéis mais complexos ajustados com as referências e retornos da RN, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tempos atualizados dos três PMVV mais complexos agrupados (em segundos) (continua)

Etapa	Complexidade	1	2	3
	Descrição / Código Painel	PP	PJG	PRE
E1 LIMPEZA E PREPARAÇÃO DOS MOLDES				
E.1.1	Limpeza insertos	105,00	105,00	85,00
E.1.2	Limpeza moldes			
E.1.3	Fixação insertos	N/A	32,18	N/A
E.1.4	Fixação insertos	31,43	N/A	28,70
E1 Subtotal 1 LIMPEZA		136	137	114
E.1.5	Desmoldante	930,71	931,09	926,85
E.1.6	Gelcoat e aferição	931,43	932,18	928,70
E.1.7	Reaplicação geocoat			
E1 Subtotal 2 DESM E GELCOAT		1.862	1.863	1.856
E.1.8	Transporte	0,6 m/s, acel/desacel 0,333 m/s		
E1 Total		1.999	2.000	1.969
E2 CORTE E AJUSTE DE MATERIAL				
E2.1	Retirada prepreg	70	70	70
E2.2	Recorte prepreg	219,67	195,33	156,33
E2.3	Recorte aberturas prepreg			N/A
E2.4	Retirada filme superior	45	45	45
E2.5	Virar material			
E2 Subtotal 1 CORTE		335	310	271
E2.6	Posicionar no molde	60	60	60
E2.7	Retirada filme da face oposta			
E2.8	Ajuste prepreg no molde	120	120	90
E2.9	Sobras na refrigeração	26,1538	26,1538	26,1538
E2 Subtotal 2 AJUSTE MATERIAL		206	206	176
E2.10	Transporte	0,6 m/s, acel/desacel 0,333 m/s		
E2 Total		541	516	447
E3 MOLDAGEM E CURA				
E3.1	Posicionamento molde	0	0	0
E3.2	Prensagem e cura	925,5833	925,5833	925,5833
E3 MOLDAGEM E CURA		926	926	926
E3.3	Transporte	0,6 m/s, acel/desacel 0,333 m/s		
E4 MONTAGEM DE INSTALAÇÕES E FECHAMENTO DOS MOLDES				
E4.1	Rebarbação bordas	252	252	252
E4.2	Limpeza interior	168	168	168
E4.3	Retirada insertos	792	589	248
E4.4	Chapa reforço	N/A	N/A	180
E4.5	Instalações ou esquadrias (reforços)	540	480	244
E4.6	Teste de pressão	N/A	N/A	N/A
E4.7	Nervuras longitudinais	187	420	422
E4.8	Nervuras transversais			
E4 Subtotal 1 MONTAGEM		1.939	1.909	1.514
E4.9	Adesivo bordas	150	150	150
E4.10	Fechamento molde na vertical	10,00	10,00	10,00
E4.12	Espuma de poliuretano	54,0192	63,65047	80,67366
E4 Subtotal 2 FECHAMENTO		214	224	241

Tabela 5 – Tempos atualizados dos três PMVV mais complexos agrupados (em segundos) (continuação)

Etapa	Complexidade	2	1	3
	Descrição / Código Painei	PP	PJG	PRE
E4.13	Transporte	0,6 m/s, acel/desacel 0,333 m/s		
E4 Total		2.153	2.133	1.755
E5 DESMOLDAGEM, MONTAGEM COMPLEMENTAR E EMBALAGEM				
E5.1	Desmoldagem	120	120	120
E5.2	Retirada PU e acabamento	150	150	150
E5.3	Inspeção	120	120	120
E5 Subtotal 1 DESMOLD INSPEÇÃO		390	390	390
E5.4	Correção falhas superficiais	150	150	150
E5 Subtotal 2 REPARO		150	150	150
E5.5	Tampar orifícios ou fixar esquadria	180	180	180
E5.6	Selo QR-Code	90	90	90
E5.7	Fixação EPS			
E5.8	Embalagem			
E5.9	Engradado de madeira			
E5 Subtotal 3 ACAB E EMBALAGEM		270	270	270
E5.10	Transporte	0,6 m/s, acel/desacel 0,333 m/s		
E5.11	Retorno dos moldes início			
E5 Total		810	810	810
TOTAL GERAL		6.428	6.385	5.907

Obs: tempos atualizados não consideram transporte

Fonte: Adaptado das fontes citadas (item 3.1.1) e da RN (item 4.2.1)

As simulações para os três painéis e para os três cenários propostos tiveram seus tempos atualizados e nove gráficos foram gerados para cada situação, ou seja, três cenários para os três painéis mais complexos, totalizando 81 gráficos, além de uma tabela. Assim, procedeu-se à análise, apresentada no item seguinte.

4.3.4 Análise comparativa dos Cenários

Os cenários foram analisados em termos de distância, fluxo, tempo e uso de recursos, além de produtividade, para os três painéis mais complexos retornados pela RN: PJG, PP e PRE.

Para o fluxo, analisado de forma visual, foi verificado fluidez, cruzamentos e segurança, conforme NR-12 (Brasil. MTE, 2019). As distâncias de deslocamento foram medidas pelas dimensões do trajeto do AGV e pelo gráfico de Distância de Viagem. A análise de fluxo e distancias de deslocamento do AGV são descritos a seguir.

Para o primeiro cenário, C1 (Figura 47 e [Vídeo 1](#)), foi definido o *layout* por produto, devido às características do painel, com formato em linha reta. Durante a modelagem, algumas considerações já foram feitas.

A matéria prima programada e com almoxarifado descentralizado, próximo ao local onde será usada, favorece o abastecimento no menor tempo possível.

Com os moldes fixos sobre o AGV, a grande maioria das atividades acontece sobre o próprio veículo, reduzindo a necessidade de equipamentos nas estações de trabalho, onde o AGV para e a equipe opera; e a necessidade de transbordo dos materiais em processamento, possibilitando otimização de recursos para esse fim e tempo. Até mesmo a máquina hidráulica para fechamento dos moldes é fixada no veículo.

O posicionamento dos robôs nas laterais das estações de trabalho e dos operadores fora das linhas de circulação (obrigatório conforme NR-12, inclusive com demarcação no piso) favorecem a segurança e ação rápida quando da chegada na etapa.

A etapa E2 Corte acontece em paralelo ao processo geral. Quando o AGV chega ao ponto E2 Material, o prepreg já está cortado e pronto para colocação e ajuste nos moldes. O mesmo acontece na etapa E5 Reparo e E5 Acabamento e Embalagem (na mesma bancada), que ocorrem em paralelo com a etapa E5 Desmoldagem e Inspeção, ou seja, enquanto um painel está passando por reparo (caso necessário), acabamentos, montagem complementar, etiquetagem e embalagem, outro painel está sendo desmoldado e inspecionado.

Na etapa E3 Moldagem e Cura também não é necessário o transbordo do material em processamento para a prensa SMC, o AGV entra na prensa e para automaticamente na posição exata embaixo do contramolde, tudo de forma automatizada, apenas controlada por um operador. Porém, era necessário que o AGV fizesse um deslocamento lateral para fora do trajeto para entrar na prensa.

O estoque de reciclagem, que nem foi usado para o ciclo de um dia de trabalho (apenas 1% dos painéis produzidos), estava posicionado mais perto da saída do acabamento do que o estoque de expedição, que era usado para a grande maioria dos painéis e para todos no ciclo de trabalho simulado, apesar da boa fluidez do processo como um todo.

Além disso, para essa disposição, notou-se que as estações de trabalho ficaram muito espaçadas, com grandes distâncias de deslocamento, perfazendo um total de 163 m (72 m por 6 m) de distância percorrida pelo AGV no ciclo de produção de apenas um painel.

A partir dessas observações, para o C2 (Figura 49 e [Vídeo 2](#)) foi mantido o *layout* e disposição de C1, mas com alterações. A prensa foi posicionada dentro do circuito do AGV. O veículo entra com o material na prensa por um lado e sai com as meia-cascas do painel moldado do outro lado, evitando o deslocamento lateral e favorecendo ainda mais a fluidez da circulação do processo.

O estoque da expedição foi invertido com o estoque da reciclagem, ficando mais próximo da saída de painéis embalados, melhorando acesso ao local mais utilizado e fluidez na circulação.

Com a definição do módulo fabril, conforme descrito no item 3.3.2 Modelagem dos Cenários, o espaçamento entre as estações de trabalho foi reduzido, mantendo a segurança, conforme NR-12 (Brasil. MTE, 2019). O trajeto total passou para 109 m (50,50 m por 4 m), uma redução de 54 m (33%) do trajeto de C1, diminuindo distância, tempo de ciclo e necessidade de disponibilização do veículo de transporte, otimizando o processo.

Analisando C2, foram identificados ainda pontos de melhoria, gerando um terceiro cenário, C3 (Figura 50 e [Vídeo 3](#)).

O robô da etapa E5 auxilia a desmoldagem com ar comprimido, a embalagem e faz o deslocamento do painel de um local para o outro até os estoques de saída. Mesmo centralizado em relação aos locais que precisa atender, seu braço não alcançava todos os pontos. Assim, lhe foi conferida mobilidade, passou a apresentar deslocamento sobre trilhos (não representada no modelo), possibilitando o acesso a todos os pontos necessários, sem a necessidade de incluir outro meio de transporte, o que evitou um possível aumento de custo com equipamento.

A inversão da posição de deslocamento do AGV para a menor dimensão possibilitou a redução do módulo fabril e das distâncias das estações de trabalho, mesmo que pequena, mantendo ainda a garantia de segurança.

A alteração mais significativa desse cenário foi a distribuição das estações de trabalho no decorrer de todo o trajeto do AGV, reduzindo a distância de trajeto a um total de 75,00 m (23 m por 14,50 m), 34 m (31%) em relação a C2 e 88 m (54%) em relação a C1, além de reduzir drasticamente a ociosidade do veículo no caminho de retorno, otimizando seu uso. Além disso,

esta disposição apresenta ocupação do espaço mais adequada tanto ao processo, reduzindo também outros possíveis deslocamentos de operários e outros transportes, quanto às dimensões de imóveis para alocação da planta fabril.

Os três cenários foram definidos a partir das análises até aqui explanadas, com a inserção de tempos de processo de 5 s para visualização da correta configuração da ferramenta de VF, que possibilitou os ajustes técnicos do modelo para a simulação. Essa estratégia concentrou as considerações de alterações de um cenário para o outro às análises de distância, fluxo e disposição das estações de trabalho e do ciclo como um todo.

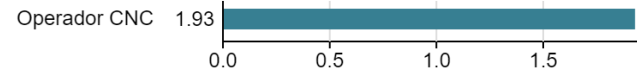
A inserção dos tempos estimados (Tabela 4) e exploração dos recursos da ferramenta de VF possibilitou a definição dos gráficos para extração e representação dos dados para as análises e a identificação dos considerados mais adequados, assim como suas configurações necessárias. Um dos modelos foi empregado para esse fim, o cenário C3, com todas as melhorias até aqui propostas, com os tempos do painel mais complexo PJG.

Com cenários e tempos ajustados (Tabela 5), foi verificado que PP passa a ser o painel com maior tempo para produção. Foram então simulados os cenários C1, C2 e C3, para os painéis agora em nova ordem PP, PJG e PRE, em um total de nove modelos, cujos dados e análises são apresentados a seguir. Os modelos diferem-se quanto à disposição das estações de trabalho nos diferentes cenários e à duração do processo entre os tipos de painéis.

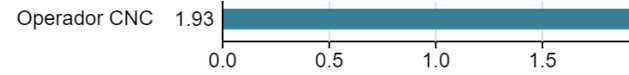
Os gráficos de Distância de Viagem (Figura 51) medem o percurso total durante todo o período, mas não para recursos fixos, como o que foi usado para o AGV (apesar de ser o veículo de transporte). Porém, o uso da ferramenta foi explorado para o Operador CNC da etapa E2 Corte.

Figura 51 – Distância de Viagem – Cenários X Painéis**C1 – PP**

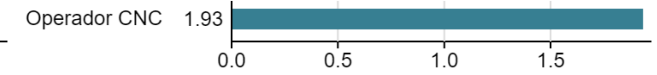
■ Distância (m)

**C1 – PJG**

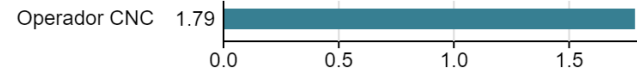
■ Distância (m)

**C1 – PRE**

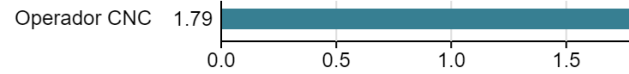
■ Distância (m)

**C2 – PP**

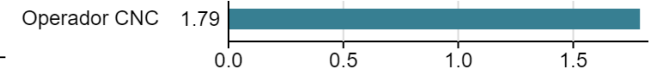
■ Distância (m)

**C2 – PJG**

■ Distância (m)

**C2 – PRE**

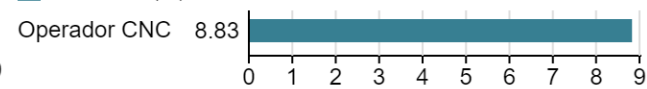
■ Distância (m)

**C3 – PP**

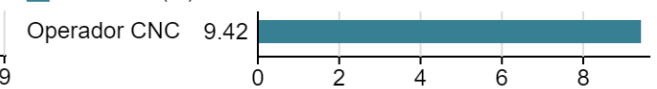
■ Distância (m)

**C3 – PJG**

■ Distância (m)

**C3 – PRE**

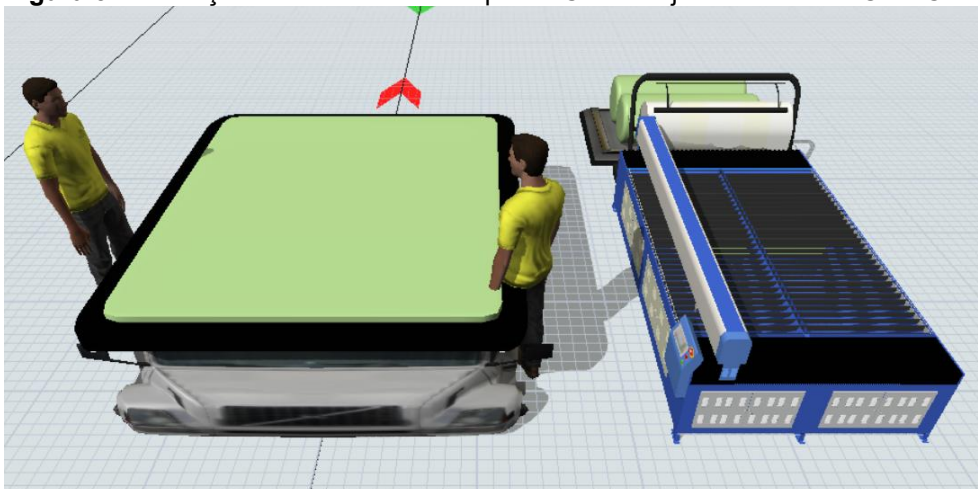
■ Distância (m)



Fonte: Autora

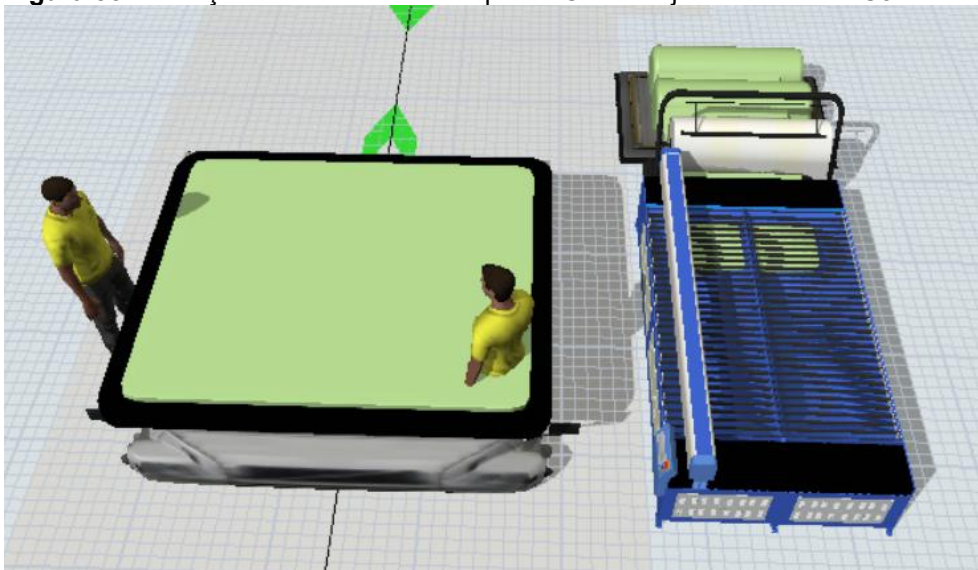
O trajeto do operador é curto, pois as estações de trabalho foram posicionadas de forma paralela e o mais próximas possível, com espaçamento de circulação de 1 m. Em C1 e C2, a posição de deslocamento é no sentido maior dos moldes (Figura 52), já em C3 (Figura 53), é no sentido menor, aumentando a distância entre eixos das estações, apesar de manter o espaçamento. A ferramenta de VF não identifica a dimensão do AGV e o operador “entra” nele para fazer o posicionamento do prepeg sobre os moldes.

Figura 52 – Estações de trabalho da etapa E2 Corte e ajuste Material – C1 e C2



Fonte: Autora

Figura 53 – Estações de trabalho da etapa E2 Corte e ajuste Material – C3



Fonte: Autora

Conforme apresentado pela Figura 51, é possível notar que entre os três painéis do cenário, as distâncias são iguais, pois as estações de trabalho têm a mesma disposição, exceto em C3, onde a distância é maior para o painel PRE. Na sequência pode ser verificado que foi produzido um painel PRE a mais no período simulado em relação aos painéis PP e PJG. Essa poderia ser a causa do aumento. Porém, em C1 e C2 também foi produzido um painel PRE a mais em relação a PP e PJG, sem aumento da distância de deslocamento do operador.

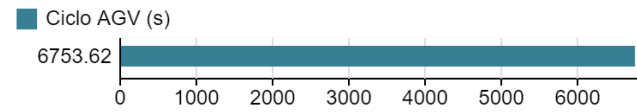
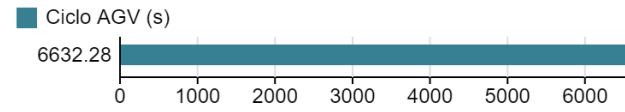
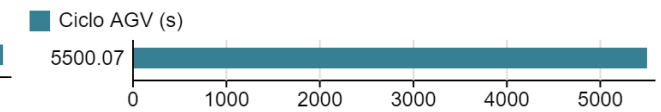
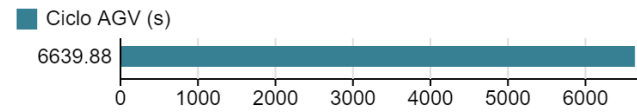
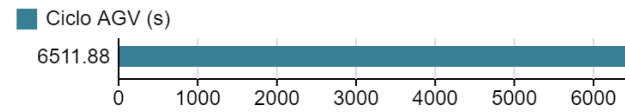
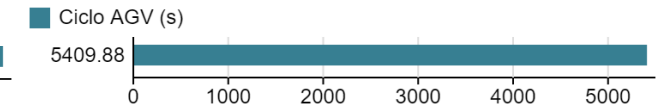
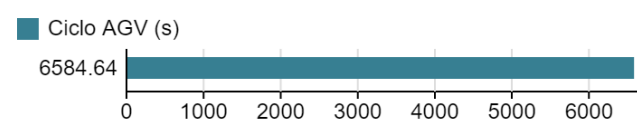
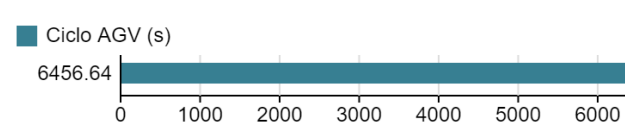
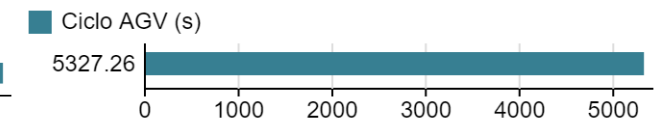
Os cenários, C1 e C2 apresentam distâncias próximas, com leve alteração. Já em C3, a distância é quase 5 vezes maior. Como o deslocamento entre as estações de trabalho é pequeno, presume-se que o fato da inversão da posição de deslocamento do AGV e aumento da distância entre eixos das centrais tenha causado esse grande aumento.

No caso dos cenários propostos, essas informações não são significativas em relação ao processo como um todo, porém, mostra uma importante possibilidade de análise em ciclos fabris.

O tempo total por ciclo de produção (*lead time*) foi medido pelo gráfico de Tempo de Permanência Composto, apresentado nas Figuras 54 a 70.

Na Tabela 5 com os tempos atualizados, é possível verificar que o painel PP passa a ser o que possui maior tempo total de processo, porém apenas 43 s a mais, menos de 1% (0,65%). Ressalta-se que aos tempos da tabela não estão somados os tempos de trajeto, que é dado pela simulação, considerando velocidade de deslocamento, aceleração e desaceleração. Além disso, não são consideradas atividades em paralelo, como nas etapas E2 Corte e ajuste Material e E5 Desmoldagem e Acabamento, conforme já descrito.

O Ciclo AGV (Figura 54) mede em segundos o tempo do veículo desde a entrada até a saída de um ciclo de produção. Para C1 o ciclo do AGV pode ser visualizado na Figura 47, C2 Figura 49 e C3 Figura 50, no item anterior 4.3.2 Modelagem dos Cenários.

Figura 54 – Tempo de Ciclo do AGV – Cenários X Painéis**C1 – PP****C1 – PJG****C1 – PRE****C2 – PP****C2 – PJG****C2 – PRE****C3 – PP****C3 – PJG****C3 – PRE**

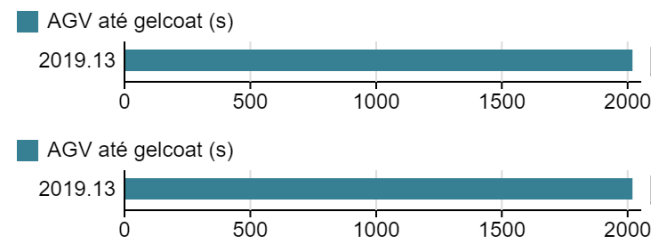
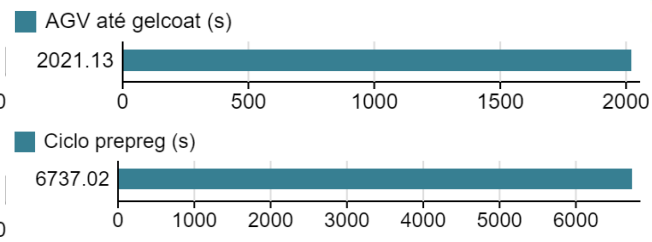
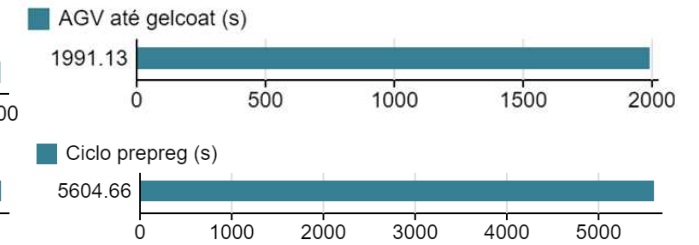
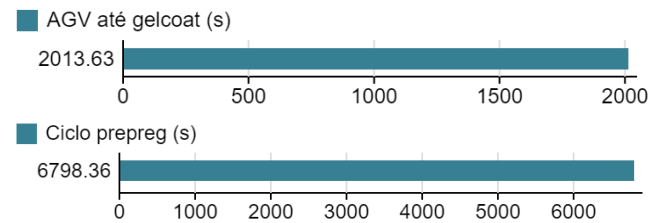
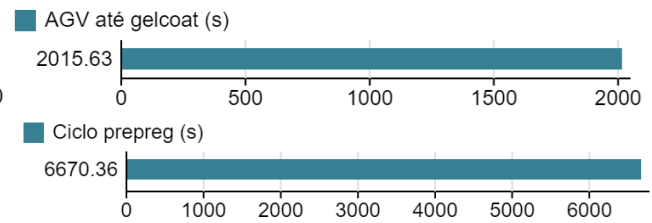
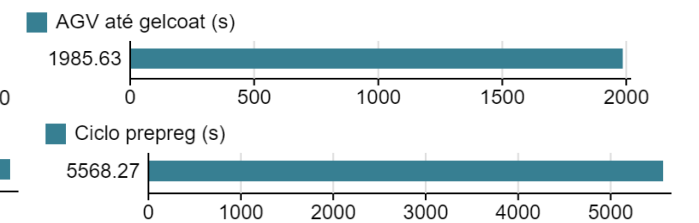
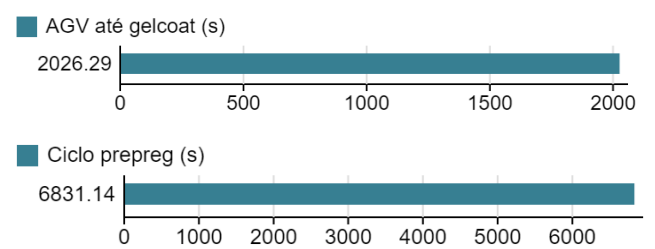
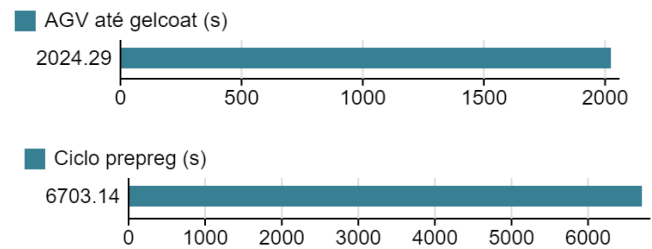
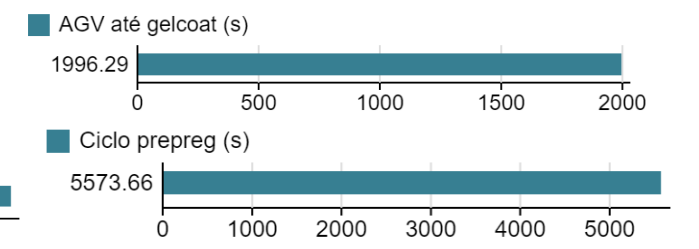
Fonte: Autora

Como já descrito anteriormente na análise de distância de trajeto, os espaçamentos foram sendo otimizados de um cenário para outro, partindo do C1 até C3 com uma redução de 54% da distância. Depois de inseridos os tempos do processo, a redução de tempo também pode ser identificada entre os cenários, porém, não mais de forma acentuada. Para PP, o tempo de ciclo passa de 6.754 s em C1 para 6.640 em C2, redução de 114 s (1,7%); e 6.585 em C3, redução de 169 s (2,5%) em relação à C1.

Na comparação entre os painéis para o cenário C3, PP leva 6.585 s para percorrer o ciclo completo do AGV, PJG 6.557 s, 28 s a menos (0,4%); e PRE 5.327 s, 1258 s (19,1%) a menos em relação a PP. Nota-se que a diferença do tempo de ciclo entre os painéis de esquadrias, que apresentam dificuldade de montagem semelhante, é desprezível. Já o decréscimo do tempo de ciclo do painel de elétrica é acentuado, mostrando redução significativa da complexidade em comparação aos painéis de aberturas.

O ciclo do AGV não representa o ciclo do produto, pois a partir da etapa E5, após a desmoldagem, ele volta com a forma vazia para o início do ciclo. O gráfico de tempo de ciclo mede apenas o mesmo recurso, da sua entrada à sua saída. Assim, para identificar o tempo de ciclo do painel, foi necessário compor duas porções do processo fabril: da entrada do AGV até a saída da etapa E1, após a cura do *gelcoat*, e da entrada do prepreg até a saída para expedição. A ferramenta mede da entrada de uma etapa até a saída de outra. Desta forma, ainda não está sendo considerado o trajeto de E1 até E2. Para cada cenário, o trecho foi calculado, considerando velocidade, aceleração e desaceleração do AGV, e somado às duas partes para compor o tempo total de ciclo de produção de um painel (Tabela 6).

Para PP, o tempo de ciclo de produção do painel passa de 8.906 s em C1 para 8.827 em C2, correspondendo a uma redução de 79 s (0,9%); e 8.869 em C3, representando diminuição de 42s (0,4%) em relação à C1. Comparando os painéis para o cenário C3, PP apresenta 8.869 s, PJG 8.743 s, 126 s a menos (1,4%); e PRE 7.584 s, 1285 s (14,5%) a menos em relação a PP. Da mesma forma que no ciclo do AGV, a variação nos tempos de produção dos painéis de esquadrias mostra-se pouco expressiva, enquanto a redução no painel de elétrica é mais acentuada, evidenciando novamente a significativa diminuição da complexidade em comparação às unidades de aberturas.

Figura 55 – Tempo de Ciclo do Painel – Cenários X Painéis**C1 – PP****C1 – PJG****C1 – PRE****C2 – PP****C2 – PJG****C2 – PRE****C3 – PP****C3 – PJG****C3 – PRE**

Fonte: Autora

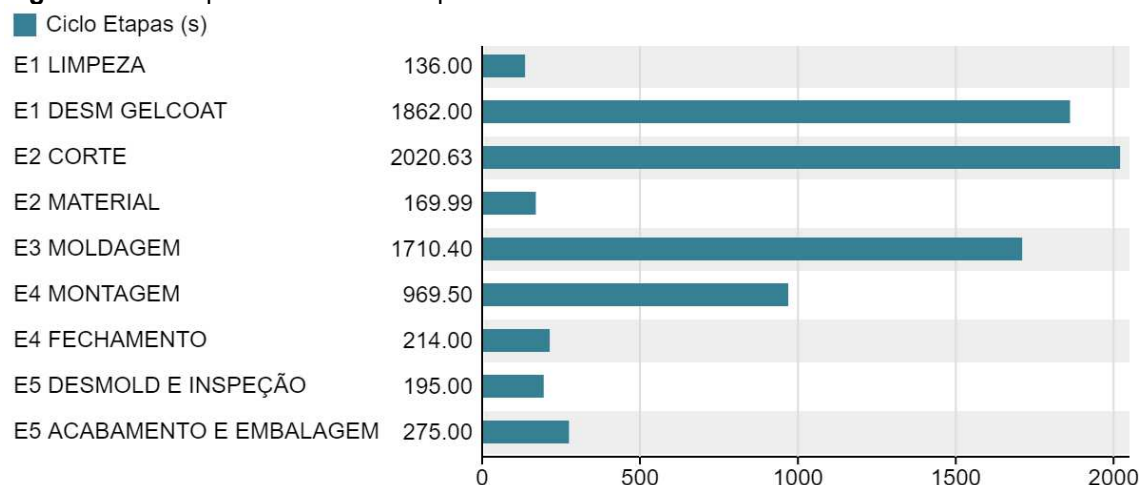
Tabela 6 – Tempo de ciclo do Painei

Porções / Painéis	PP	PJG	PRE
Cenário C1			
AGV até saída gelcoat	2019	2021	1991
Trecho de E1 a E2	22	22	22
Ciclo prepeg	6865	6737	5605
Ciclo Painei C1	8.906	8.780	7.618
Cenário C2			
AGV até saída gelcoat	2014	2016	1986
Trecho de E1 a E2	15	15	15
Ciclo prepeg	6798	6670	5568
Ciclo Painei C2	8.827	8.701	7.569
Cenário C3			
AGV até saída gelcoat	2024	2026	1996
Trecho de E1 a E2	14	14	14
Ciclo prepeg	6831	6703	5574
Ciclo Painei C3	8.869	8.743	7.584

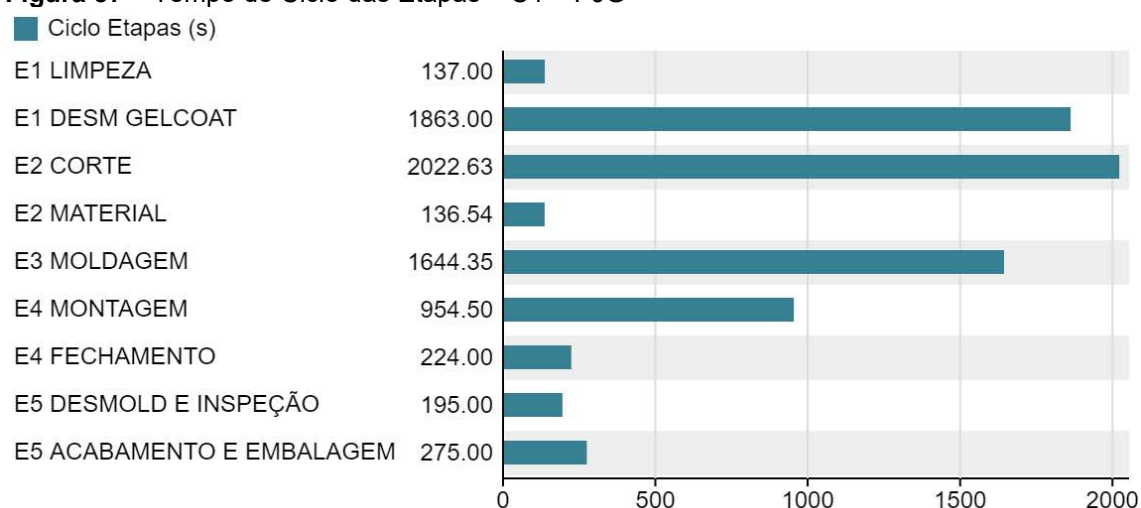
Fonte: Autora

Após a inserção dos tempos estimados das etapas do processo de fabricação dos PMVV e da análise dos tempos de ciclo, observou-se um ponto significativo, considerando que foi uma das questões focadas na modelagem de um cenário para outro: os tempos de deslocamento não são expressivos em relação aos tempos de processamento. Tal fato merece destaque, pois difere de forma contrastante da construção civil tradicional, em que as atividades que não agregam valor, inclusive transporte, ultrapassam metade das atividades (Daniel *et al.*, 2019).

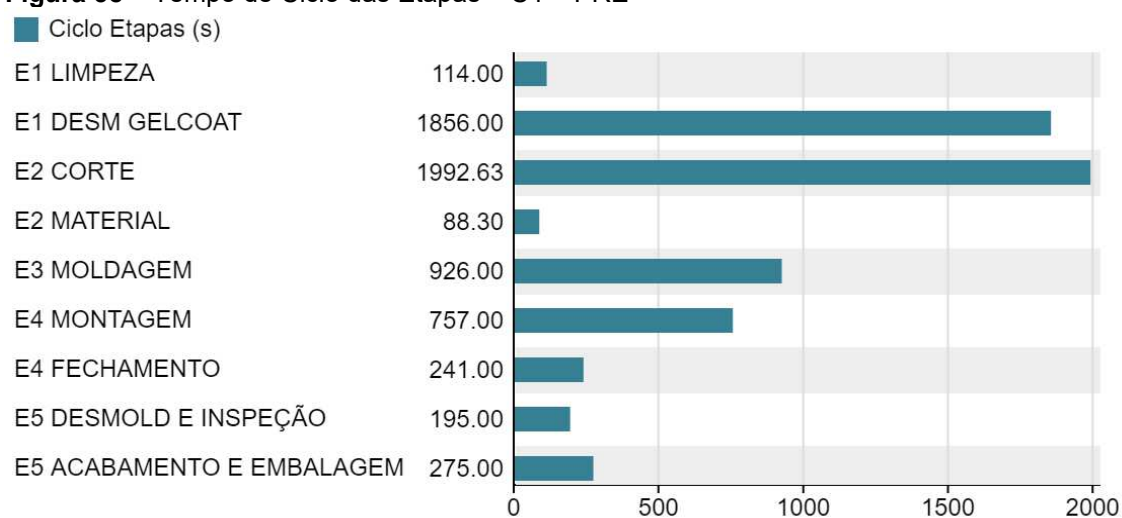
O tempo de ciclo da etapa representa o tempo do material desde a entrada até a saída daquela etapa, mesmo que esteja em espera, e é dado pelo gráfico de Tempo de Permanência (Figuras 56 a 64). A etapa E5 Reparo não apresenta tempo de ciclo pois não ocorreu para o período simulado de um dia de trabalho.

Figura 56 – Tempo de Ciclo das Etapas – C1 – PP

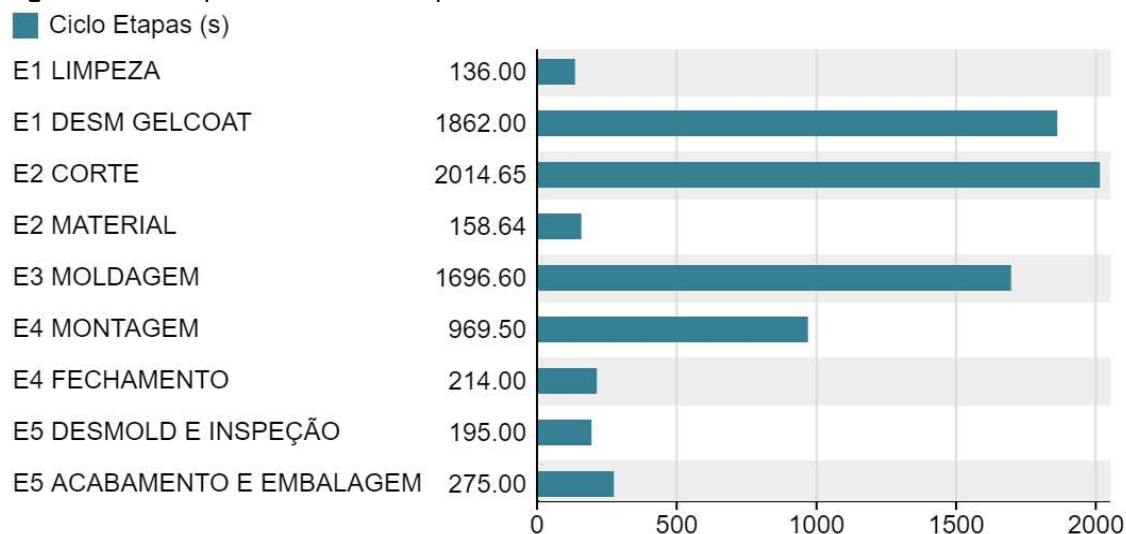
Fonte: Autora

Figura 57 – Tempo de Ciclo das Etapas – C1 – PJG

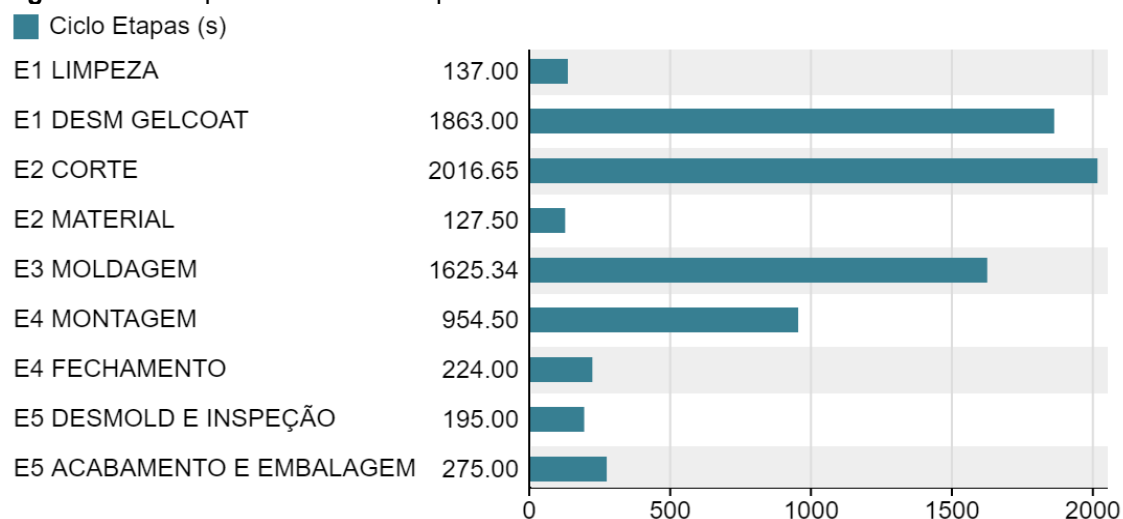
Fonte: Autora

Figura 58 – Tempo de Ciclo das Etapas – C1 – PRE

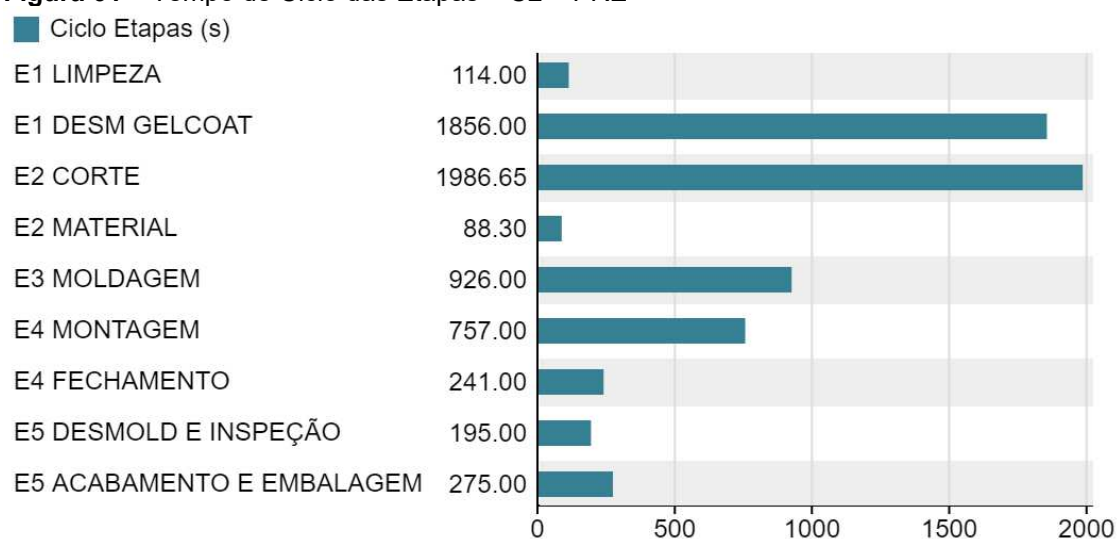
Fonte: Autora

Figura 59 – Tempo de Ciclo das Etapas – C2 – PP

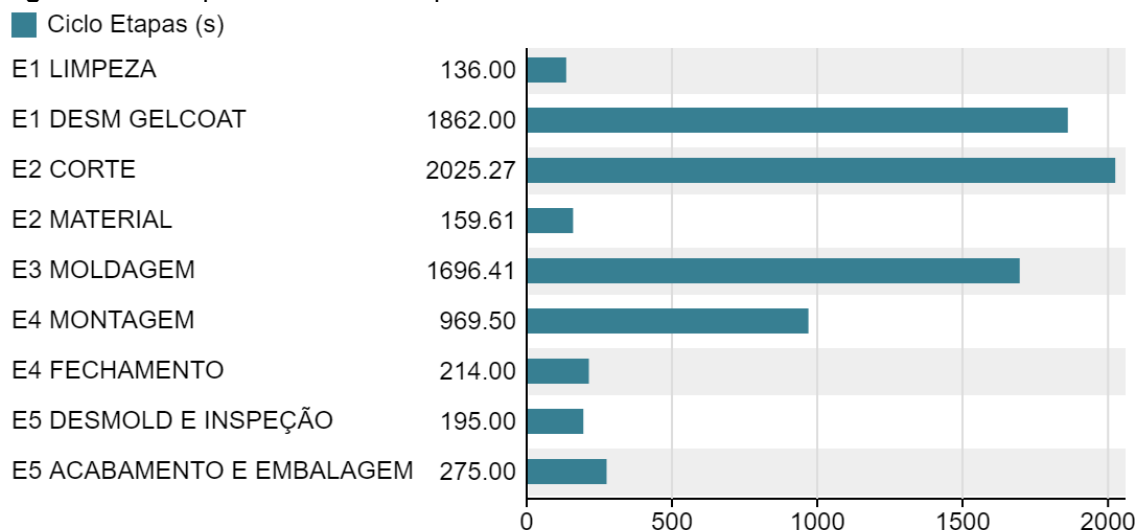
Fonte: Autora

Figura 60 – Tempo de Ciclo das Etapas – C2 – PJG

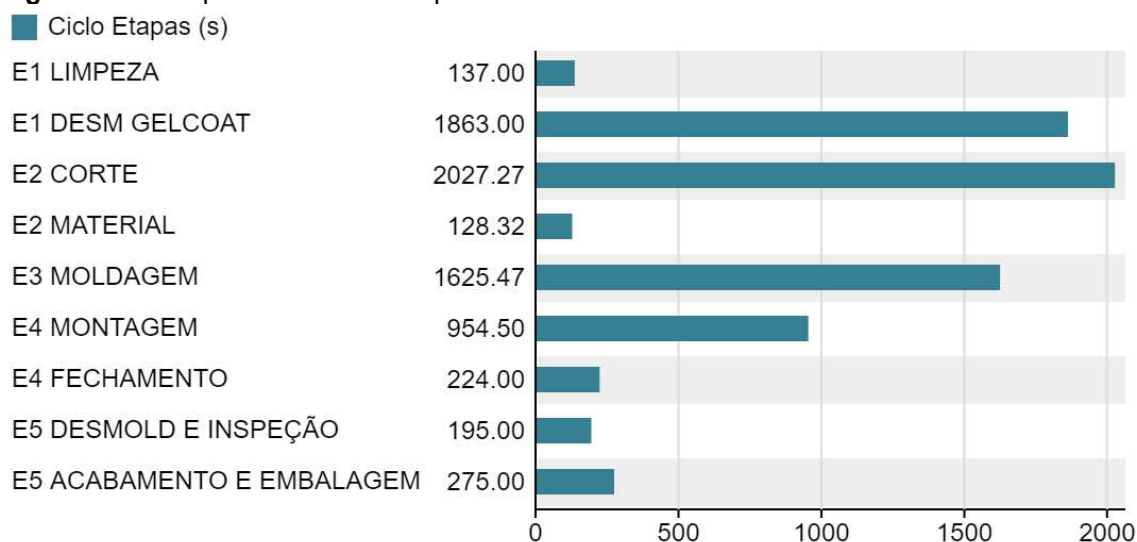
Fonte: Autora

Figura 61 – Tempo de Ciclo das Etapas – C2 – PRE

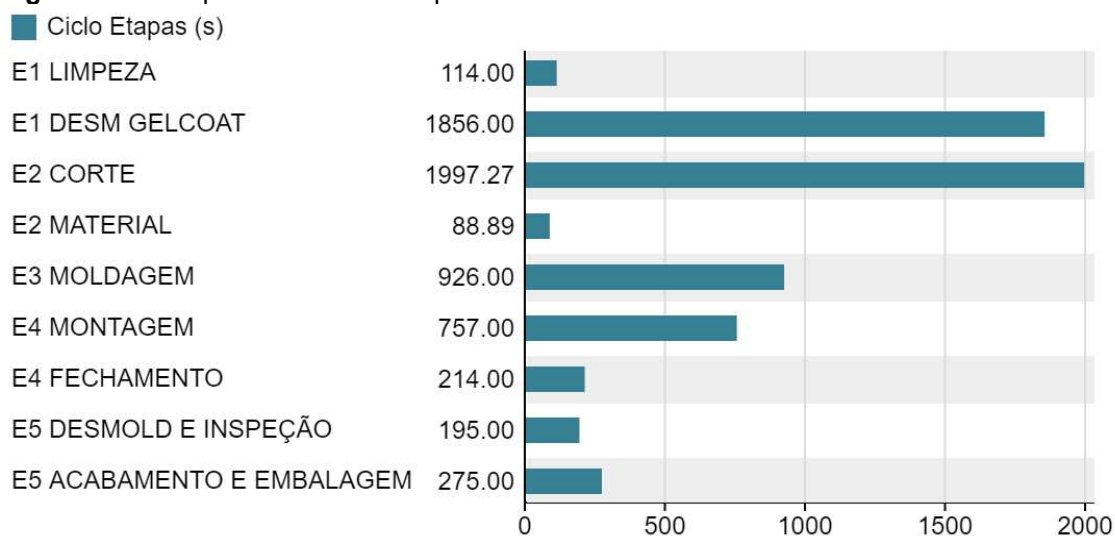
Fonte: Autora

Figura 62 – Tempo de Ciclo das Etapas – C3 – PP

Fonte: Autora

Figura 63 – Tempo de Ciclo das Etapas – C3 – PJG

Fonte: Autora

Figura 64 – Tempo de Ciclo das Etapas – C3 – PRE

Fonte: Autora

A Tabela 7 condensa os tempos de ciclo das etapas indicados pelos gráficos. Entre cenários, a diferença do tempo de ciclo de cada etapa é pequena, pois os tempos de processamento são os mesmos para cada painel. Logo, como observado nos tempos de ciclo do painel, a diferença de tempo entre os cenários não se mostrou relevante. Dessa forma, passa a ser significativa a análise das etapas do processo entre tipos de painéis para identificação dos pontos críticos.

Tabela 7 – Tempo de ciclo das Etapas (continua)

Etapas / Painéis	PP	PJG	PRE
Cenário C1			
E1 LIMPEZA	136	137	114
E1 DESM GELCOAT	1862	1863	1856
E2 CORTE	2021	2023	1993
E2 MATERIAL	170	137	88
E3 MOLDAGEM E CURA	1710	1644	926
E4 MONTAGEM	970	955	757
E4 FECHAMENTO	240	224	241
E5 DESMOLD E INSPEÇÃO	195	195	195
E5 ACABAMENTO	275	275	275
Cenário C2			
E1 LIMPEZA	136	137	114
E1 DESM GELCOAT	1562	1863	1856
E2 CORTE	2015	2017	1987
E2 MATERIAL	159	128	88
E3 MOLDAGEM E CURA	1697	1625	926
E4 MONTAGEM	970	955	757
E4 FECHAMENTO	214	224	241
E5 DESMOLD E INSPEÇÃO	195	195	195
E5 ACABAMENTO	275	275	275

Fonte: Autora

Tabela 7 – Tempo de ciclo das Etapas (continuação)

Etapas / Painéis	PP	PJG	PRE	Diferença entre	
Cenário C3				C1 / C2	C1 / C3
E1 LIMPEZA	136	137	114	-0,7%	16,2%
E1 DESM GELCOAT	1862	1863	1856	-0,1%	0,3%
E2 CORTE	2025	2017	1997	0,4%	1,4%
E2 MATERIAL	160	128	89	20,0%	44,4%
E3 MOLDAGEM E CURA	1696	1625	926	4,2%	45,4%
E4 MONTAGEM	970	955	757	1,5%	22,0%
E4 FECHAMENTO	214	224	214	-4,7%	0,0%
E5 DESMOLD E INSPEÇÃO	195	195	195	0,0%	0,0%
E5 ACABAMENTO	275	275	275	0,0%	0,0%

Fonte: Autora

Comparando os painéis para o cenário C3, diferenças mais expressivas acontecem nas etapas de: E2 Material, com decréscimo de 20,0% entre C1 e C2 e de 44,4% de C1 para C3; E3 Moldagem e Cura, somente 4,2% entre C1 e C2, mas 45,4% de C1 para C3, talvez devido a variação de tempo de espera para PRE, pois o tempo de processamento dessa etapa para os três tipos de painéis é o mesmo, conforme indicado na Tabela 5 (item 4.3.3 Simulação dos Cenários).

A etapa E3 Montagem apresenta redução de 1,5% entre C1 e C2 e 22% de C1 para C3. Aqui é reafirmada a observação feita na análise dos tempos de ciclo dos painéis, em que aponta pequena variação nos tempos de produção dos painéis de esquadrias, enquanto o tempo de produção do painel de elétrica é menor, destacando novamente a significativa diminuição da complexidade em comparação às unidades de aberturas.

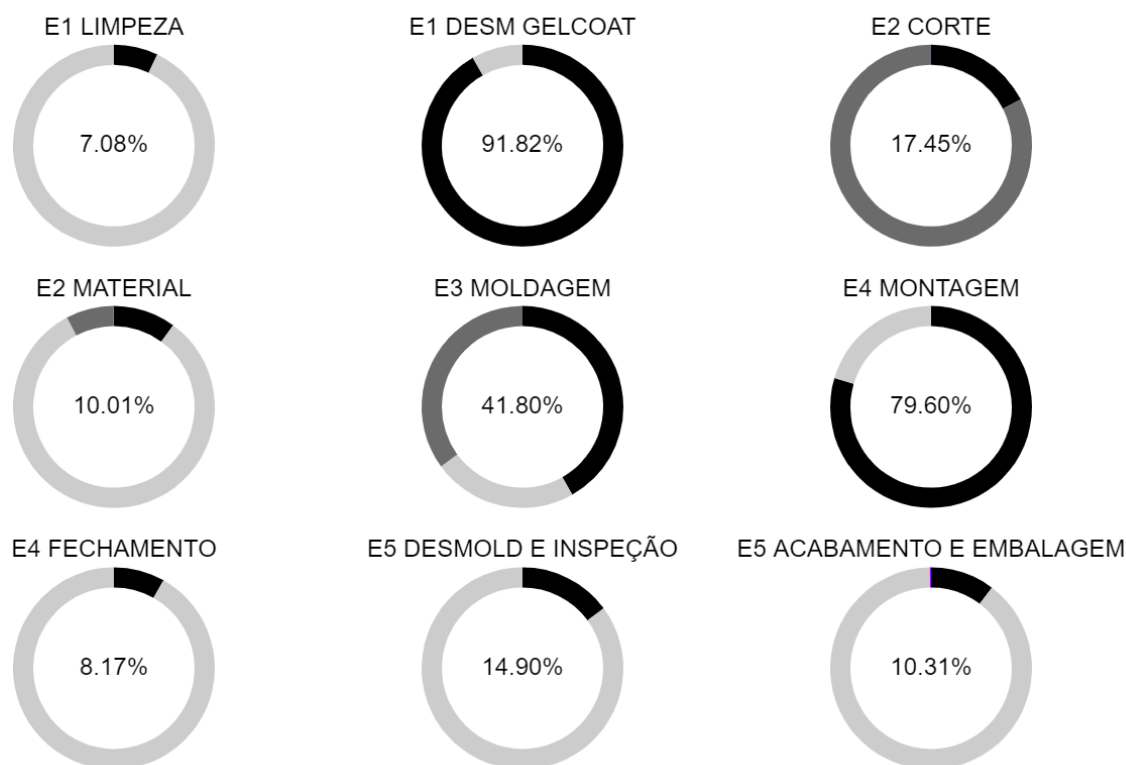
A etapa E2 Corte é indicada nos gráficos com o maior tempo de ciclo. Porém, como indicado na Tabela 5, seus tempos de processamento são em torno de 300 s, então grande parte desse tempo é em espera, como pode ser observado nos gráficos de Utilização das Etapas, nas Figuras 65 a 74 na sequência. Dessa forma, o equipamento de corte CNC fica grande parte do tempo ocioso, motivo pelo qual deve-se pensar em estratégias de otimização de seu uso.

Diante do exposto, cruzando as informações de tempo de processamento da Tabela 5 e tempos de ciclo das etapas da Tabela 7, é possível afirmar que as etapas mais demoradas são: E1 Desmoldante e *Gelcoat*, E3 Moldagem e Cura e E4 Montagem, ou seja, pontos críticos que devem ser analisados e buscadas formas de racionalização e como consequência redução do tempo de ciclo total do processo de fabricação dos PMVV.

O gráfico considerado mais elucidativo foi o de Estado (Figuras 65 a 73), que indica os estados de cada etapa, sendo que a utilização, equivalente ao tempo de processamento, é apresentado em porcentagem dentro do gráfico de cada etapa. Na primeira situação, C1 para PP, os tempos do estado de coleta e de aguardo por transporte não são visualizados, apesar de serem indicados na legenda. Assim, foi gerada a Tabela 8 com os tempos de cada estado, onde se pode identificar que tais tempos, destacados em negrito na tabela, são inexpressivos e foram excluídos dos gráficos seguintes.

Figura 65 – Utilização das Etapas – C1 – PP

■ Processamento ■ Ocioso ■ Bloqueado ■ Coletando ■ Aguardando por transporte



Fonte: Autora

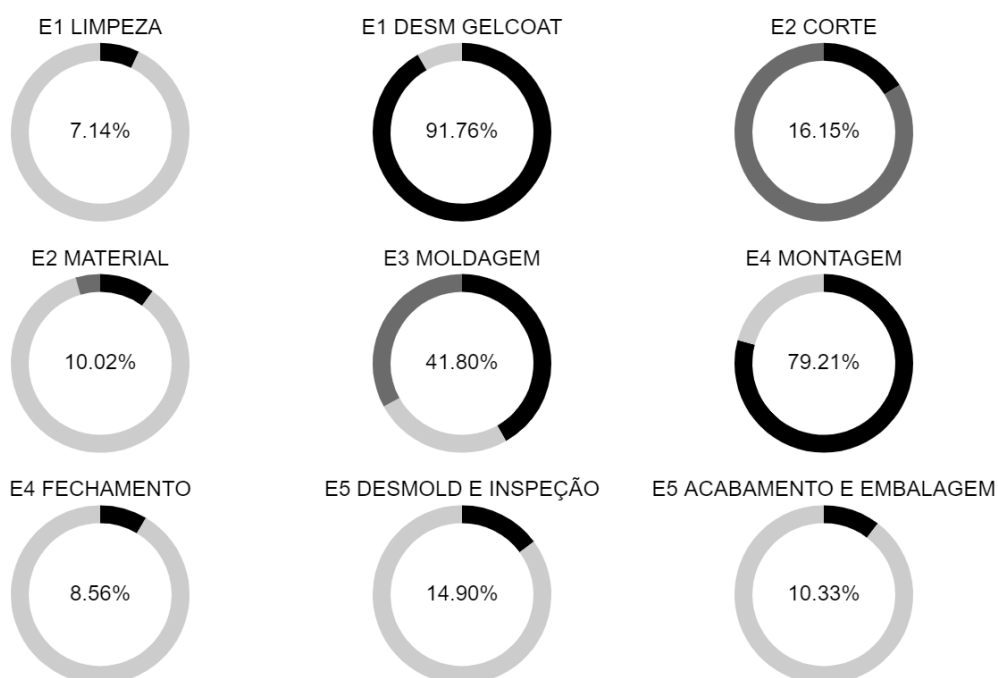
Tabela 8 – Utilização das Etapas – C1 – PP

ETAPA	ESTADO	TEMPO (s)	UTILIZAÇÃO (%)
E1 LIMPEZA	Processamento	2.055	7,1
E1 LIMPEZA	Ocioso	26.745	
E1 DESM GELCOAT	Processamento	26.511	92,1
E1 DESM GELCOAT	Ocioso	2.289	
E2 CORTE	Processamento	4.650	16,1
E2 CORTE	Bloqueado	24.146	
E2 CORTE	Aguardando por transporte	4	
E2 MATERIAL	Processamento	2.884	10,0
E2 MATERIAL	Ocioso	24.791	
E2 MATERIAL	Bloqueado	1.117	
E2 MATERIAL	Coletando	8	
E3 MOLDAGEM	Processamento	12.038	41,8
E3 MOLDAGEM	Ocioso	7.319	
E3 MOLDAGEM	Bloqueado	9.443	
E4 MONTAGEM	Processamento	22.908	79,5
E4 MONTAGEM	Ocioso	5.892	
E4 FECHAMENTO	Processamento	2.531	8,8
E4 FECHAMENTO	Ocioso	26.269	
E5 DESMOLD E INSPEÇÃO	Processamento	4.290	14,9
E5 DESMOLD E INSPEÇÃO	Ocioso	24.510	
E5 ACABAMENTO E EMBALAGEM	Processamento	2.970	10,3
E5 ACABAMENTO E EMBALAGEM	Ocioso	25.775	
E5 ACABAMENTO E EMBALAGEM	Aguardando por transporte	55	

Fonte: Autora

Figura 66 – Utilização das Etapas – C1 – PJG

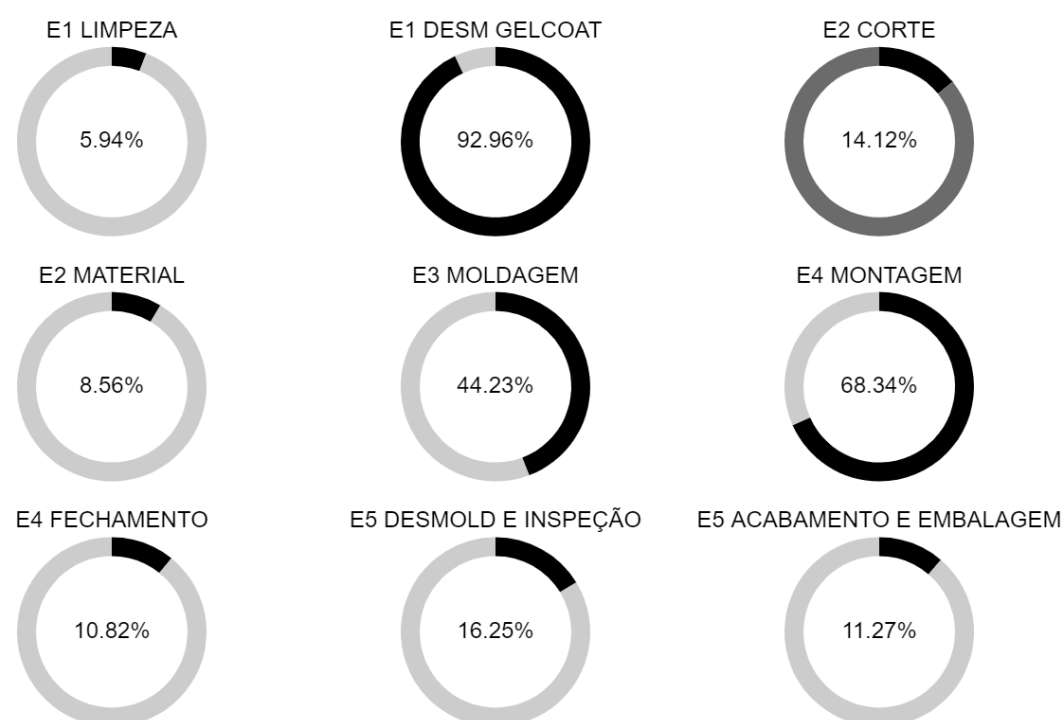
■ Processamento ■ Ocioso ■ Bloqueado



Fonte: Autora

Figura 67 – Utilização das Etapas – C1 – PRE

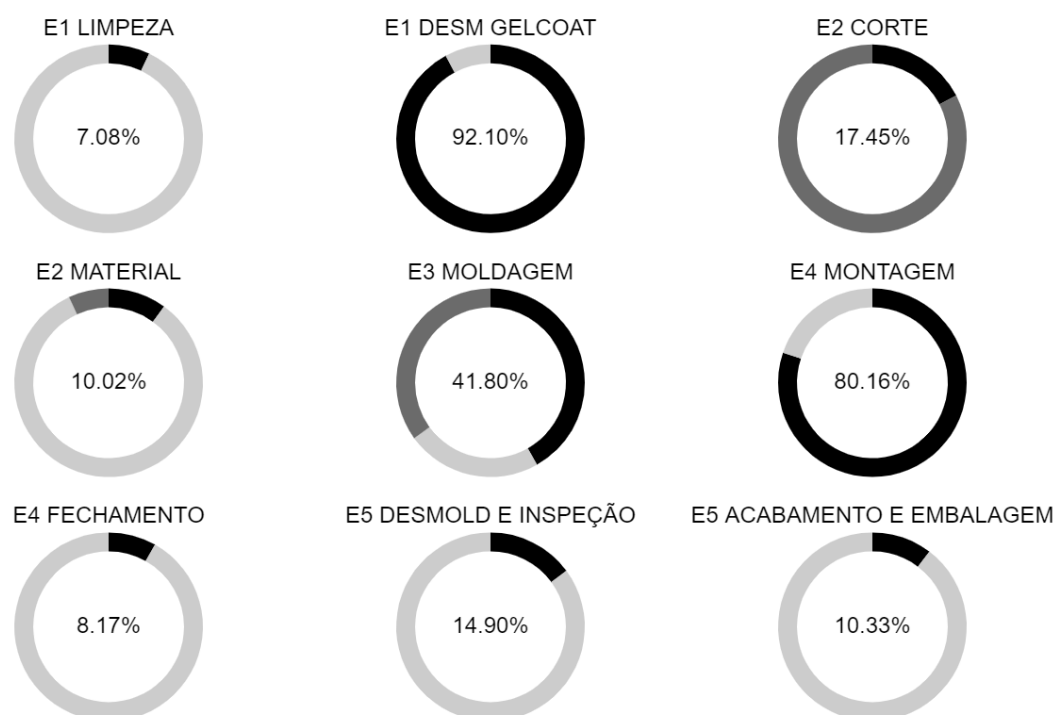
■ Processamento ■ Ocioso ■ Bloqueado



Fonte: Autora

Figura 68 – Utilização das Etapas – C2 – PP

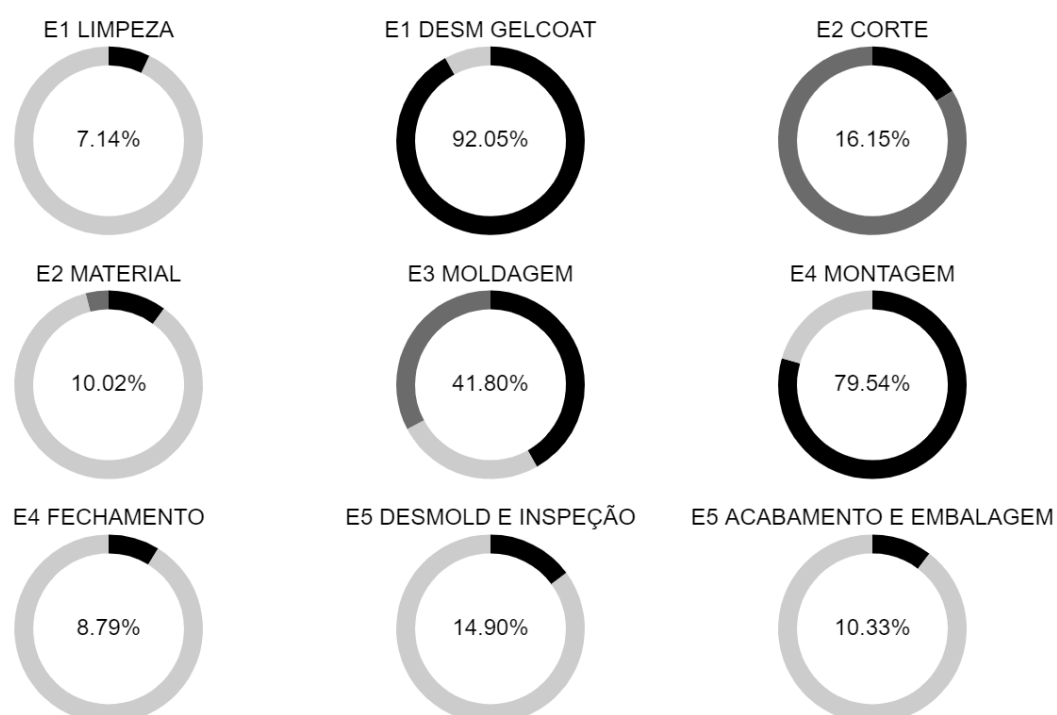
■ Processamento ■ Ocioso ■ Bloqueado



Fonte: Autora

Figura 69 – Utilização das Etapas – C2 – PJG

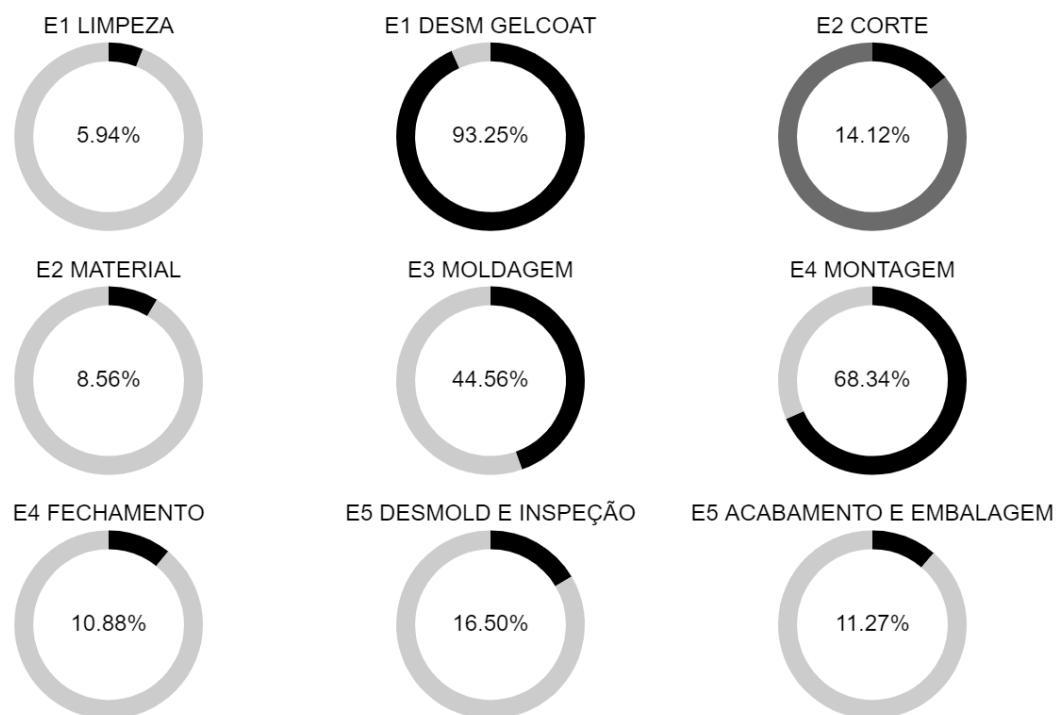
■ Processamento ■ Ocioso ■ Bloqueado



Fonte: Autora

Figura 70 – Utilização das Etapas – C2 – PRE

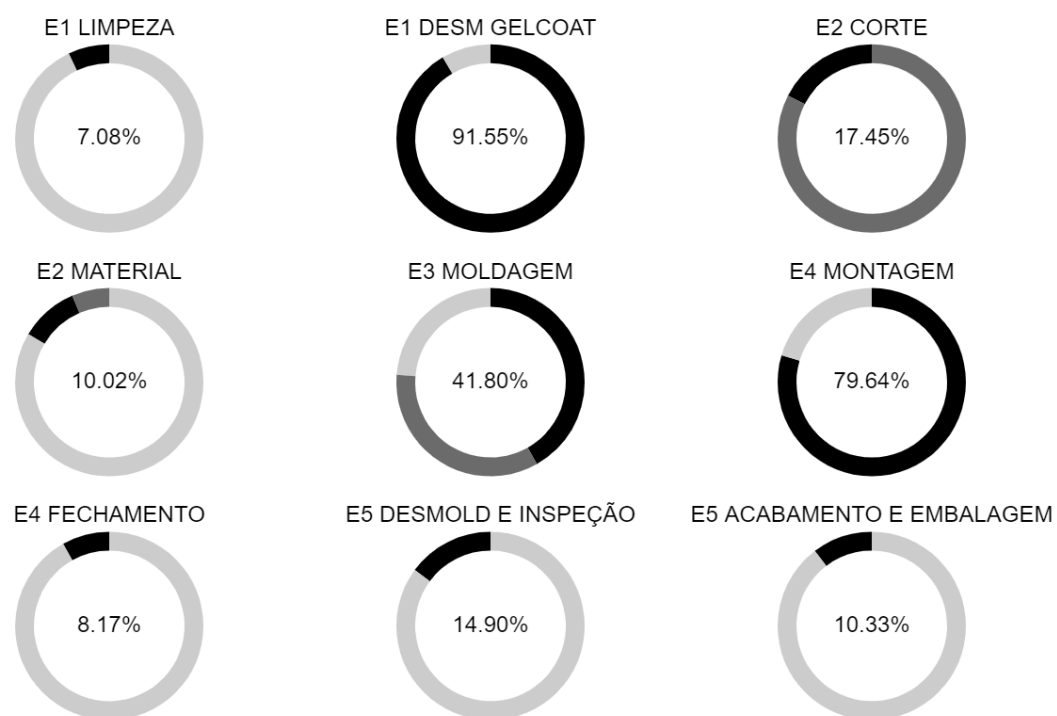
■ Processamento ■ Ocioso ■ Bloqueado



Fonte: Autora

Figura 71 – Utilização das Etapas – C3 – PP

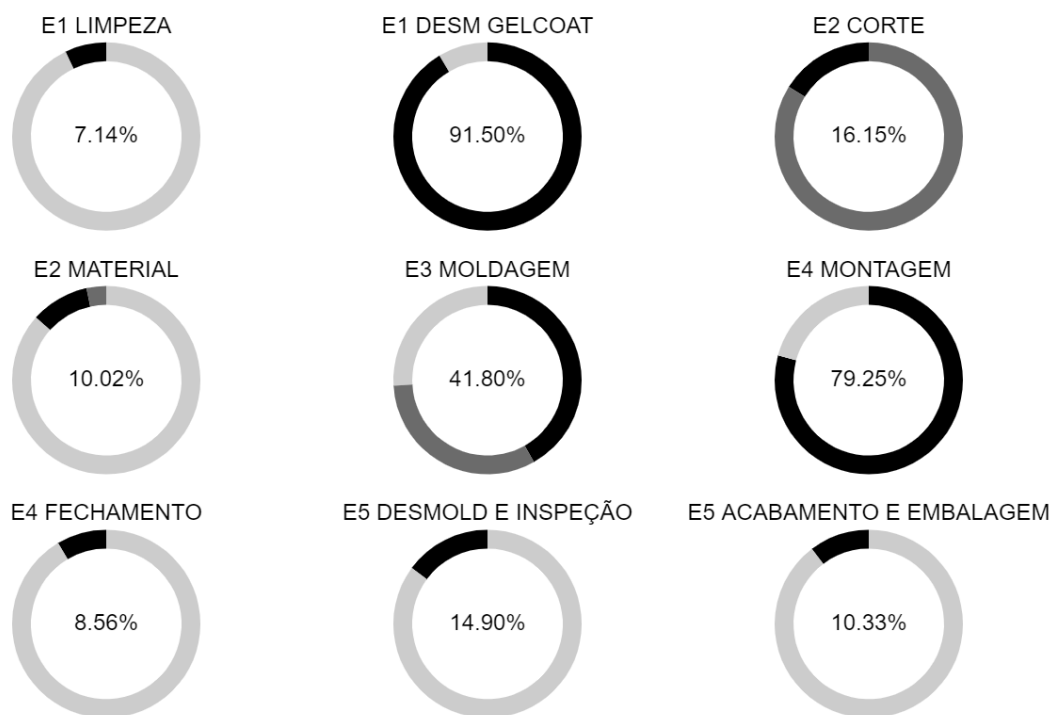
■ Processamento ■ Ocioso ■ Bloqueado



Fonte: Autora

Figura 72 – Utilização das Etapas – C3 – PJG

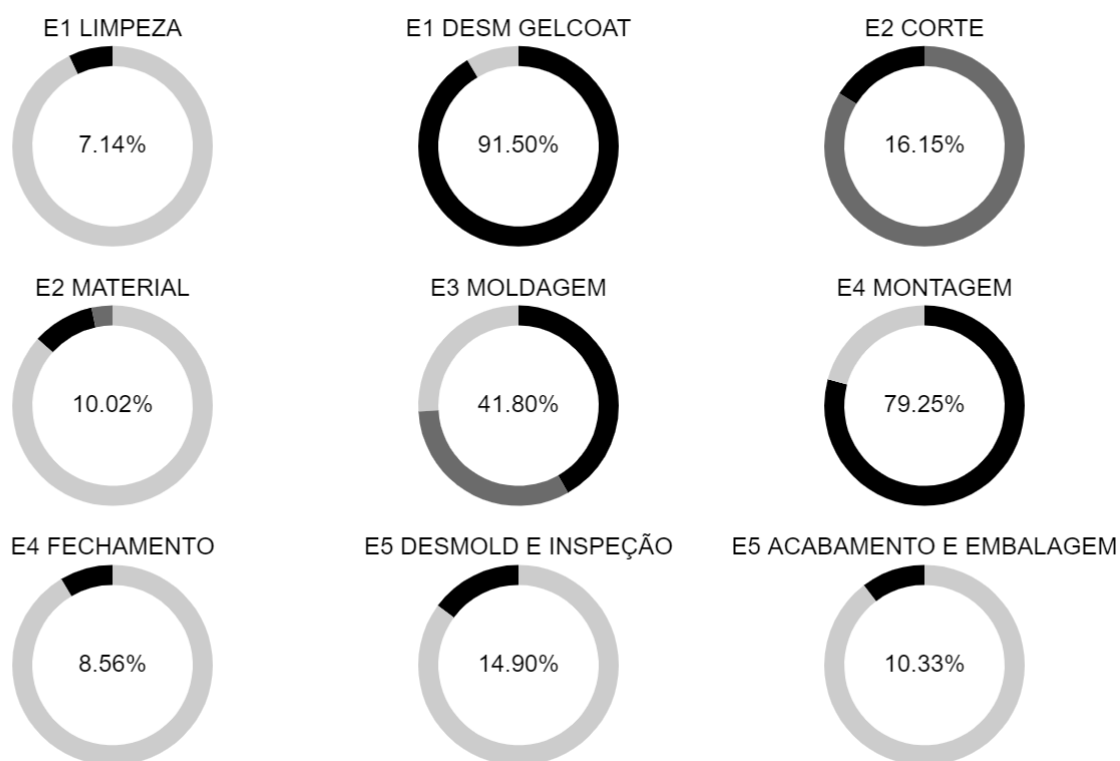
■ Processamento ■ Ocioso ■ Bloqueado



Fonte: Autora

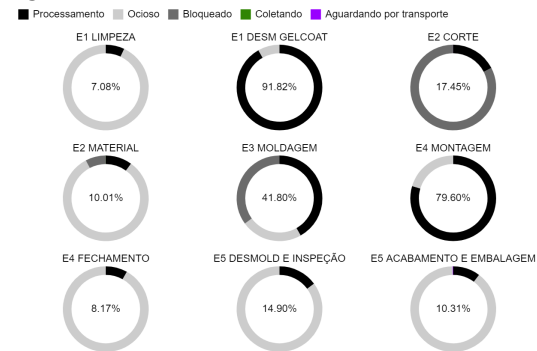
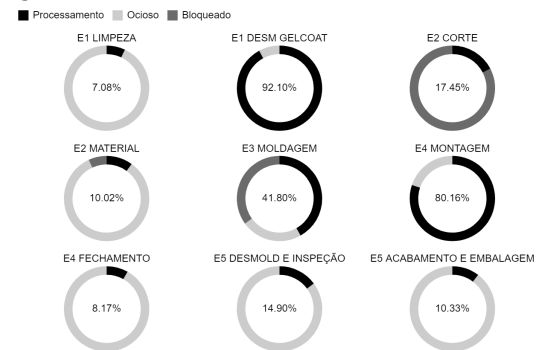
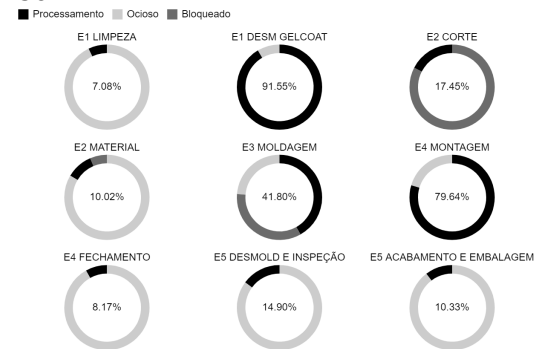
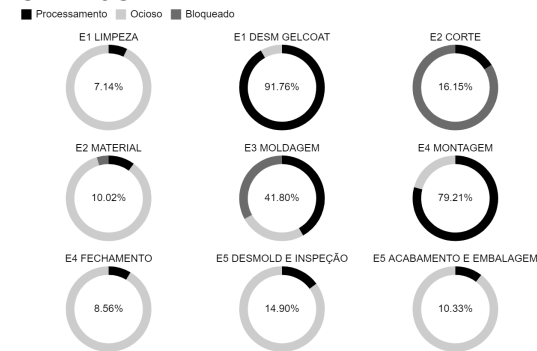
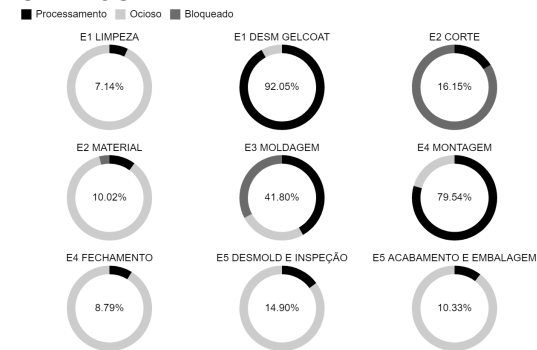
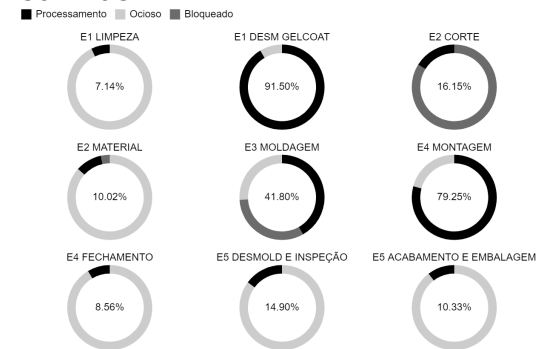
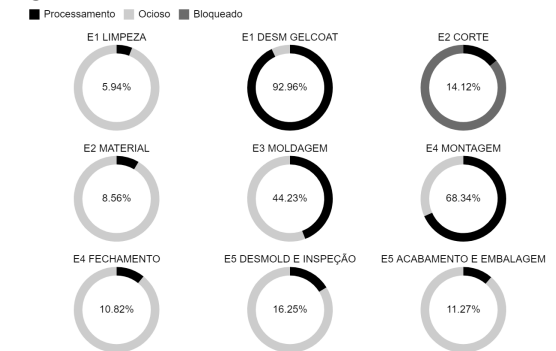
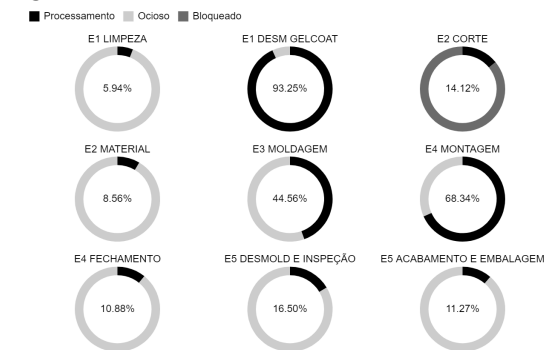
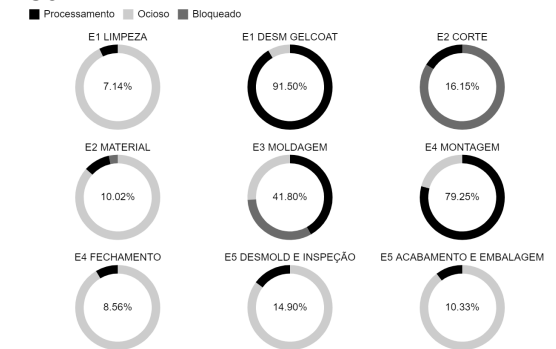
Figura 73 – Utilização das Etapas – C3 – PRE

■ Processamento ■ Ocioso ■ Bloqueado

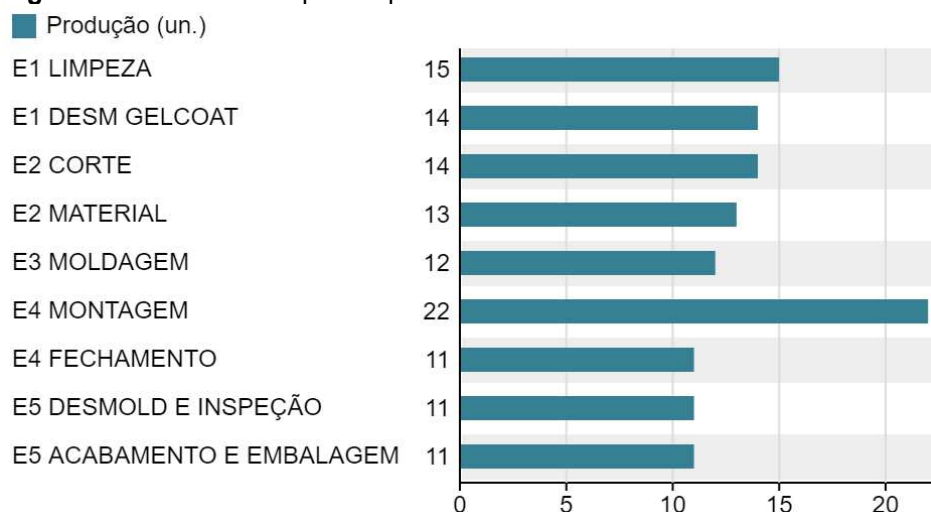


Fonte: Autora

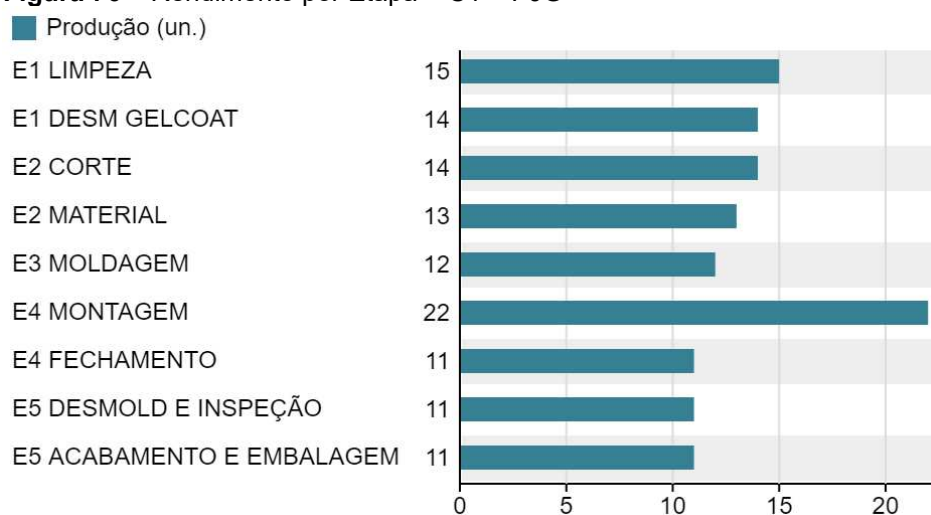
Na Figura 74 é possível visualizar os gráficos de utilização das etapas de forma condensada, favorecendo a análise comparativa entre cenários e painéis. Os tempos de uso são muito próximos entre si para a mesma etapa nas nove situações, tanto entre cenários quanto entre painéis diferentes em um mesmo cenário. Destaca-se que os tempos de ciclo da etapa apresentados nas Figuras 56 a 64, representam o tempo total que o material em processamento permanece na etapa. Já os gráficos de utilização das etapas, ilustradas nas Figuras 66 a 74, expressam o quanto desse tempo o painel está em processamento (sendo produzido), ocioso ou bloqueado (ambos parado). Aqui, o que se considerou relevante observar são os altos bloqueios e ociosidades da maioria das etapas, enquanto E1 Desmoldante e Gelcoat e E4 Montagem estão com grande parte de sua capacidade ocupada. Isso se deve ao desequilíbrio de tempos de ciclo entre as etapas, causando grandes tempos de espera entre uma etapa e outra.

Figura 74 – Utilização das Etapas – Cenários X Painéis**C1 – PP****C2 – PP****C3 – PP****C1 – PJG****C2 – PJG****C3 – PJG****C1 – PRE****C2 – PRE****C3 – PRE**

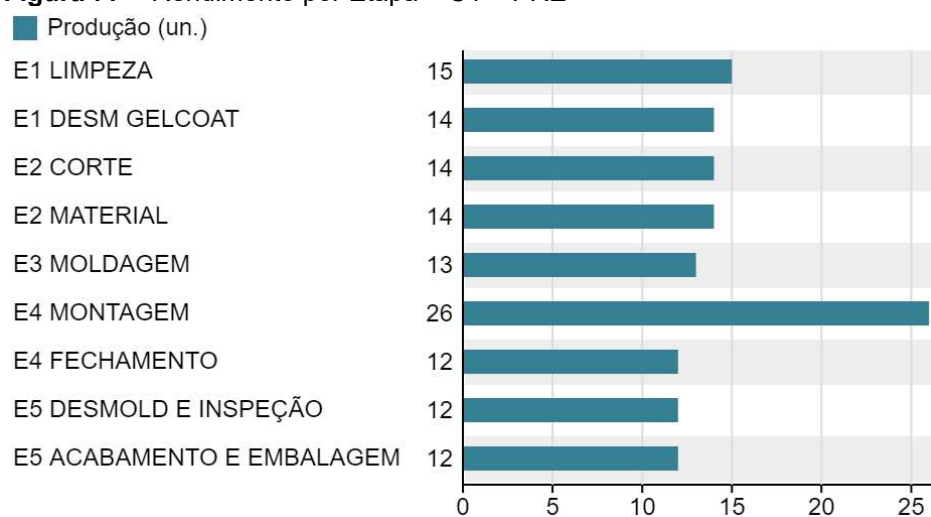
Fonte: Autora

Figura 75 – Rendimento por Etapa – C1 – PP

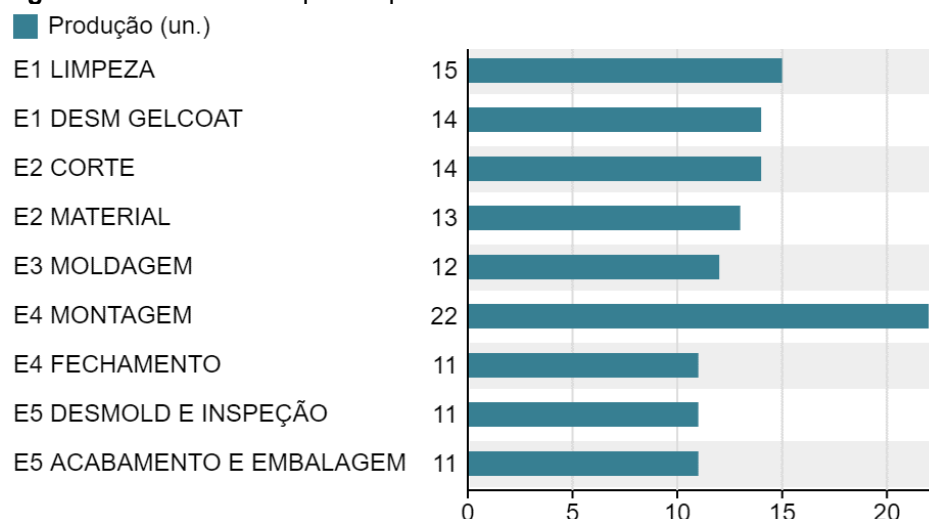
Fonte: Autora

Figura 76 – Rendimento por Etapa – C1 – PJG

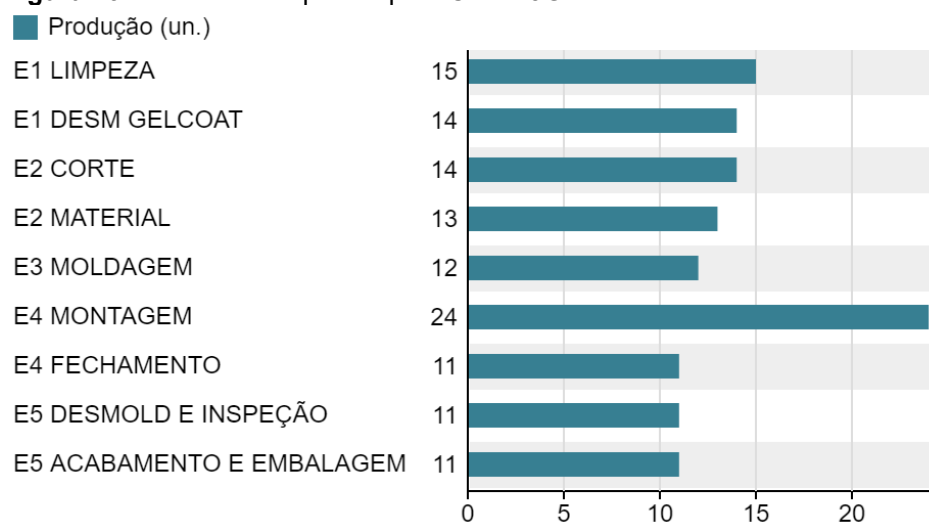
Fonte: Autora

Figura 77 – Rendimento por Etapa – C1 – PRE

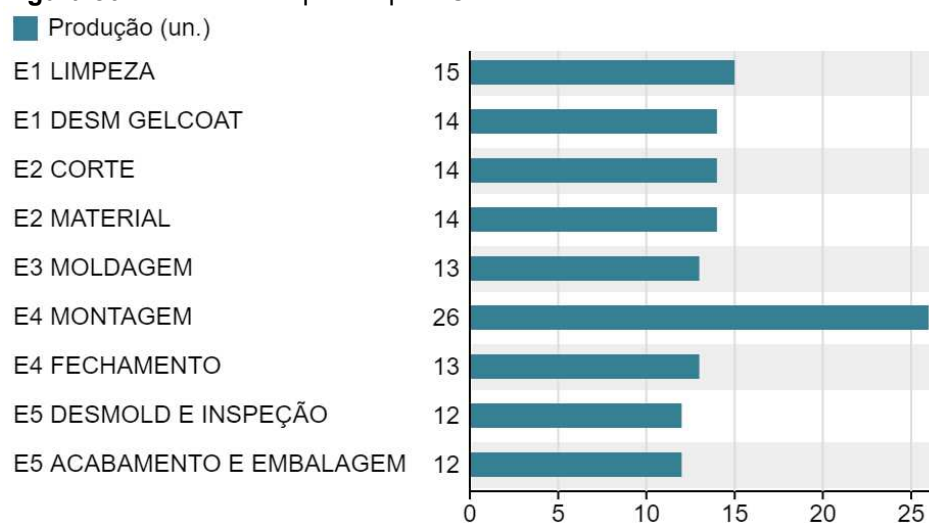
Fonte: Autora

Figura 78 – Rendimento por Etapa – C2 – PP

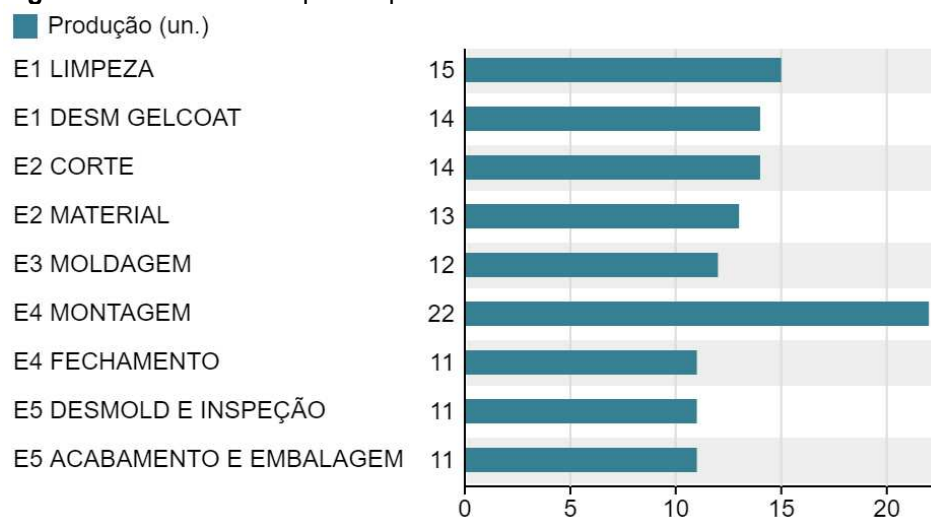
Fonte: Autora

Figura 79 – Rendimento por Etapa – C2 – PJG

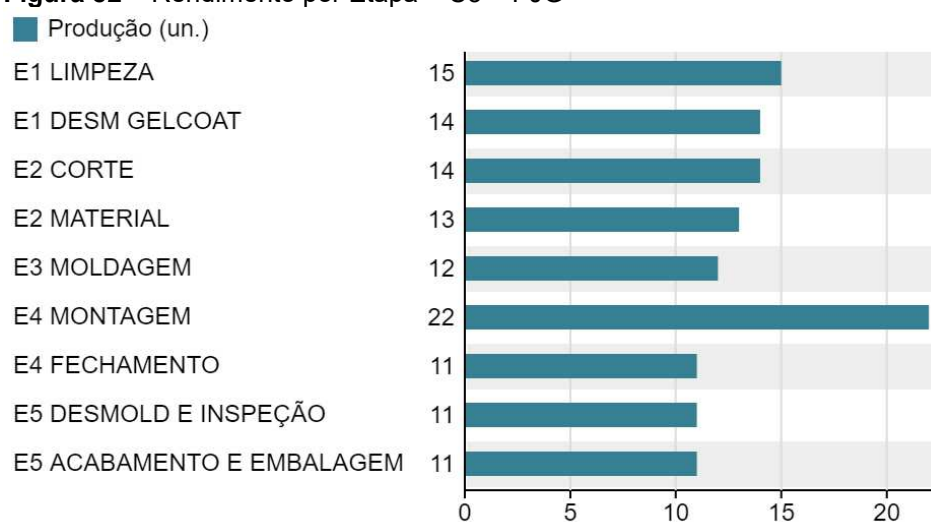
Fonte: Autora

Figura 80 – Rendimento por Etapa – C2 – PRE

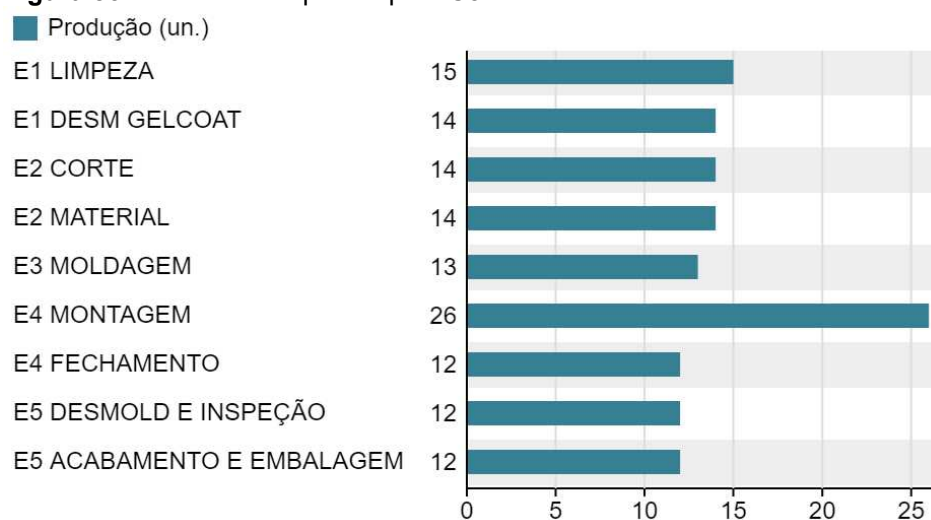
Fonte: Autora

Figura 81 – Rendimento por Etapa – C3 – PP

Fonte: Autora

Figura 82 – Rendimento por Etapa – C3 – PJG

Fonte: Autora

Figura 83 – Rendimento por Etapa – C3 – PRE

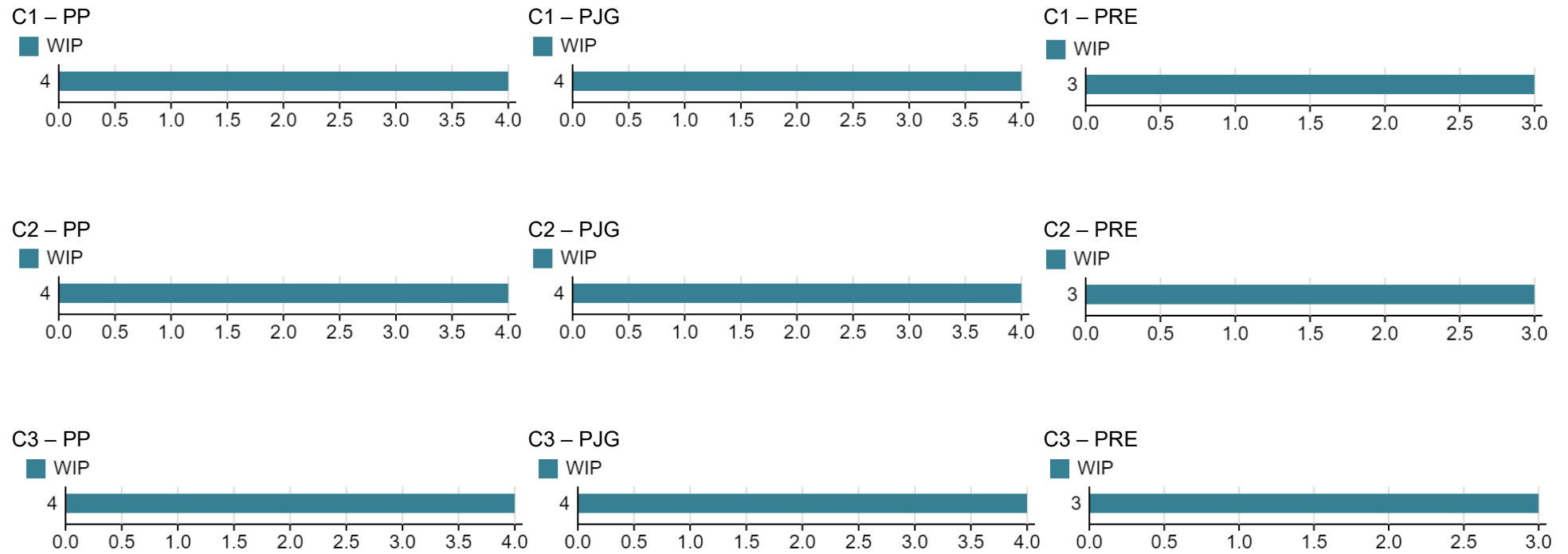
Fonte: Autora

O gráfico de Rendimento (Figuras 75 a 83) mostra a quantidade de produto produzido em cada etapa ao final do período medido, com resultados semelhantes. Na etapa E2 Ajuste Material, a quantidade de painéis em processo é a mesma entre os cenários, mas é produzida uma unidade a mais para PRE. O mesmo acontece em E3 Moldagem, E4 Fechamento, E5 Desmoldagem e Inspeção e E5 Acabamento e Embalagem, quantidades iguais entre os cenários e um a mais para PRE, o que reforça que o grau de complexidade é menor que para PP e PJG, possibilitando a produção de uma unidade a mais.

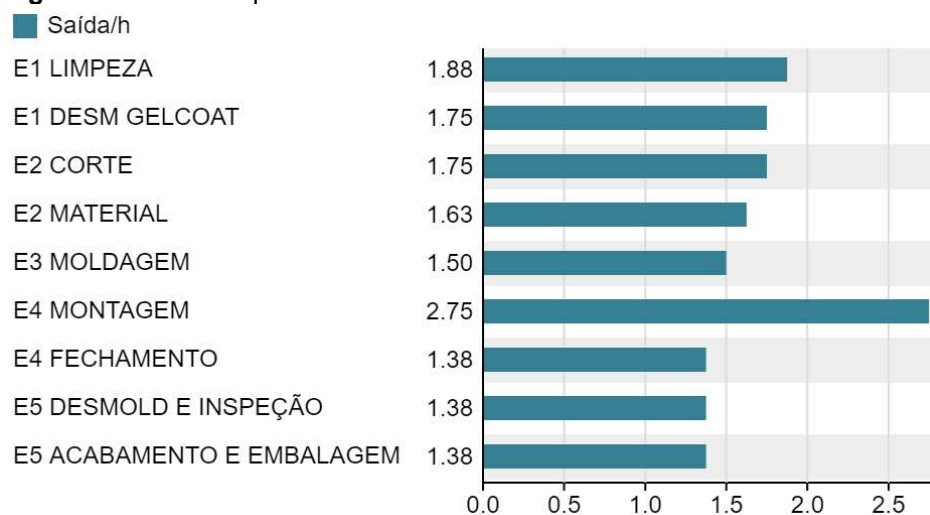
Na etapa E4 Montagem, verifica-se uma aparente duplicação de produtividade; no entanto, tal fato se deve à presença de um separador para ajuste do formato do painel, que contabiliza molde e *prepreg* de forma individual ao invés do conjunto. Consequentemente, a quantidade real nessa etapa equivale à metade da indicada. Esta segue uma lógica semelhante às etapas já analisadas, a mesma quantidade para PJG em comparação ao PP em C1 e C3, mas com um painel adicional para PJG no cenário C2. Para o PRE, observa-se um acréscimo de dois painéis em relação ao PP nos três cenários — o que provavelmente resulta da igualdade dos tempos de processamento e da menor complexidade do PRE frente ao PP e PJG.

O gráfico de Trabalho Em Progresso Composto (*Work in Progress – WIP*) (Figura 84) identifica, desde a entrada até a saída do processo, a quantidade de produto em processamento, ou seja, inacabado, ao final do período, somando todas as etapas. Porém, mede somente relativo ao mesmo recurso, por isso foi considerada a entrada do material *prepreg*, para que se pudesse contabilizar até a saída do painel acabado. Com isso, soma-se à quantidade apresentada no gráfico um AGV com molde da estação de trabalho da etapa E1 de Limpeza ou E1 Desmoldante e Gelcoat, porque a simulação foi configurada para que acontecesse apenas uma etapa no mesmo local, que o caso dessas duas subetapas da etapa E1. Não houve variação entre os cenários e uma unidade a menos de PRE nos três cenários.

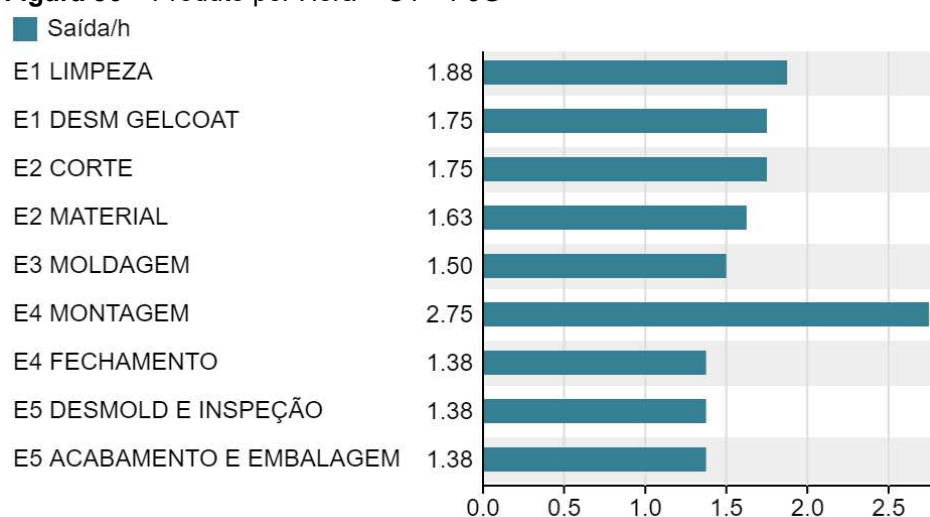
O gráfico de Saída por Hora (Figuras 85 a 93) mede o número de produtos fabricados em cada etapa do processo a cada hora. Os resultados são muito semelhantes, melhorando sutilmente em algumas etapas de um cenário para o outro e conforme aumento o grau de complexidade do painel, ou seja, de PP, PJG para PRE, sendo que a diferença mais significativa acontece para PRE, corroborando com os resultados das outras análises, ou seja, que PRE é menos complexo que PP e PJG, possibilitando uma maior produtividade.

Figura 84 – Trabalho Em Progresso Composto – Cenários X Painéis

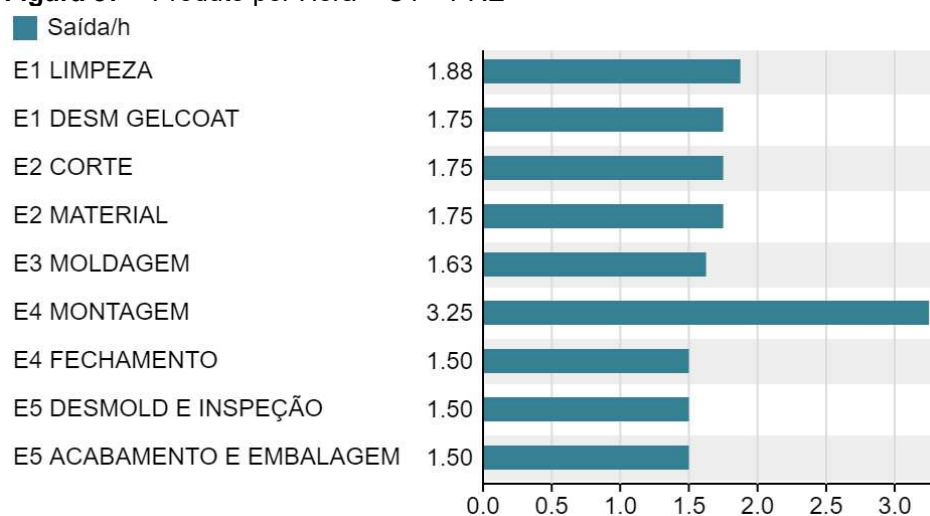
Fonte: Autora

Figura 85 – Produto por Hora – C1 – PP

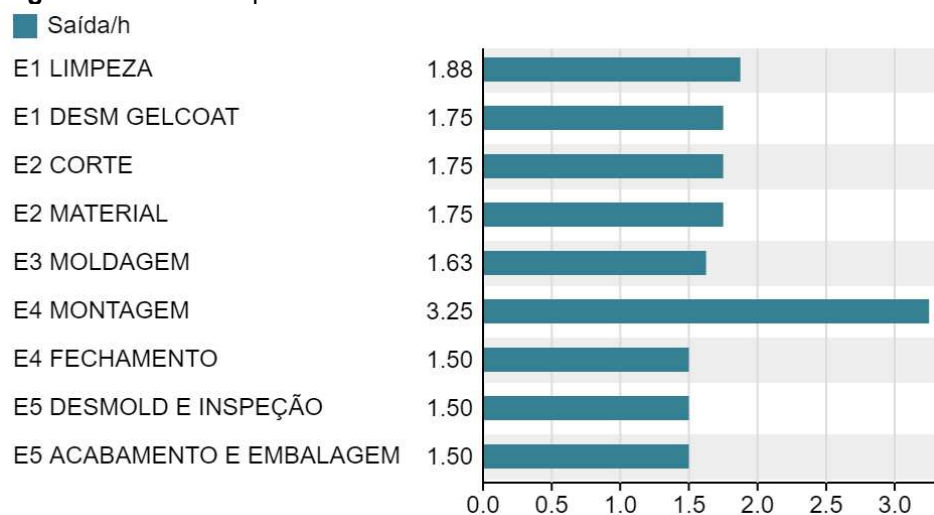
Fonte: Autora

Figura 86 – Produto por Hora – C1 – PJG

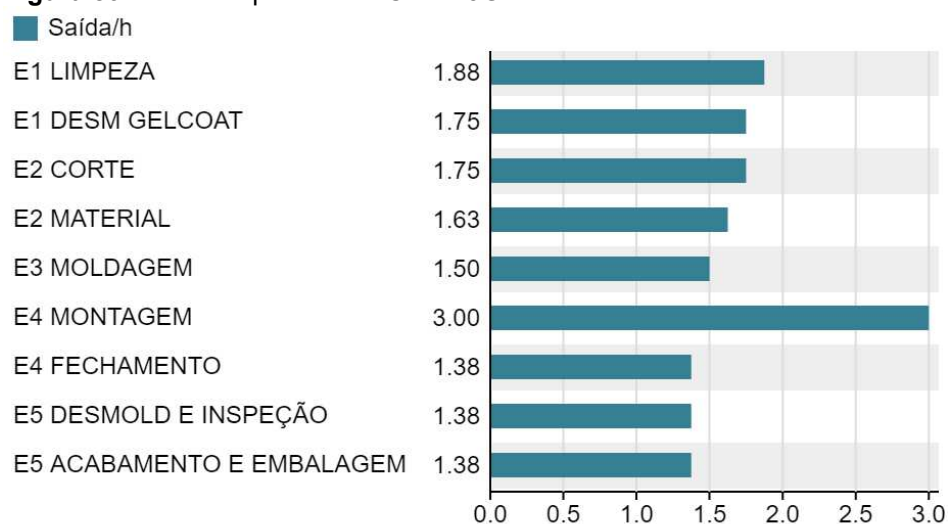
Fonte: Autora

Figura 87 – Produto por Hora – C1 – PRE

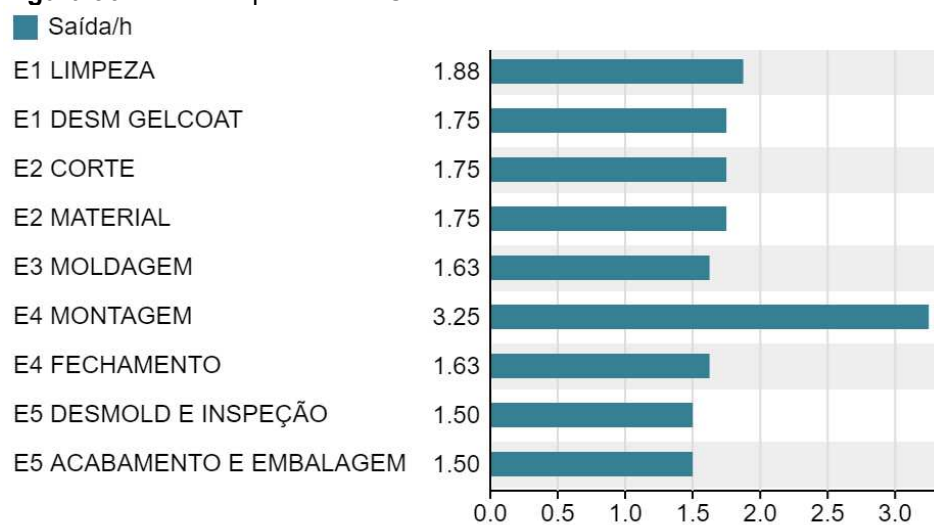
Fonte: Autora

Figura 88 – Produto por Hora – C2 – PP

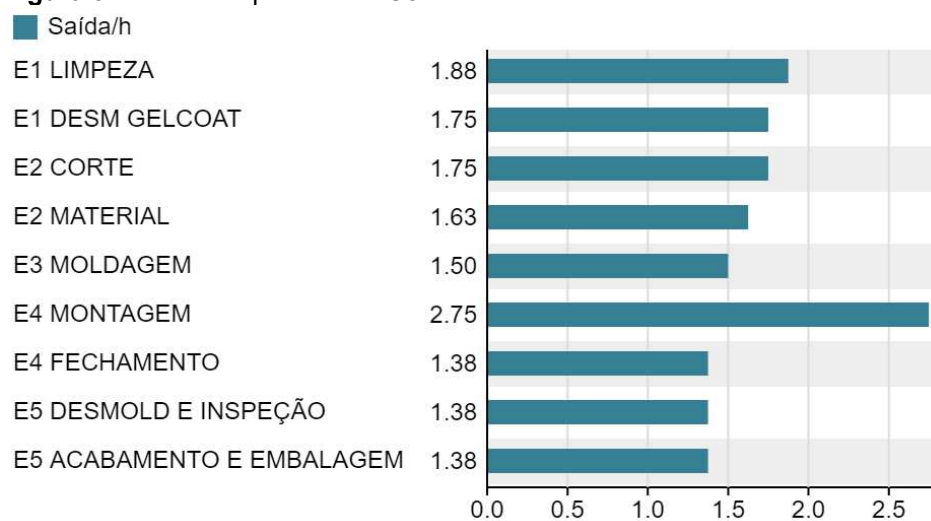
Fonte: Autora

Figura 89 – Produto por Hora – C2 – PJG

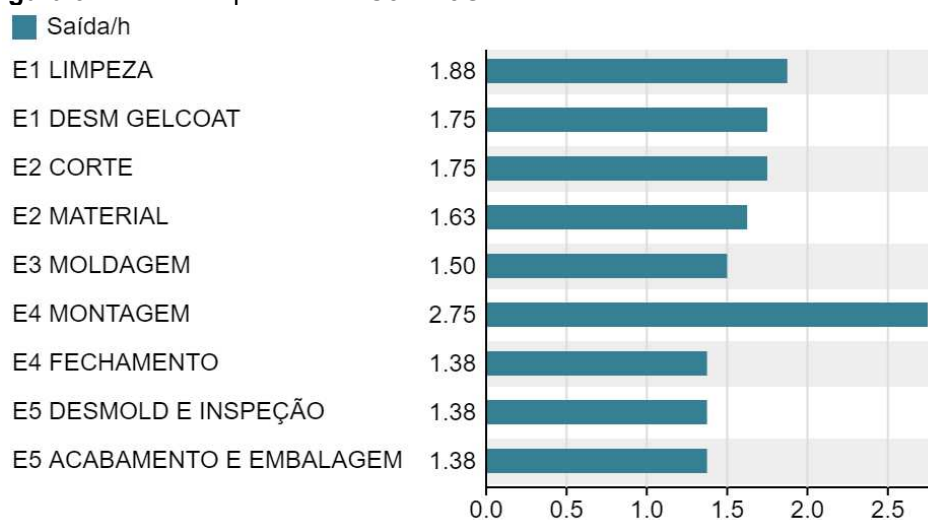
Fonte: Autora

Figura 90 – Produto por Hora – C2 – PRE

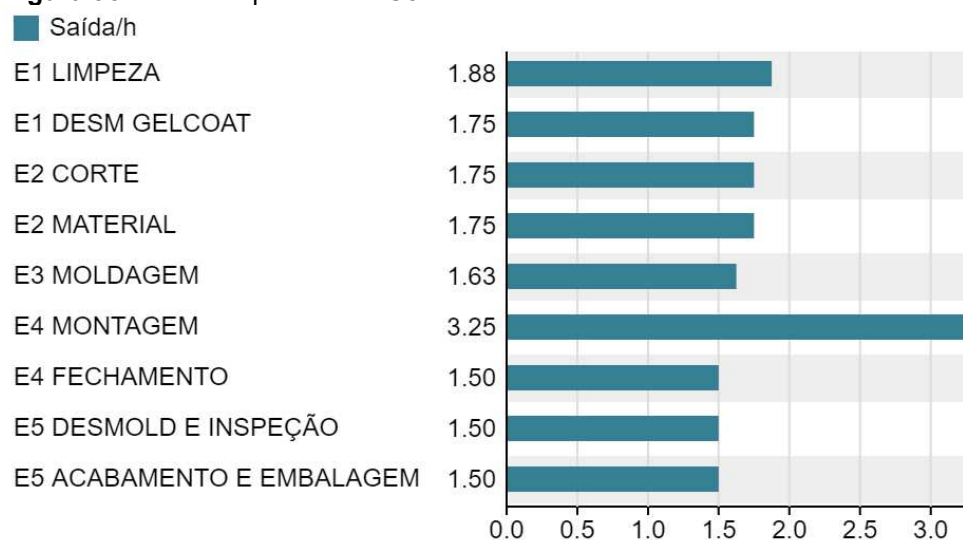
Fonte: Autora

Figura 91 – Produto por Hora – C3 – PP

Fonte: Autora

Figura 92 – Produto por Hora – C3 – PJG

Fonte: Autora

Figura 93 – Produto por Hora – C3 – PRE

Fonte: Autora

Os gráficos de tempo de utilização são os que mais evidenciam a situação do processo, destacando os pontos mais críticos nas etapas E1 Desmoldante e Gelcoat e E3 Moldagem e Cura, ambos devido ao tempo de cura dos materiais aplicados, e E4 Montagem, devido ao número e dificuldade das tarefas, sendo que grande parte é realizada por operadores.

Na etapa E4 Montagem, o trabalho manual humano está presente em diversas tarefas: conectar terminais elétricos e verificar o perfeito alinhamento, sobras de fiação necessárias para conectar nos terminais e tomadas, testes de funcionamento e rigidez dos conectores e tomadas fixados antes que os painéis sejam fechados e a espuma seja inserida, uma vez que ao se unir as metades dos painéis, eventuais desalinhamentos causariam a perda deles, especialmente em relação às conexões de topo, de onde provêm as instalações elétricas. Isso não permitiria um perfeito encaixe, causando patologias imediatas ou futuras, uma vez que a espuma expansiva promove a consolidação, estruturação complementar e imobilização de todas as instalações complementares internas dos painéis.

Para a etapa E1 Desmoldagem e Gelcoat, o tempo depende da técnica e materiais a serem empregados. Assim como na etapa E3 Moldagem e Cura, onde o tempo necessário para o processo de prensagem e cura é um requisito que varia de acordo com a espessura do material colocado nos moldes.

No caso dos PMVV, foi pré-dimensionado em pesquisa de mestrado em andamento (GETIn, ListLab – Laboratório de materiais funcionais avançados sustentáveis/UEL, atual), a espessura de 3,2 mm de laminado estrutural para produzir o prepreg em CBFJ. Porém, seu processo de produção ainda é objeto de pesquisa em andamento (GETIn, ListLab/UEL, atual), para definir se a composição será única para painéis de vedação, cobertura e pavimento, ou se haverá a necessidade de alterações de espessura no biopolímero ou na composição, concentração e disposição das fibras.

Na mesma pesquisa e em outras em andamento (GETIn, ListLab/UEL, atual), ainda sem publicações, está sendo analisada a necessidade do uso de compósito híbrido de base polimérica reforçado por fibras de juta-vidro nas placas modulares de pavimento mostradas na Figura 5 do item 1.4 Caracterização do objeto de estudo: FlexBuild®, assim como escadas de

acesso externas, quando a edificação ficar em terrenos com desníveis acentuados, uma vez que o sistema fica suspenso sobre microestacas industrializadas cravadas e niveladas a 300 mm acima do terreno perfeitamente plano.

4.3.5 Propostas do modelo de fabricação pós análise dos cenários

Dentro dos princípios de desenvolvimento de produto utilizados para elaborar o produto FlexBuild®, já estava previsto um processo de manufatura modular e flexível, cujos princípios atendessem à modularidade fabril e o planejamento por células de produção. Neste contexto, o uso intensivo de robótica permite o paralelismo entre atividades similares, como os vários tipos de painéis, atendidos por robôs ao longo do curso da produção.

Para esta pesquisa, foi simulada a produção de um painel por vez, o que levou à redução da eficiência do processo. Porém, foi possível evidenciar a necessidade de planejamento do conjunto e de otimização das etapas.

Devido às características dos PMVVs, as propostas de cenários se iniciaram no formato de *layout* por produto, porém, buscando a racionalização desde o início, com atividades em paralelo, como o corte do material prepreg e os kits prontos para montagem interna dos painéis.

Em termos de distâncias, posicionamento e fluxo, a proposta considerada mais adequada foi C3, com espaços otimizados e sequência de produção fluida. Porém, o estudo de tempos, uso de recursos e produtividade indicou ainda baixo desempenho do processo, apontando os pontos mais críticos nas etapas E1 Desmoldante e *Gelcoat*, E4 Montagem e E3 Moldagem e Cura, nesta ordem.

Dessa forma, sugere-se, a partir do *layout* do Cenário C3, buscar maior equilíbrio entre os tempos de ciclo e utilização das etapas, aumentando o número de unidades produtivas e criando centrais das etapas críticas, ou outras soluções.

Em E1 é possível criar um estoque provisório, pois a demora nesta etapa é devido à cura do desmoldante e do *geocoat*, que poderia acontecer em estufa ao lado desta estação de trabalho. Ou retornar ao projeto do produto e alterar a solução de proteção contra raios UV (ultravioleta), com o uso de película que não demande tempo de cura nem o uso de desmoldante, eliminando esse tempo do processo.

Na etapa E4 é possível estudar novas formas de preparação dos kits, de modo que levem menos tempo para montagem e testes. O emprego de robôs em mais tarefas também poderia permitir maior agilidade.

Para E3, apesar de ser a terceira etapa com maior tempo de processamento e apresentar ociosidade em mais da metade do tempo de ciclo, ao se reduzir os tempos de E1 e E4 pode passar a ser o maior ponto crítico. Somado a isso, o tempo necessário para o processo de prensagem e cura também é um requisito que deve variar de acordo com a espessura do material colocado nos moldes.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Atualmente, cada vez mais pesquisas mostram a necessidade e importância de buscar alternativas sustentáveis nos modos de vida e consumo da humanidade, a substituição de recursos de fontes não renováveis e com alto consumo de energia para produção, como cimento, aço e cerâmica na construção civil, por materiais e sistemas que sejam passíveis de reutilização, reciclagem ou provenientes de fontes renováveis, podendo contribuir para a redução das emissões de CO₂ e do consumo energético.

A construção civil é um setor da indústria ainda com processos tradicionais altamente dependentes de materiais convencionais e energeticamente intensivos. Neste contexto, a industrialização dos processos de construção, especialmente através da fabricação modular em ambientes fabris, pode oferecer alternativas viáveis e eficientes a curto e médio prazo. A utilização de materiais compósitos, como o bioepóxi reforçado com fibras lignocelulósicas, mostra-se promissora para a produção de painéis modulares de vedação vertical, como os desenvolvidos pelo GETIn no projeto FlexBuild®. A transição dos sistemas construtivos tradicionais para sistemas industrializados pode permitir a produção de edificações com menor impacto ambiental, utilizando materiais sustentáveis e processos mais controlados, com menos perdas, como no transporte, por exemplo.

A presente pesquisa teve como objetivo investigar a aplicação da virtualização fabril no processo de produção de painéis modulares de vedação vertical (PMVV) em compósito de matriz biopolimérica reforçada por fibras de juta (CBRFJ), dentro do conceito de Edificação Industrializada Modular (EIM) habitacional. Partindo da lacuna identificada na literatura, buscou-se integrar ferramentas da Indústria 4.0 — como a Fábrica Virtual (VF), técnicas de Inteligência Artificial baseadas em Redes Neurais (RN) e os princípios de IPD, PLM e DfX — com o intuito de propor e analisar alternativas de *layout* produtivo capazes de otimizar o desempenho fabril.

Um algoritmo da ferramenta computacional baseada em RN foi empregado como recurso para acelerar o processo da pesquisa, entregando como resultado de sua análise os três painéis mais complexos e demorados de produzir, painéis de: janela grande (PJG), porta (PP) e reforçado com sistema integrado elétrico (PRE), além de tempos de tarefas que não puderam ser identificados de outra forma: fixação e retirada dos insertos e fixação das nervuras.

Não foi possível implementar o sistema de controle e contagem de iterações de cálculo para verificar o grau de recorrência utilizado pelo modelo feito em MATLAB. Também não foi possível estabelecer o critério de análise de robustez, devido à limitação de tempo, que fica como sugestão para novos trabalhos.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, pode-se observar o que a literatura afirma (Montevechi *et al.*, 2010) a respeito do modelo conceitual, foi possível ter uma melhor visualização do processo, facilitando ajustes tanto antes quanto durante a modelagem computacional no FlexSim®, como sequência das etapas e momento de entrada de materiais.

Com base no modelo conceitual e na análise do tipo de produto a ser fabricado, foi definida para as propostas a configuração de *layout* do tipo linear ou por produto, em que a disposição física das máquinas e equipamentos obedece ao fluxo do processo produtivo (Silvestri *et al.*, 2025), com algumas atividades em paralelo.

Cada um dos três cenários propostos (C1, C2 e C3) foram simulados para cada um dos três tipos de painéis mais complexos (PP, PJG e PRE), totalizando 9 modelos, a partir dos quais foram gerados 9 gráficos de cada, totalizando 81 gráficos, além de três tabelas. Entre os tipos de painéis para um mesmo cenário, foram alterados os tempos de cada etapa, mantendo o *layout*. A simulação dos nove modelos foi analisada em termos de fluxo, distância, tempo, uso de recursos e produtividade.

Em relação às distâncias, durante a modelagem dos cenários, os espaçamentos foram sendo otimizados de um para outro, partindo do C1 com 163 m (72 m por 6 m), passando por C2 com 109 m (50,50 m por 4 m), uma redução de 54 m (33%), até C3 com 75,00 m (23 m por 14,50 m), uma redução de 34 m (31%) em relação a C2 e 88 m (54%) em relação a C1.

Depois de inseridos os tempos de processamento conforme Tabela 5, a redução do tempo de ciclo também pode ser identificada entre os cenários, porém, diferente do previsto, não de forma acentuada. Para PP, o tempo de ciclo de produção do painel passa de 8.906 s em C1 para 8.827 em C2, correspondendo a uma redução de apenas 79 s (0,9%); e 8.869 em C3, representando diminuição de 42 s (0,4%) em relação à C1, ou seja, praticamente desprezível.

Tais resultados mostram que para os cenários propostos os tempos de deslocamento não são significativos em relação aos tempos de processamento. Este achado é expressivo, visto que difere de forma contrastante da construção civil tradicional, em que as atividades que não agregam valor, ultrapassam metade das atividades (Daniel *et al.*, 2019), com destaque para a parcela referente a transporte (Naz; Fredriksson; Ivert, 2022).

Porém, a relevância da otimização de distâncias e disposição alcançadas permanece, pois além de reduzir drasticamente a ociosidade do veículo no caminho de retorno, a disposição em C3 apresenta ocupação do espaço mais adequada tanto ao processo, reduzindo também outros possíveis deslocamentos de operários e outros transportes, quanto às dimensões de imóveis para alocação da planta fabril em um possível imóvel.

Comparando os painéis para o cenário C3, PP apresenta 8.869 s, PJG 8.743 s, 126 s a menos (1,4%); e PRE 7.584 s, 1285 s a menos (14,5%) em relação a PP. Nota-se que a diferença do tempo de ciclo entre os painéis de esquadrias para um mesmo cenário é pouco expressiva, pois apresentam dificuldade de montagem semelhante. Já o decréscimo do tempo de ciclo do painel de elétrica é acentuado, mostrando redução significativa da complexidade em comparação aos painéis de aberturas. Ressalta-se que essa variação de tempo indica características distintas inerentes a cada painel e a produção de todos os tipos é necessária para a montagem completa da unidade habitacional, razão pela qual o equilíbrio entre suas capacidades produtivas constitui fator central no planejamento do processo.

Analisando os tempos de ciclo de cada etapa, entre cenários, a diferença é pequena, pois os tempos de processamento são os mesmos para cada painel. Logo, como observado nos tempos de ciclo do painel, a diferença de tempo entre os cenários não se mostrou relevante.

Comparando os painéis para o cenário C3, diferenças mais expressivas acontecem nas etapas de: E2 Material, com decréscimo de 20,0% entre C1 e C2 e de 44,4% de C1 para C3; E3 Moldagem e Cura, somente 4,2% entre C1 e C2, mas 45,4% de C1 para C3, talvez devido a variação de tempo de espera para PRE, pois o tempo de processamento dessa etapa para os três tipos de painéis é o mesmo; e E3 Montagem com redução de 1,5% entre C1 e C2 e 22% de

C1 para C3, reafirmando a pequena variação nos tempos de produção dos painéis de esquadrias, enquanto o tempo de produção do painel de elétrica é menor, demonstrando sua menor complexidade.

Na avaliação do uso de recursos, os tempos são muito próximos entre si para a mesma etapa nas nove situações, tanto entre cenários quanto entre painéis diferentes em um mesmo cenário. Nos gráficos de utilização das etapas, observou-se os altos bloqueios e ociosidades da maioria das etapas, enquanto E1 Desmoldante e Gelcoat e E4 Montagem estão com grande parte de sua capacidade ocupada. Isso se deve ao desequilíbrio de tempos de ciclo entre as etapas, causando grandes tempos de espera entre uma etapa e outra. O estudo de produtividade indicou resultados semelhantes entre cenários e painéis.

A etapa E2 Corte é indicada nos gráficos de tempo de ciclo das etapas (Figuras 56 a 64) com o maior tempo de ciclo. Porém, seus tempos de processamento são em torno de 300 s, então grande parte desse tempo é em espera, deixando o equipamento de corte CNC com alta taxa de ociosidade, como demonstrado nos gráficos de utilização das etapas (Figuras 65 a 74).

Em termos de distâncias, posicionamento e fluxo, a proposta considerada mais adequada foi C3, com espaços otimizados e sequência de produção fluida. Entretanto, em termos de tempos, uso de recursos e produtividade, o estudo ainda apontou baixo desempenho do processo, apontando como pontos mais críticos as etapas E1 Desmoldante e *Gelcoat*, E4 Montagem e E3 Moldagem e Cura, nesta ordem. E1 e E3, ambos devido ao tempo de cura dos materiais aplicados, e E4, devido ao número e dificuldade das tarefas, sendo que grande parte é realizada por operadores. Em vista disso, sugere-se partir da proposta de *layout* do cenário C3 e estudar melhorias nos problemas identificados.

Em E1, a cura dos materiais poderia acontecer em estufa ao lado desta estação de trabalho, ou retornar ao projeto do produto e alterar a solução de proteção contra raios UV para opção que não necessite cura ou desmoldante. Na etapa E4, poderiam ser estudados kits que demandem menos tempo de montagem e teste, além do emprego de robôs em mais tarefas. Para E3, o tempo pode variar de acordo com a espessura do material colocado nos moldes. Entretanto, cada estratégia deve ser testada uma a uma e o modelo reformulado simulado para,

a partir da avaliação dos novos resultados, serem tomadas as decisões subsequentes, para a busca do equilíbrio do processo.

Outras propostas possíveis podem ser a alteração das velocidades de deslocamento dos veículos para mais e menos e analisar qual a interferência no ciclo produtivo, para um mesmo tipo de painel. Depois, para um ciclo em que tipologias variadas de painéis são produzidas paralelamente em função de diferentes tempos de processamento.

Visto que o processo produtivo ainda se encontra em fase planejamento, a integração entre as etapas de levantamento de dados e o projeto do produto viabiliza a aplicação dos conceitos de IPD e PLM. Essa abordagem estabelece uma inteligência inicial no projeto, em que a multidisciplinaridade atua como fonte de aprendizado e ferramenta estratégica na tomada de decisões e na resolução de pontos críticos antes da implementação física. Ao priorizar o ciclo de concepção, verificação e validação por meio da simulação, assegura-se que o fluxo produtivo seja consolidado de forma colaborativa e antecipada, garantindo que a contratação e a produção ocorram apenas após a consolidação do projeto. Assim, a eficiência do sistema produtivo integral passa a depender não apenas da automação e do maquinário, mas dessa troca de informações na origem e da capacidade de testar e otimizar o futuro processo por meio da prototipagem digital, validado pela atuação conjunta de diferentes especialidades.

A análise dos três cenários propostos (C1, C2 e C3) evidenciou que a virtualização é um recurso eficaz para a antecipação de ajustes operacionais e para a identificação de pontos críticos, possibilitando a proposição de melhorias.

O aprimoramento no uso da RN pode refinar a sequência de produção. O algoritmo é passível de adaptação para determinar o fluxo de montagem dos PMVV para uma unidade da EIM ou mais, que tomaria o menor tempo, embora os resultados ainda consistam em previsões.

Em pesquisas subsequentes, a RN será completada para fazer essa análise para todos os componentes dessa tipologia da edificação (FlexBuild®) e a partir do modelo possibilitar ser reformulada e extrapolar para outros sistemas construtivos industrializados.

Do ponto de vista ambiental e tecnológico, resultados como a eficiência fabril obtida pela simulação digital reforçam que soluções de ferramentas de fábrica virtual podem reduzir impactos

negativos da construção tradicional, ampliando a sustentabilidade em todo o ciclo de vida da edificação.

No campo científico, a tese contribui ao demonstrar que a combinação de realidade virtual e inteligência artificial aplicada à construção civil constitui uma abordagem inédita e promissora, com potencial de aprofundar o campo de investigação no planejamento e gestão da produção de edificações industrializadas. No campo aplicado, fornece subsídios para que empresas do setor possam adotar estratégias baseadas em simulação computacional, reduzindo custos, tempo e desperdícios antes da implementação física.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros explorem:

- (i) Simulação da fabricação de todos os tipos de painéis e em conjunto para a formação dos lotes de unidades habitacionais;
- (ii) Adaptação do algoritmo da RN para encontrar a sequência de produção dos PMVV para uma unidade da EIM ou mais, que tomaria o menor tempo;
- (iii) Ampliação do modelo da RN para todos os componentes da EIM e posteriormente diferentes tipologias de edificações industrializadas;
- (iv) Retroalimentação das informações de simulação da produção para ajustar o projeto do produto.
- (v) Incorporação de variáveis econômicas e ambientais complementares, como custos de implantação e operacionais, custos ocultos e emissões de carbono (Análise do Ciclo de Vida – ACV);
- (vi) Implementação do sistema de controle e contagem de iterações de cálculo para verificar o grau de recorrência utilizado pelo modelo feito em MATLAB, assim como estabelecimento do critério de análise de robustez.

Tais avanços podem consolidar a abordagem proposta como referência metodológica para o desenvolvimento de sistemas construtivos mais eficientes, resilientes e sustentáveis, em consonância com os desafios contemporâneos da construção civil.

6 REFERÊNCIAS

3M. **Paint Protection Film Installation Guide**. Campinas: [s. n.], 2024. Disponível em: <https://multimedia.3m.com/mws/media/2190517O/3m-paint-protection-film-installation-guide-pt.pdf>. Acesso em: 19 set. 2025.

ABNT. **ABNT NBR 13930:2008 - Prensas mecânicas - Requisitos de segurança**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2008.

ABNT. **NBR 15575-1-6: 2013-2024 - Edificações habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024a.

ABNT. **NBR 15873: 2024 - Coordenação modular para edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024b.

ABNT-ISO. **NBR ISO 9000: 2015 - Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário**. Rio de Janeiro: ABNT-ISO, 2015a.

ABNT-ISO. **NBR ISO 9001: 2015 - Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT-ISO, 2015b.

AKIL, H. M. *et al.* Kenaf fiber reinforced composites: A review. **Materials & Design**, [s. l.], v. 32, n. 8–9, p. 4107–4121, 2011. Disponível em: Acesso em: 23 fev. 2025.

ALMEIDA, S. T. de; BORSATO, M.; UGAYA, C. M. L. Application of exergy-based approach for implementing design for reuse: The case of microwave oven. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 168, p. 876–892, 2017.

AMARAL, D. C. *et al.* **Gestão de projetos em desenvolvimento de produtos**. São Paulo: Saraiva, 2006. Disponível em: <https://www.editoradodireito.com.br/gestao-de-desenvolvimento-de-produtos---uma-referencia-para-a-melhoria-do-processo/p>.

AMBROSIO, V. C. L. **Verificação numérico-computacional do comportamento estrutural de coberturas tipo sanduíche produzidas com compósito híbrido**. 2023. 1–141 f. Dissertação - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

ARBABI, H. *et al.* A data-driven multi-criteria decision-making approach for assessing new product conceptual designs. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 236, n. 14, p. 1900–1911, 2022.

ARDALANI, S.; RANKIN, J. H.; LEI, Z. **A Discrete Event Simulation-Based Approach for Production Planning and Plant Layout Design of Flexible Modular Building Manufacturing**. [S. l.: s. n.], 2025. v. 498 LNCE

AUTODESK. **3D Simulation Modeling and Analysis Software. Flexsim**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.flexsim.com/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

BLAMPAIN, F. *et al.* Digital thread and building lifecycle management for industrialisation of construction operations: a state-of-the-art review. *In:* , 2022. **International Joint**

Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing. [S. l.]: Springer, 2022. p. 884–894.

BOSCH-REXROTH. **Ergonomics Guidebook for Manual Production Systems.** Stuttgart (Germany): [s. n.], 2012. Disponível em: <https://www.valin.com/documents/pdf/Bosch-Ergonomic-Guidebook.pdf>. Acesso em: 19 set. 2025.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR-12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.** Brasília: MTE, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-12-atualizada-2022-1.pdf>. Acesso em: 6 set. 2025.

BUDELMANN, D.; SCHMIDT, C.; MEINERS, D. Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication. **Polymer Composites**, [s. l.], v. 41, n. 9, p. 3440–3458, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.25642>.

BULLMER. **HOCHLAGENCUTTER PROCUT R90.** Mehrstetten (Germany): [s. n.], 2025. Disponível em: <https://www.bullmer.de>.

CAMPIOLI, A.; LAVAGNA, M. Life cycle design in building and construction sector. *In:* , 2007. **3rd International Conference on Life Cycle Management.** [S. l.: s. n.], 2007.

CARDIM, H. P. **Caracterização físico-mecânica de fibras de dracaena trifasciata como potencial reforço de compósitos poliméricos.** 2022. 1–71 f. Dissertação - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2022.

CEF. **Caderno técnico de composições para instalações de água quente em CPVC.** Brasília: [s. n.], 2023a. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/Downloads/sinapi-cadernos-tecnicos/SINAPI-CT-INSTALACOES-PREDIAIS-DE-AGUA-QUENTE-EM-CPVC.pdf>. .

CEF. **Caderno técnico de composições para instalações elétricas aparentes.** Brasília: [s. n.], 2023b.

CHEM-TREND. **Zyvax®.** Howel (U.S.A): [s. n.], 2025. Disponível em: <https://chemtrend.com/brand/zyvax/?lang=pt-br>. Acesso em: 13 set. 2025.

CHEN, Y. *et al.* Construction 4.0, Industry 4.0, and Building Information Modeling (BIM) for Sustainable Building Development within the Smart City. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 16, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/16/10028>.

CHEN, L. *et al.* Green building practices to integrate renewable energy in the construction sector: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 751–784, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01675-2>.

CIONITA, T. *et al.* A brief review on the utilization of biopolymers in the manufacturing of natural fiber composites. **Journal of Engineering Science and Technology**, [s. l.], v.

19, n. 1, p. 52–66, 2024.

CONCEIÇÃO, M. M. M. da *et al.* Construction waste in Brazil: a narrative review. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. e67223–e67223, 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Oportunidades para a indústria 4.0: aspectos da demanda e oferta no Brasil**. [S. l.]: CNI Brasília, 2017.

CORREA, F. R. Cyber-physical systems for construction industry. **Proceedings - 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems, ICPS 2018**, [s. l.], p. 392–397, 2018. Disponível em: https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_46fc8636164c8dbdf6eM496e1017816339&database=cpx.

COUNCIL FOR SCIENCE TECHNOLOGY AND INNOVATION (CSTI). **Report on The 5th Science and Technology Basic Plan**. Tóquio: [s. n.], 2015.

COUNCIL FOR SCIENCE TECHNOLOGY AND INNOVATION (CSTI). **Science and Technology Policy: Society 5.0**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5_0/index.html. Acesso em: 23 out. 2021.

COX, W. E. Product life cycles as marketing models. **The journal of business**, [s. l.], v. 40, n. 4, p. 375–384, 1967.

CUNHA, G. D. A evolução dos modos de gestão do desenvolvimento de produtos. **Produto & Produção**, [s. l.], v. 9, n. 2, 2008.

DASSAULT, S. **DELMIA Architecture, Engineering & Construction Solutions**. [S. l.], 2024. Disponível em: https://www.3ds.com/products/delmia/architecture-engineering-construction?_gl=1*96o4gp*_up*MQ..*_ga*MTYxOTkwMTk5Mi4xNzMyODA1Nzc5*_ga_DYJDKXYEZ4*MTczMjgwNTc3OS4xLjAuMTczMjgwNTc3OS4wLjAuMA..*_ga_39DKQ0LYW1*MTczMjgwNTc3OS4xLjEuMTczMjgwNTc3OS4wLjAuMA.. Acesso em: 27 nov. 2024.

DASSAULT SYSTÈMES. **SOLIDWORKS®**. Educ Ed 2018-2019ed. Waltham: Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2018.

DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, T. and the Regions. C. T. F.; EGAN, J. **Rethinking construction**. [S. l.]: DETR, 1998.

DISSELKAMP, J. P. *et al.* Integrated product and production development - a systematic literature review. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 119, p. 716–721, 2023. Disponível em: Acesso em: 5 jan. 2025.

DUARTE JUNIOR, P. C.; FRANCISCO, S. A. M.; ORTENZI, A. Application of virtual manufacturing to predict scenarios and reduce physical and non-physical losses in construction. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 132, n. 11, p. 5473–5485, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13702-9>.

DUARTE, P. C.; NAKAO, F.; ORTENZI, A. Integrated product development and lifecycle management in building production – A case study for logistic of mortar distribution in building sites. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 32, p. 101802, 2020. Disponível em: Acesso em: 22 jul. 2021.

DUDA, J.; OLESZEK, S.; SANTAREK, K. **The Impact of PLM Systems on the Digital Transformation of Manufacturing Companies**. [S. l.: s. n.], 2024.

DUTTA, A.; THIBAUT, M.; ÅKERMO, M. Forming of Hybrid (CF UD Prepreg - Advanced SMC) Composite Layups. **Applied Composite Materials**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 1073–1108, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10443-025-10314-8>.

ECOCOMPOSITOS. **Criamos a química que nos une**. Algarve (Portugal): Ecocompositos, 2025. Disponível em: <http://www.ecocompositos.pt>.

ERSAVAS, T.; SMITH, M. A.; MATTICK, J. S. Novel applications of Convolutional Neural Networks in the age of Transformers. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 14, n. 1, 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85191710902&doi=10.1038%2fs41598-024-60709-z&partnerID=40&md5=b88fdde18961c030fb1ffc329285d1e4>.

FENG, Y.; GAO, G. Design and simulation study on logistics planning in automatic plant factory based on tecnomatix plant simulation. In: , 2019. **Proceedings - 2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing, WCMEIM 2019**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 667–671.

FIRJAN. FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Panorama da inovação: Indústria 4.0**. Rio de Janeiro: FIRJAN, 2016. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-0-1.htm>.

FIRJAN. FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO; SENAI. SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Indústria 4.0 no Brasil: oportunidades, perspectivas e desafios**. Rio de Janeiro: Firjan SENAI, 2019. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-0-no-brasil-oportunidades-perspectivas-e-desafios.htm>.

FLEISCHER, J. *et al.* Composite materials parts manufacturing. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 603–626, 2018.

FRANCALANZA, E. *et al.* An “Industry 4.0” digital model fostering integrated product development. In: , 2018. **2018 IEEE 9th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT 2018**. [S. l.: s. n.], 2018. p. 95–99.

FRANCISCO, S. A. M.; ORTENZI, A. **Gestão do processo de logística e montagem de edificações industrializadas modulares**. 1. ed. São Paulo: Editora Dialética, 2023.

GERA, R.; KUMAR, A. Artificial Intelligence In Consumer Behaviour: A Systematic Literature Review of Empirical Research Papers Published In Marketing Journals (2000-2021). **Academy of Marketing Studies Journal**, [s. l.], v. 27, n. S1, 2023. Disponível em: <https://www.abacademies.org/articles/artificial-intelligence-in-consumer-behaviour->

a-systematic-literature-review-of-empirical-research-papers-published-in-marketing-j-15322.html. Acesso em: 27 jan. 2025.

GERMAN ACADEMY OF SCIENCE AND ENGINEERING (ACATECH). **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**. Frankfurt: [s. n.], 2013. Disponível em: <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>. .

GIANNOULAKI, M.; CHRISTOFOROU, Z. Pedestrian Walking Speed Analysis: A Systematic Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 16, n. 11, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/11/4813>.

GO, T. F. *et al.* Genetically optimised disassembly sequence for automotive component reuse. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 39, n. 5, p. 5409–5417, 2012.

GUIN, W. E. *et al.* **Manufacturing Process Development for Adhesively Bonded Joints in Large-Scale Space Structures**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190032376/downloads/20190032376.pdf>. Acesso em: 19 set. 2025.

GUJAR, P.; PANYAM, S.; PALIWAL, G. AI Integrated Product Development: Building Sustainable Competitive Advantage. **IEEE Engineering Management Review**, [s. l.], 2024.

GUPTA, N. K. *et al.* Investigation of the mechanical properties of jute and glass fiber reinforced epoxy composite for sustainable and cost-effective applications. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, [s. l.], 2023.

GUY, B.; SHELL, S.; ESHERICK, H. Design for deconstruction and materials reuse. **Proceedings of the CIB Task Group**, [s. l.], v. 39, n. 4, p. 189–209, 2006.

HAIMER. **Microset**. Igenhausen (Germany): [s. n.], 2024. Disponível em: https://roizmaquinas.com.br/catalogos/haimer/haimer_microset.pdf#page=1. Acesso em: 19 set. 2025.

HENNECKE. **Topline MK2 Next Generation methering machine**. Saint Augustin: Hennecke Group, 2025. Disponível em: <https://www.hennecke.com/br/products/dosing/hp/topline-mk2>. Acesso em: 6 ago. 2025.

HENTGES, Tatiane Isabel *et al.* Circular economy in Brazilian construction industry: Current scenario, challenges and opportunities. **Waste Management & Research**, [s. l.], v. 40, n. 6, p. 642–653, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X211045014>.

HEXCEL. **HexPly® Prepreg Technology**. Stamford (USA): Hexcel, 2013. Disponível em: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Prepreg_Technology.pdf. Acesso em: 19 set. 2025.

HOSSAIN, E. MATLAB and Simulink Crash Course for Engineers. **MATLAB and**

Simulink Crash Course for Engineers, [s. l.], p. 1–657, 2022. Disponível em: Acesso em: 21 ago. 2025.

HOYLE, D. **ISO 9000 Quality Systems Handbook-updated for the ISO 9001: 2015 standard: Increasing the Quality of an Organization's Outputs**. 7th ed. London: Routledge, 2017. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315642192>.

HSIEH, Y.-J.; HUANG, W.-J.; LAN, L.-H. An Integrated Smart Manufacturing System for Customer Design Experience. **Systems**, [s. l.], v. 12, n. 10, 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85207670588&doi=10.3390%2fsystems12100426&partnerID=40&md5=ec53bd165347c003fa739383ecdb81ab>.

HUANG, G. Q. **Design for X: Concurrent engineering imperatives**. 1st ed. Dundee: Springer, 1996. Disponível em: <https://www.springer.com/br/book/9780412787508#otherversion=9789401057622>.

ISNAINI, W.; MASRUOH, N. A.; DHARMA, I. B. Dynamic planning approach of facility layout from industry perspectives: A systematic literature review. **Production Engineering Archives**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 27–40, 2025. Disponível em: <https://www.sciendo.com/article/10.30657/pea.2025.31.3>.

ISO. **ISO 17088: 2021 - Plastics — Organic recycling — Specifications for compostable plastics**. [S. l.]: ISO, 2021.

JEFROY, N.; AZARIAN, M.; YU, H. **The Application of Simulation in Facility Layout Design of an Industry 4.0 Factory**. [S. l.: s. n.], 2024. v. 1154 LNEE

KAGERMANN, H.; LUKAS, W.-D.; WAHLSTER, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. **VDI nachrichten**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 2–3, 2011.

KASHANI, M. *et al.* New product development based on non-functional requirements in renewable energy industries using hesitant fuzzy QFD-DFX approach. **Requirements Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 551 – 565, 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85203956161&doi=10.1007%2fs00766-024-00429-y&partnerID=40&md5=20b6a4a87f968e5e4b4e8d2c78f39af2>.

KIBET, T.; GITHINJI, D. N.; NZIU, P. Natural Fibre–Reinforced Starch Biocomposites and Their Effects on the Material Mechanical Properties: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2025, n. 1, 2025.

KIMURA, F. *et al.* Product modularization for parts reuse in inverse manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 89–92, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607620782?via%3Dihub>.

KOROTH, R. A. *et al.* Aligning production requirements with product and production maturities: enhancing production preparation during product development. *In:* , 2024.

Proceedings of the Design Society. [S. l.: s. n.], 2024. p. 195–204.

LAOVISUTTHICHA, V.; LU, W.; LOW, S. P. Design for excellence (DfX) for high-rise modular buildings: from DfX considerations to module design guidelines using the case of Hong Kong. **Architectural Engineering and Design Management**, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85201295375&doi=10.1080%2f17452007.2024.2390964&partnerID=40&md5=a1c58cd7eda81488e802fddd060bfd09>.

LEANEY, P. G. Case Experience with Hitachi, Lucas and Boothroyd-Dewhurst DFA Methods. *In*: DESIGN FOR X: CONCURRENT ENGINEERING IMPERATIVES. [S. l.]: Springer, 1996. p. 41–71.

LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. **nature**, [s. l.], v. 521, n. 7553, p. 436–444, 2015.

LEHNER, C. *et al.* Digital twin and digital thread within the product lifecycle management. **Procedia Computer Science**, [s. l.], v. 232, p. 2875–2886, 2024. Disponível em: Acesso em: 12 jan. 2025.

LEININGER, G. *et al.* **The total assessment profile, volume 2.** [S. l.: s. n.], 1975.

LENG, J. *et al.* AIGC-empowered smart manufacturing: Prospects and challenges. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, [s. l.], v. 97, p. 103076, 2026. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584525001309?pes=vor&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus. Acesso em: 10 jul. 2025.

LESTA. **Lesta LEBOT I A6 - Industrial robot.** Milan (Italy): [s. n.], 2025. Disponível em: <https://www.lesta.it>.

LEVITT, T. Blue-skies approach to tomorrow's marketing. **Business Horizons**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 120–128, 1958. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-49749197065&doi=10.1016%2f0007-6813%2858%2990046-6&partnerID=40&md5=916d9a193668a0cd1c56455a2106c9ec>.

LI, J.; ZHANG, H. C.; LIN, Z. Asymmetric negotiation based collaborative product design for component reuse in disparate products. **Computers and Industrial Engineering**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 80–90, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2008.11.021>.

LIMA, F. R.; GOMES, R. Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0: uma análise bibliométrica. **Revista Brasileira de Inovação**, [s. l.], v. 19, 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2178-28222020000100216&lang=pt.

LOPES, J. A. **Desenvolvimento integrado de misturador regulador de fluxo: do conceito à avaliação operacional.** 2019. Dissertação - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

LOPES, H. S.; LIMA, R. S.; LEAL, F. Simulation project for logistics of brazilian soybean exportation. **International Journal of Simulation Modelling**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 571–582, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85101018490&doi=10.2507%2fIJSIMM19-4-529&partnerID=40&md5=a22e96610384b3b3c7a64afc604ba932>.

MALIK, R. A. Reinforcement of jute fiber and aluminum trihydrate in a novel biopolymer synthesized through citric acid and glycerol (polyglycerol citrate). **Polymer Composites**, [s. l.], 2025.

MANIVANNAN, R. *et al.* Global exponential stability and dissipativity of generalized neural networks with time-varying delay signals. **Neural Networks**, [s. l.], v. 87, p. 149–159, 2017.

MATTOS, J. R. L. de; GUIMARÃES, L. dos S. **Gestão da tecnologia e inovação: uma abordagem prática**. [S. l.]: Saraiva, 2013.

MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering**. New York: CRC Press LLC, 2002.

MDC. **MDC Mould - Processing Professional mouldings**. Taizhou (China): MDC Mould, 2025. Disponível em: <https://www.zjmdd.com/>. Acesso em: 9 ago. 2025.

MOHANTY, A. K. *et al.* Effect of chemical modification on the performance of biodegradable jute yarn-Biopol composites. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 35, n. 10, p. 2589–2595, 2000.

MONTEVECHI, J. A. B. *et al.* Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: An application in a Brazilian tech company. *In*: , 2010. **Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference**. [S. l.: s. n.], 2010. p. 1624–1635.

MORASSI, S. A.; SILVA, J. L. R. da; ORTENZI, A. Comparative result between standard requirements and finite element analysis of wood-frame panels. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 15, p. 78–84, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271021730387X?via%3Dihub>.

MORE, Y. Y.; BUKTAR, R. B. Investigating smart manufacturing process implementation in the Indian manufacturing industries using tecnomatix and response surface methodology. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, [s. l.], 2024.

MOTIEL, M. *et al.* Advancing Circular Buildings: A Review of Building Strategies for AEC Stakeholders. **Buildings**, [s. l.], v. 14, n. 9, 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85204242687&doi=10.3390%2fbuildings14092594&partnerID=40&md5=07bb08a9d4b877b338bd2206c6a31003>.

MÜLLER, R.; KORNBLITH, S.; HINTON, G. E. When does label smoothing help?. **Advances in neural information processing systems**, [s. l.], v. 32, 2019.

OLIVEIRA, R. de P. *et al.* Energy efficiency and productivity improvements analysis in a Brazilian steel plant: simulation model using JaamSim open source software. **Discover Energy**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43937-024-00060-6>.

OSORIO-CASTAÑEDA, C. D.; OREJUELA-CABRERA, J. P.; BRAVO-BASTIDAS, J. J. Refrigerated electric vehicle routing considering time-dependent temperature energy consumption models. **Annals of Operations Research**, [s. l.], v. 349, n. 3, p. 1817–1854, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06579-8>.

PALANISAMY, S. *et al.* **The prospects of natural fiber composites: A brief review.** [S. l.: s. n.], 2024.

PANSONATO, R. **Projeto de fábrica e arranjo físico.** E-booked. [S. l.: s. n.], 2020.

PCAST. PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Recommendations for strengthening american leadership in industries of the future.** Washington: [s. n.], 2020. Disponível em: https://science.osti.gov/-/media/_pdf/about/pcast/202006/PCAST_June_2020_Report.pdf?la=en&hash=019A4F17C79FDEE5005C51D3D6CAC81FB31E3ABC.

PCAST. PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Report to the President on Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing.** Executive office of the President. Washington: [s. n.], 2011. Disponível em: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED529992.pdf>.

PINETTE PEI. **SMC, C-SMC GMT and BMC machines.** Chalon sur Saône (France): [s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.pinetteemidecau.com>.

POLLI, R.; COOK, V. Validity of the product life cycle. **The Journal of Business**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 385–400, 1969.

POLYNT. **Coatings Products.** Scanzorosciate (Italy): [s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.polynt.com/chemical-products/coatings/>. Acesso em: 13 set. 2025.

QUISPE-VASQUEZ, L. R. *et al.* Diseño de distribución de planta usando el programa ProModel para optimizar los espacios y minimizar los tiempos en una empre. *In:* , 2024. **Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology.** [S. l.: s. n.], 2024.

QURESHI, A. J.; GERICHKE, K.; BLESSING, L. Stages in product lifecycle: Trans-disciplinary design context. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 21, p. 224–229, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.131>.

RAHUL, M. R.; CHIDDARWAR, S. S. Integrating Virtual Twin and Deep Neural Networks for Efficient and Energy-Aware Robotic Deburring in Industry 4.0. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, [s. l.], v. 24, n. 9, p. 1517–1534, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12541-023-00875-8>.

RAINEY, D. L. **Product innovation: leading change through integrated product**

development. [S. l.]: Cambridge University Press, 2008.

RINK, D. R.; SWAN, J. E. Product life cycle research: A literature review. **Journal of Business Research**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 219–242, 1979. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0000839837&doi=10.1016%2f0148-2963%2879%2990030-4&partnerID=40&md5=33af629130c234fe55d6d2bd04c7530c>.

ROMEIRO, E. *et al.* **Projeto do produto.** [S. l.]: Elsevier Brasil, 2013.

SALEM, M. *et al.* Intelligent Collaborative Robots Augmented with Vision Perception for Flexible Manufacturing System. *In:* , 2025, Singapore. (M. Jolly et al., Org.) **Sustainable Design and Manufacturing 2024**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. p. 67–78.

SIEMENS. **Tecnomatix digital manufacturing software.** [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

SILVESTRI, L. *et al.* How Industry 4.0 technologies can contribute to plant layout design and management: a systematic literature review. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 3105–3119, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01920-0>.

SLOVENSKI INŠTITUT ZA STANDARDIZACIJO. EN 14995: 2007. Plastics - Evaluation of compostability - Test scheme and specifications. **Slovenski inštitut za standardizacijo:** 2007. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/21783/4c36b85fae8f49f9829586528112e73c/SIST-EN-14995-2007.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.

SOMARATHNA, Y. *et al.* Formulation of Epoxy Prepregs, Synthesis Parameters, and Resin Impregnation Approaches—A Comprehensive Review. **Polymers**, [s. l.], v. 16, n. 23, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/23/3326>.

SOUZA, M. C. F.; SACCO, M.; PORTO, A. J. V. Virtual manufacturing as a way for the factory of the future. **Journal of Intelligent Manufacturing**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 725–735, 2006.

SRIRANGA, B. K.; KIRTHAN, L. J.; ANANDA, G. The mechanical properties of hybrid laminates composites on epoxy resin with natural jute fiber and S-glass fibers. *In:* , 2021. **Materials Today: Proceedings.** [S. l.: s. n.], 2021.

STARK, J. Product Lifecycle Management (PLM). *In:* PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT - 21ST CENTURY PARADIGM FOR PRODUCT REALISATION. 5. ed. [S. l.]: Springer, 2022. v. 1, p. XXV–616.

STEARNS, P. N. **The Industrial Revolution in World History.** [S. l.]: Routledge, 2021. Disponível em: Acesso em: 27 out. 2021.

STROTHMANN. **UTrack - Automated Guided Vehicle (AGV).** Stukenbrock (Germany): [s. n.], 2025. Disponível em: <https://strothmann.com/en/systems/automated-guided->

vehicles-agv/agv-final-assembly-line/. Acesso em: 9 ago. 2025.

SUN, Q.; GUAN, Z.; ZHANG, D. Structure Design of a Cleaning Robot for Underwater Hull Surface. *In:* , 2021, Singapore. (Q. Liu et al., Org.) **The 10th International Conference on Computer Engineering and Networks**. Singapore: Springer Singapore, 2021. p. 1236–1242.

SUSTAINABLE JERSEY. **Materials Reuse Program**. New Jersey: [s. n.], 2024.

TEZARA, C. *et al.* Effect of Stacking Sequences, Fabric Orientations, and Chemical Treatment on the Mechanical Properties of Hybrid Woven Jute–Ramie Composites. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 273–285, 2022.

THAPLIYAL, D. *et al.* Natural Fibers Composites: Origin, Importance, Consumption Pattern, and Challenges †. **Journal of Composites Science**, [s. l.], v. 7, n. 12, 2023.

TORRES, G. B. *et al.* Eco-Friendly Natural Rubber–Jute Composites for the Footwear Industry. **Polymers**, [s. l.], v. 15, n. 20, p. 4183, 2023.

TROUSSIER, N. *et al.* Information structuring for use and reuse of mechanical analysis models in engineering design. **Journal of Intelligent Manufacturing**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 61–71, 1999. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008968514421>.

UFSCAR. **Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software - LaPES. Universidade Federal de São Carlos**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.lapes.ufscar.br/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

VEIT, D. **Fibers: History, Production, Properties, Market**. [S. l.: s. n.], 2023.

VILLAR, A. de M.; NÓBREGA JÚNIOR, C. L. Planejamento das instalações empresariais. **João Pessoa: Editora da UFPB**, [s. l.], 2014.

WANG, D. *et al.* Neural network robust tracking control with adaptive critic framework for uncertain nonlinear systems. **Neural Networks**, [s. l.], v. 97, p. 11–18, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85031008241&doi=10.1016%2fj.neunet.2017.09.005&partnerID=40&md5=afb63df7c556d0a0842339dc5f8c18f9>.

WULFSBERG, J. *et al.* Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 81, p. 1601–1607, 2014. Disponível em: Acesso em: 21 jul. 2025.

XUANYANG. **KR70 R2100 Robot**. Shanghai (China): [s. n.], 2025. Disponível em: https://www.xy-robotics.com/shop/kr70-r2100?_gl=1*x0776x*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjwz5nGBhBBEiwA-W6XRA6zQ-sAw-SGY0t1EGXs_BfdgW4dVm7NiTIHIHO3k15XtpazkQv7_RoC6FIQAvD_BwE&gbraid=0AAABAqxxkwM78yE2SUxSoaQNwoJ4jrUn. Acesso em: 13 set. 2025.

YATOO, A. M. *et al.* Global perspective of municipal solid waste and landfill leachate: generation, composition, eco-toxicity, and sustainable management strategies. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 31, n. 16, p. 23363–23392, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32669-4>.

YILDIZ, E.; MØLLER, C. Building a virtual factory: an integrated design approach to building smart factories. **Journal of Global Operations and Strategic Sourcing**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 608–635, 2021.

YILDIZ, E.; MØLLER, C.; BILBERG, A. Conceptual foundations and extension of digital twin-based virtual factory to virtual enterprise. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 121, n. 3–4, p. 2317–2333, 2022.

YILDIZ, E.; MØLLER, C.; BILBERG, A. Demonstration and evaluation of a digital twin-based virtual factory. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 114, n. 1–2, p. 185–203, 2021.

ZABIDIN, N. S.; BELAYUTHAM, S.; IBRAHIM, C. K. I. C. A bibliometric and scientometric mapping of Industry 4.0 in construction. **Journal of Information Technology in Construction**, [s. l.], v. 25, p. 287–307, 2020. Disponível em: https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_bd8c00117393c084f5M736610178163190&database=cpx.

ZHENG, W. *et al.* Research on Heat Curing Process and Mold Design Method of Composite Panels. *In:* , 2025, Singapore. **Proceedings of the 7th China Aeronautical Science and Technology Conference**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. p. 9–22.

APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Título: Fábrica virtual (VF) para a produção de painéis modulares de vedação vertical (PMVV) para edificação industrializada (EI).

Pesquisadores: Shandy Alexandra Morassi Francisco. Doutoranda. PPGEC/UEL; Altibano Ortenzi. Orientador. PPGEC/UEL

Descrição: Revisão sistemática da literatura para identificação e comprovação da lacuna do conhecimento na área de VF para a produção de PMVV para EI.

Data: 23/05/2024 (Atualização)

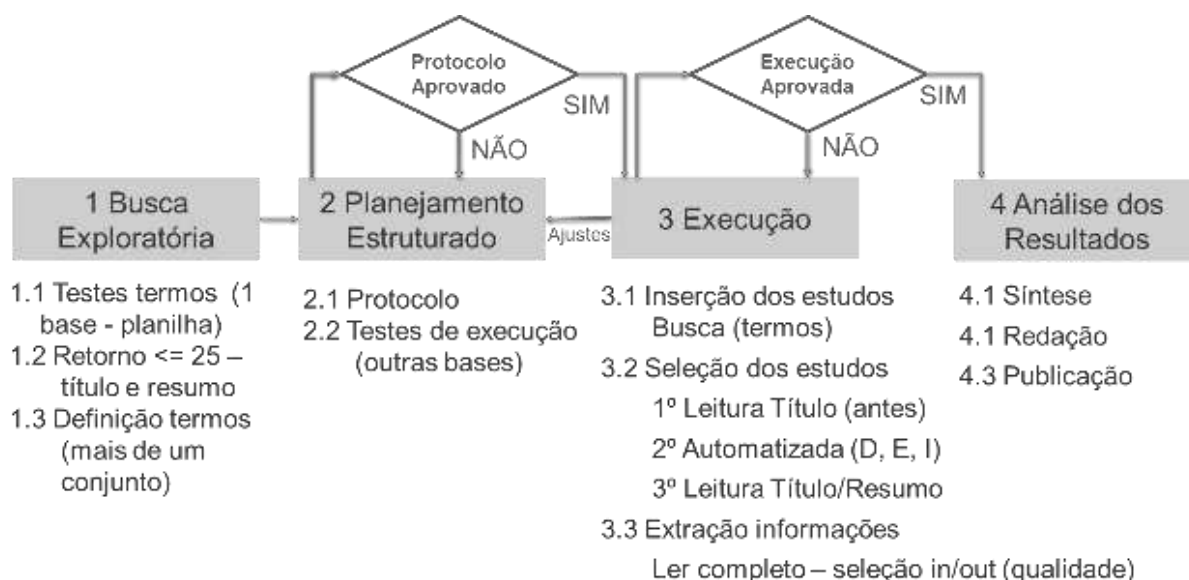
1 PLANEJAMENTO

Na etapa inicial da revisão sistemática, foi realizada uma busca exploratória a fim de identificar os termos de busca, assim como testar as estratégias e operadores booleanos adequados conforme a base, identificando se os retornos vinham conforme requeridos, como termos unidos, por exemplo, Virtual Factory, e não os termos separados no texto. A base escolhida foi a *Compendex (Engineering Village)*, pelo fato de terem sido identificados bons retornos para a área de interesse em pesquisas anteriores.

A busca exploratória foi então utilizada para construção e validação do planejamento do protocolo de revisão sistemática apresentado na sequência.

O método empregado foi adaptado do proposto pelo Laboratório de Pesquisas em Engenharia de Software (LaPES), do Departamento de Computação (DC) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), com posterior aplicação da ferramenta StArt⁴ (*State of the Art through Systematic Review*) para a ampliação e revisão da literatura para o desenvolvimento da tese, conforme esquematizado na Figura A1. Assim, os itens apresentados a seguir seguem a sequência de preenchimento do *software* citado. A Figura A2 apresenta os retornos da busca exploratória.

Figura A1 – Método de Revisão Sistemática da Literatura empregado



Fonte: Autora

⁴ Disponível para download em: <<https://www.lapes.ufscar.br/resources/tools-1/start-1>>. Acesso em: 03.jul.2024.

Figura A2 –Termos da busca exploratória, número de retornos e outras informações

ID	TERMOS DE BUSCA Obs: Definição das strings	DATA BUSCA	PLATAFORMA DE BUSCA	RESULTADO TÓPICO	OBSERVAÇÃO DA BUSCA Tipos de documentos: conference article, journal article, article in press. Língua: sem restrição. Ano: desde 2019
1	"virtual factory"	22/10/2024	Compendex	92	
2	"virtual manufacturing"	23/10/2024	Compendex	135	
3	"virtual factory" OR "virtual manufacturing"	23/10/2024	Compendex	221	
4	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant)	23/10/2024	Compendex	30	
5	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (layout)	23/10/2024	Compendex	19	
6	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout)	23/10/2024	Compendex	41	
7	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (building)	23/10/2024	Compendex	25	
8	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)	23/10/2024	Compendex	3	Lacuna
9	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("industrialized building")	23/10/2024	Compendex	0	
10	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND ("industrialized building")	23/10/2024	Compendex	0	
	"industrialized building"	28/10/2024	Compendex	58	
11	"industrialized modular building"	23/10/2024	Compendex	1	
12	industrialized AND "modular building"	23/10/2024	Compendex	54	
13	industrialized modular building	23/10/2024	Compendex	906	
14	"industrialized paneling building"	23/10/2024	Compendex	0	
15	industrialized "paneling building"	23/10/2024	Compendex	0	
16	industrialized "panel" building	28/10/2024	Compendex	18	
17	"industrialized panel" building	23/10/2024	Compendex	0	
18	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("modular building" OR "panel" building)	28/10/2024	Compendex	0	
1					
19	precast concrete	24/10/2024	Compendex	4.982	testes dos termos antes de juntar com VF e VM
20	"precast concrete"	25/10/2024	Compendex	3.636	
21	precast concrete industry	25/10/2024	Compendex	628	
22	"precast concrete industry"	25/10/2024	Compendex	42	
23	"precast concrete industry" AND plant	25/10/2024	Compendex	5	
24	"precast concrete" AND industry AND plant	29/10/2024	Compendex	31	
25	"precast concrete" AND industry AND layout	29/10/2024	Compendex	5	
26	"precast concrete" AND industry AND (plant OR layout)	29/10/2024	Compendex	37	
27	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("precast concrete")	25/10/2024	Compendex	0	justifica ineditismo na construção civil
2					
28	woodframe OR wood-frame	25/10/2024	Compendex	1097	testes dos termos antes de juntar com VF e VM
29	(woodframe OR wood-frame) AND industry	29/10/2024	Compendex	131	
30	(woodframe OR wood-frame) AND "industry plant"	29/10/2024	Compendex	0	
31	(woodframe OR wood-frame) AND industry AND plant	29/10/2024	Compendex	7	
32	(woodframe OR wood-frame) AND industry AND layout	29/10/2024	Compendex	2	
33	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)	29/10/2024	Compendex	0	justifica ineditismo na construção civil
3					
34	steel-frame OR steelframe	25/10/2024	Compendex	8.986	testes dos termos antes de juntar com VF e VM
35	(steel-frame OR steelframe) AND industry	25/10/2024	Compendex	600	
36	(steel-frame OR steelframe) AND industry AND plant	29/10/2024	Compendex	36	
37	(steel-frame OR steelframe) AND industry AND layout	29/10/2024	Compendex	10	
38	(steel-frame OR steelframe) AND industry AND (plant OR layout)	29/10/2024	Compendex	46	
39	(steel-frame OR steelframe) AND panel" AND industry	29/10/2024	Compendex	61	
40	(steel-frame OR steelframe) AND panel" AND industry AND plant	29/10/2024	Compendex	2	
41	(steel-frame OR steelframe) AND panel" AND industry AND layout	29/10/2024	Compendex	1	
42	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)	25/10/2024	Compendex	0	justifica ineditismo na construção civil

Fonte: Autora

1.1 Protocolo

Este Protocolo de Revisão Sistemática da Literatura apresenta a estrutura metodológica de sua execução acerca de VF para a produção de PMVV para EI.

Objetivos da revisão:

Identificação e validação da lacuna do conhecimento;

Questão de Pesquisa:

A avaliação/investigação do processo de fabricação de PMVV para EIM através da virtualização fabril pode gerar benefícios?

Se sim, quais seriam tais benefícios, em comparação com os métodos tradicionais de planejamento de *layout* do processo fabril, em relação ao sistema produtivo desenvolvido?

Palavras-chave (strings⁵):

Após testes com vários termos para identificar a busca na indústria da construção (IC), foram definidas as seguintes *strings*.

Para a identificação e comprovação da lacuna do conhecimento na área da construção civil:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)

Para a comprovação do ineditismo na área de construção industrializada:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (precast concrete)

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)

Definição de critérios de seleção de fontes:

Retornos na área da IC validados a partir dos termos parciais.

Exportação para arquivo bibitex (.bib) ou .ris.

Língua dos estudos: sem restrição

Método de pesquisa de fontes:

A *string* base será definida na *Compendex*, redefinida e quando for julgado que a *string* é adequada, será traduzida para as outras máquinas de busca.

Bases:

Compendex (Engineering Village)

Scopus

Web of Science

Publishers (Editoras):

Sage

Taylor & Francis

Wiley

Springer

⁵ Sequência de caracteres que se insere em um mecanismo de busca para encontrar informações relevantes. Ela pode ser composta por palavras-chave, expressões regulares, operadores lógicos e outros símbolos que especificam os critérios de busca (DICAPP, 2024).

Teses e dissertações:

Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD)

Catálogo de Teses e Dissertações do Conselho de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Seleção de critérios de inclusão e exclusão:

(I) Termos em: *Subjec/Title/Abstract* (Assunto/Título/Resumo) ou adaptado conforme ferramenta de busca.

(I) Tipo de documento: *Conference Article* (Artigo de Conferência), *Jornal Article* (Artigo de revista) e *Article in Press* (Artigo no Prelo) ou adaptado conforme ferramenta de busca.

(I) Assunto, Vocabulário controlado e/ou Código de classificação aderentes à pesquisa ou adaptado conforme ferramenta de busca.

(I) Conteúdo aderente ao tema de pesquisa.

(I) Texto acessível.

(I) Publicação nos últimos 5 anos (a partir de 2019).

(E) O que não atende à inclusão.

As publicações devem estar disponíveis na web, preferencialmente em bases de dados científicas da área (busca pelo Portal Periódicos da Capes) ou sites relacionados, como de editoras.

As buscas serão feitas por palavras-chave (termos), que formam as *strings* e são buscadas em *Subjec/Title/Abstract* (Assunto/Título/Resumo) ou adaptado conforme mecanismo de busca, em artigos de revistas científicas e anais de congresso. Os sites de editoras (*publishers*) não apresentam o agrupamento para busca em Assunto, Título e Resumo, portanto, a busca será realizada individualmente por cada parte: Título, Palavras-Chave e Resumo e posteriormente agrupada e compilada. Serão aplicados ainda os filtros automáticos disponíveis na ferramenta de busca apresentados nos critérios de Inclusão (I) e Exclusão (E) definidos pela pesquisadora conforme relevância identificada.

Na etapa exploratória, para retornos menores que 25 títulos, será realizada leitura de Títulos e Resumos (quando necessário) ainda na ferramenta de busca, para verificação prévia de aderência ao tema pesquisado. Nas demais bases, será verificada a necessidade de inserção na ferramenta de gestão bibliográfica, conforme o número de retornos, para facilitar a identificação de duplicados e gestão geral dos dados coletados. Os títulos retornados na busca, após aplicados os filtros descritos, serão baixados em arquivo e inseridos na ferramenta StArt para continuação da gestão bibliográfica, onde é verificado automaticamente e conferido manualmente títulos duplicados, além da conferência dos demais critérios de I e E, primeiro por leitura de título e resumo de todos os escritos encontrados. As ferramentas de algumas editoras não apresentam a opção de baixar o arquivo com a referência, somente o artigo, então os retornos serão buscados individualmente para inserção na ferramenta de gestão, caso necessário.

Definição dos tipos de estudos:

Todos os tipos de estudos serão considerados.

Seleção Inicial de estudos:

(A busca em si é executada e todos os estudos obtidos devem ser listados para posterior avaliação)

Com base Assunto, Título e Resumo, ou adaptado à ferramenta de busca, considerando

critérios de inclusão e exclusão. Para a etapa exploratória, será feita a leitura de Títulos e Resumos (quando necessário) quando número de títulos retornados menor que 25. Para as demais bases, caso se julgue necessário, será feita filtragem pelo gestor bibliográfico para facilitar a busca por duplicados.

Avaliação da qualidade dos estudos:

(Os procedimentos de seleção dos estudos são aplicados a todos os artigos obtidos a fim de verificar se os estudos pertencem aos tipos selecionados durante a fase de planejamento. O objetivo desta seção é registrar o resultado desta avaliação)
No decorrer da leitura.

Campos do formulário de qualidade:

Em relação à aderência ao tema, em cada etapa de leitura será realizada sua classificação em:

Forte (verde): grande aderência ao tema e possível referência para a pesquisa;

Médio (amarelo): relacionado à construção civil apesar de não diretamente ao tema proposto. Poderá ser usado na revisão da literatura, desde que atenda aos critérios de (I) e (E);

Fraco (laranja): relacionado ao estudo de *layout* na fábrica virtual, apesar de não relacionado à construção civil. Poderá ser usado na revisão da literatura, desde que atenda aos critérios de (I) e (E);

Fora (vermelho): não relacionado ou não acessível.

Os documentos selecionados serão lidos na íntegra e feita a extração de dados conforme campos definidos neste protocolo, para posterior sumarização e redação do manuscrito, caso haja retornos aderentes à pesquisa.

Campos de formulário de extração de dados:

(Extração de informações: Uma vez selecionados os estudos primários, começa a extração de informações relevantes. Neste protocolo, os critérios de extração e os resultados são descritos)

Nem todos os campos são obrigatórios. Preenchimento somente dos artigos a serem lidos após a análise inicial (Assunto/Título/Resumo) e dos itens de interesse para a pesquisa.

Dados para referência do artigo: extraído em arquivo da base ou individual quando não disponível na ferramenta de busca.

Objetivo

Método e técnicas de pesquisa / Abordagem da pesquisa

Principais definições

Resultados principais

Pontos positivos e negativos

Lacunas

Trabalhos relevantes para novas buscas (referências citadas)

Trechos a serem citados

2 EXECUÇÃO

Na etapa de elaboração do protocolo, vários termos foram testados na base inicial, a *Compendex*, em busca do que traria mais aderência à pesquisa. Com o protocolo validado, partiu-se para a execução, ampliando-se a pesquisa para as outras bases de dados selecionadas.

Assim como na fase exploratória, para a execução da busca em cada base foram realizados testes iniciais para validar a estrutura da *string* em cada ferramenta, com menor número de termos, como forma de adequar, ajustar e validar os conectores empregados.

A Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e o Catálogo de Teses e Dissertações do Conselho de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES) foram considerados como forma de conhecer o que está sendo pesquisado sobre o assunto no país, porém, sem obter-se retorno para os termos pesquisados para a definição da lacuna.

Os principais conjuntos de termos retornados são apresentados No Figura A3 a seguir:

Figura A3 – Termos de busca ampliada, número de retornos e outras informações (continua)

ID	TERMOS DE BUSCA Obs: strings definidas na fase exploratória	DATA BUSCA	PLATAFORMA DE BUSCA	RESULTADO TÓPICO	LEITURA TÍT/RES	OBSERVAÇÃO DA BUSCA Tipos de documentos: conference article, journal article, article in press. Língua: sem restrição. Ano: desde 2019
1	"virtual factory"	23/10/2024	Compendex	92		
	"virtual factory"	28/10/2024	Scopus	123		
	"virtual factory"	30/10/2024	Web of Science	61		
	"virtual factory"	31/10/2024	Sage Journals Online	2		1 em Keywords e 1 em Abstract
	"virtual factory"	02/11/2024	Taylor & Francis Online	1		Title
	"virtual factory"	04/11/2024	SpringerLink	193		Conference paper, Article. Sem opção de parte do artigo
	"virtual factory"	04/11/2024	Wiley Online Library	2		Abstract. Jornals
2	"virtual manufacturing"	23/10/2024	Compendex	135		
	"virtual manufacturing"	28/10/2024	Scopus	191		
	"virtual manufacturing"	30/10/2024	Web of Science	116		
	"virtual manufacturing"	31/10/2024	Sage Journals Online	3		1 em Title e 2 em Keywords (2 em Abstract duplicados)
	"virtual manufacturing"	02/11/2024	Taylor & Francis Online	6		5 em Keywords e 1 em Abstract
	"virtual manufacturing"	04/11/2024	SpringerLink	262		Conference paper, Article
	"virtual manufacturing"	04/11/2024	Wiley Online Library	3		Journals
3	"virtual factory" OR "virtual manufacturing"	23/10/2024	Compendex	221		
	"virtual factory" OR "virtual manufacturing"	28/10/2024	Scopus	306		
	"virtual factory" OR "virtual manufacturing"	30/10/2024	Web of Science	169		
	"virtual factory" OR "virtual manufacturing"	31/10/2024	Sage Journals Online	5		
	"virtual factory" OR "virtual manufacturing"	02/11/2024	Taylor & Francis Online	6		5 em Keywords e 1 em Abstract
	"virtual factory" OR "virtual manufacturing"	04/11/2024	SpringerLink	424		Conference paper, Article
	"virtual factory" OR "virtual manufacturing"	04/11/2024	Wiley Online Library	5		Journals
4	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant)	23/10/2024	Compendex	30		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant)	28/10/2024	Scopus	36		
	"virtual factory" OR "virtual manufacturing" AND plant	30/10/2024	Web of Science	23		
5	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (layout)	23/10/2024	Compendex	19		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (layout)	28/10/2024	Scopus	22		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (layout)	30/10/2024	Web of Science	13		
6	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout)	23/10/2024	Compendex	41		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout)	28/10/2024	Scopus	47		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout)	30/10/2024	Web of Science	32		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout)	31/10/2024	Sage Journals Online	1		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout)	04/11/2024	SpringerLink	201		Conference paper, Article
7	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (building)	23/10/2024	Compendex	25		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (building)	28/10/2024	Scopus	21		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (building)	30/10/2024	Web of Science	24		
8	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)	23/10/2024	Compendex	3	0	lacuna
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)	05/11/2024	Scopus	1	0	
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)	06/11/2024	Web of Science	2	0	Research areas: Engineering
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)	31/10/2024	Sage Journals Online	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)	04/11/2024	SpringerLink	6	0	Sem opção de busca em parte do artigo. Article, Research article e Conference paper. Disciplines: Engineering. Subdisciplines: Civil Engineering.
9	"industrialized building"	28/10/2024	Compendex	58,00		
	"industrialized building"	28/10/2024	Scopus	205,00		
	"industrialized building"	31/10/2024	Sage Journals Online	0,00		
10	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("industrialized building")	23/10/2024	Compendex	0,00		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("industrialized building")	28/10/2024	Scopus	0,00		

Fonte: Autora

Figura A3 – Termos de busca ampliada, número de retornos e outras informações (continuação)

ID	TERMOS DE BUSCA Obs: strings definidas na fase exploratória	DATA BUSCA	PLATAFORMA DE BUSCA	RESULTADO TÓPICO	LEITURA TÍT/RES	OBSERVAÇÃO DA BUSCA Tipos de documentos: conference article, journal article, article in press. Língua: sem restrição. Ano: desde 2019
11	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND ("industrialized" OR "industrial building")	23/10/2024	Compendex	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND ("industrialized" OR "industrial building")	28/10/2024	Scopus	0		
12	"industrialized modular building"	23/10/2024	Compendex	1,00		
	"industrialized modular building"	28/10/2024	Scopus	0,00		
13	industrialized AND "modular building"	23/10/2024	Compendex	54,00		
	industrialized AND "modular building"	28/10/2024	Scopus	14,00		
14	industrialized modular building	28/10/2024	Compendex	906,00		
	industrialized modular building	28/10/2024	Scopus	69,00		
15	"industrialized paneling building"	23/10/2024	Compendex	0,00		
	"industrialized paneling building"	28/10/2024	Scopus	0,00		
16	industrialized "paneling building"	23/10/2024	Compendex	0,00		
	industrialized "paneling building"	28/10/2024	Scopus	0,00		
17	industrialized "panel" building	28/10/2024	Compendex	18		
	industrialized "panel" building	28/10/2024	Scopus	0		
18	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("modular building" OR "panel" building)	29/10/2024	Compendex	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("modular building" OR "panel" building)	29/10/2024	Scopus	0		
1						
26	"precast concrete" AND industry AND (plant OR layout)	29/10/2024	Compendex	37		
	"precast concrete" AND industry AND (plant OR layout)	29/10/2024	Scopus	36		
27	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("precast concrete")	25/10/2024	Compendex	0		justifica ineditismo na construção civil
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("precast concrete")	29/10/2024	Scopus	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("precast concrete")	30/10/2024	Web of Science	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("precast concrete")	31/10/2024	Sage Journals Online	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("precast concrete")	04/11/2024	SpringerLink	0		
2						
31	(woodframe OR wood-frame) AND industry AND layout	29/10/2024	Compendex	2		
	(woodframe OR wood-frame) AND industry AND layout	29/10/2024	Scopus	0		
32	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)	29/10/2024	Compendex	0		justifica ineditismo na construção civil
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)	29/10/2024	Scopus	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)	30/10/2024	Web of Science	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)	31/10/2024	Sage Journals Online	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)	04/11/2024	SpringerLink	0	0	
3						
39	(steel-frame OR steelframe) AND panel AND industry AND plant	29/10/2024	Compendex	2		
	(steel-frame OR steelframe) AND panel AND industry AND plant	29/10/2024	Scopus	0		
40	(steel-frame OR steelframe) AND panel AND industry AND layout	29/10/2024	Compendex	1		
	(steel-frame OR steelframe) AND panel AND industry AND layout	29/10/2024	Scopus	0		
41	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)	25/10/2024	Compendex	0		justifica ineditismo na construção civil
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)	29/10/2024	Scopus	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)	30/10/2024	Web of Science	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)	31/10/2024	Sage Journals Online	0		
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)	04/11/2024	SpringerLink	5	0	Disciplines: Engineering.
	("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)	04/11/2024	Wiley Online Library	0		
Obs: para cada base foram pesquisados também os termos parciais como forma de testar a adequação da estrutura da string à plataforma pesquisada						

Fonte: Autora

2.1 Identificação dos estudos

Obs: para termos unidos, foram usadas aspas “”, como “*Virtual Factory*”.

String 1: identificação da lacuna de pesquisa na área da construção civil
 (“*virtual factory*” OR “*virtual manufacturing*”) AND (*plant* OR *layout*) AND (*building*)

String 2: confirmação do ineditismo na área de construção industrializada em concreto armado
 (“*virtual factory*” OR “*virtual manufacturing*”) AND (*precast concrete*)

String 3: confirmação do ineditismo na área de construção industrializada em *woodframe*
 (“*virtual factory*” OR “*virtual manufacturing*”) AND (*woodframe* OR *wood-frame*)

String 4: confirmação do ineditismo na área de construção industrializada em *steelframe*
 (“*virtual factory*” OR “*virtual manufacturing*”) AND (*steel-frame* OR *steelframe*)

Bases

23/10/2024. Atualização

Compendex (*Engineering Village*)

Busca em: *Subject/Title/Abstract* (Assunto/Título/Resumo).

Tipos de documentos: *Conference article* (Artigo de Conferência), *Journal article* (Artigo de revista) e *Article in Press* (Artigo no prelo).

Ano: a partir de 2019.

String 1:
 (“*virtual factory*” OR “*virtual manufacturing*”) AND (*plant* OR *layout*) AND (*building*)

Retorno:

3 records found in Compendex for 1884-2025: (((“*virtual factory*” OR “*virtual manufacturing*”) AND (*plant* OR *layout*) AND (*building*)) WN KY) + (({*ca*} OR {*ja*}) WN DT) AND ((2021 OR 2018) WN YR) + (2021) WN YR

Análise prévia:

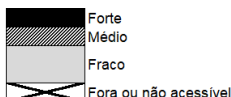
Como apresentado na Figura A4, dos três retornos desta base, dois estão relacionados ao tema proposto, porém, não à construção civil e um, apesar de tratar do assunto de fábrica virtual, não discute *layout* da fábrica e processo produtivo. Sendo assim, **não houve retorno** aderido ao tema proposto.

Figura A4 – Análise dos retornos em que foram lidos os resumos

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA - Leitura título e resumo (se necessário)						
Identificar na busca: Fábrica virtual na produção de edificações pré-fabricadas modulares (lacuna).						
ID	PLATAFORMA DE BUSCA	TÍTULO	ANO	ASSUNTO	ADERÊNCIA	GRAD
String: ("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)						
1	Compendex	Demonstration and evaluation of a digital twin-based virtual factory	2021	Aplicação de VF em gêmeos digitais na produção de turbinas eólicas.	Revisão bibliográfica, não relacionado a ICC (indústria da construção civil)	
2	Compendex	Framework and deployment of a cloud-based advanced planning and scheduling system	2021	Planejamento baseado em nuvem em indústria automotiva	Fora	
3	Compendex	Simulation driven approach to study the feasibility of involving Collaborative Robot for windshield loading process in a car manufacturing plant	2021	Simulação para uso de robô em indústria automotiva	Revisão bibliográfica, não relacionado a ICC	
4	Scopus	Building a virtual factory: an integrated design approach to building smart factories	2021	Projeto e desenvolvimento de planta fabril para produção de turbina eólica	Revisão bibliográfica, não relacionado a ICC	
5	Web of Science	Design and Simulation Study on Logistics Planning in Automatic Plant Factory Based on Tecnomatix Plant Simulation	2019	Estudo de logística em parque industrial agrícola com Tecnomatix	Revisão bibliográfica, não relacionado a ICC	
6	Web of Science	Knowledge-driven based performance analysis of robotic manufacturing cell for design improvement	2020	Estrutura de simulação de célula de produção integrada a robô	Revisão bibliográfica, não relacionado a ICC. Não acessível	
7	SpringerLink	Conceptualizing data-driven closed loop production systems for lean manufacturing of complex biomedical devices—a cyber-physical system approach	2023	Diferentes cenários de produção em complexo biomédico	Revisão bibliográfica, não relacionado a ICC	
8	SpringerLink	Development and challenges of planning and scheduling for petroleum and petrochemical production	2020	Planejamento e cronograma de produção de petróleo e petroquímicos	Fora	
9	SpringerLink	Digital twin-driven smart supply chain	2022	Gêmeos digitais para logística	Fora	
10	SpringerLink	Exploring self-organization and self-adaption for smart manufacturing complex networks	2022	Investiga os mecanismos auto-organização e adaptação para lidar com perturbações em processos de manufatura.	Relacionado à pesquisa, mas não à ICC.	
11	SpringerLink	Special issue: Innovative applications of big data and artificial intelligence	2022	Editorial	Fora	
12	SpringerLink	A taxonomy of built asset information coupling	2024	Classificação de componentes para integração de informações do ciclo de vida	Fora	
String: ("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)						
1	SpringerLink	An Adaptive Scheduling Method Based on Cloud Technology: A Structural Steelwork Industry Case Study	2020	Cronograma em indústria de aço estrutural	Apesar de não ser pré-fabricado, é aço para construção. Apesar de não estar diretamente relacionado com a pesquisa, pode ser usado na revisão da literatura. Não acessível	
2	SpringerLink	Construction of Virtual Simulation System for General Assembly Process Based on Digital Factory	2020	Simulação do processo de montagem de motocicleta baseada em fábrica digital	Apesar de não ser pré-fabricado, está relacionado com a pesquisa, pode ser usado na revisão da literatura. Não acessível	
3	SpringerLink	Implementation of EPM Methodology in Production Plants	2019	Agricultura	Fora	
4	SpringerLink	Investigating smart manufacturing process implementation in the Indian manufacturing industries using tecnomatix and response surface methodology	2024	Processo de implementação de smart manufacturing medindo os índices que vamos analisar	O mais alinhado com a pesquisa, apesar de não ser na construção civil	
5	SpringerLink	Research and Development of Virtual Manufacturing	2019	Artigo de revisão sobre VM	Interessante para revisão da literatura. Não acessível	

Legenda

Grande aderência ao tema e possível referência para a pesquisa
 Relacionado à construção civil apesar de não diretamente ao tema proposto
 Relacionado ao estudo de layout na fábrica virtual, apesar de não relacionado à indústria de construção civil (ICC). Poderá ser usado na revisão da literatura.
 Não relacionado



Fonte: Autora

String 2:
 ("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (precast concrete)

Retorno:
No results were found in Compendex for 1884-2024: (((("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (precast concrete)) WN KY)

String 3:
 ("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)

Retorno:
No results were found in Compendex for 1884-2024: (((("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)) WN KY)

String 4:
 ("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)

Retorno:

No results were found in Compendex for 1884-2024: (((*"virtual factory"* OR *"virtual manufacturing"*) AND (*steel-frame* OR *steelframe*)) WN KY)

Análise prévia: Apesar dos termos parciais apresentarem retornos, o que valida os conectores empregados, as *strings* completas não apresentaram nenhum retorno.

05/11/2024 Atualização

Scopus

Busca em: *Article title*, *Abstract*, *Keywords* (Título do artigo, Resumo, Palavras-chave).

Tipos de documentos: *Conference paper* (Publicação em Conferência) e *Article* (Artigo).

Ano: a partir de 2019.

String 1:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)

Retorno:

3 documents found

Duplicados: 2.

Resultado dos retornos: **1**.

Análise prévia:

Conforme indicado na Figura 2, dos três retornos desta base, dois já haviam sido encontrados na base anterior e o outro discorre sobre planta fabril, mas **não na construção civil**.

String 2:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND ("precast concrete")

Retorno:

No documents matching your keywords were found

String 3:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)

Retorno:

No documents matching your keywords were found

String 4:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)

Retorno:

No documents matching your keywords were found

Análise prévia: Apesar dos termos parciais apresentarem retornos, o que valida os conectores empregados, as *strings* completas não apresentaram nenhum retorno.

06/11/2024 Atualização

Web of Science

Busca em: *Topic (Title, Abstract, Keyword plus and Author keywords)* – Tópico (Título, Resumo, Palavras-chave extras e do autor).

Tipos de documentos: *Article* (Artigo) e *Proceeding Paper* (Documento de Anais).

Research areas: Engineering

Ano: a partir de 2019.

String 1:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND (building)

Retorno:

4 results from Web of Science Core Collection for: "virtual factory" OR "virtual manufacturing" (Topic) and plant OR layout (Topic) and building (Topic)

Duplicados: 2.

Resultado dos retornos: **2**.

Análise prévia:

Como apresentado na Figura 2, dos quatro retornos desta base, dois já haviam sido encontrados em base anterior e os outros discorrem sobre simulação em fábrica virtual, mas **não na construção civil**.

String 2:

"virtual factory" OR "virtual manufacturing"

AND "precast concrete"

Retorno:

0 results from Web of Science Core Collection for: "virtual manufacturing" OR "virtual factory" (Topic) and "precast concrete" (Topic)

String 3:

"virtual factory" OR "virtual manufacturing"

AND woodframe OR wood-frame

Retorno:

0 results from Web of Science Core Collection for: "virtual manufacturing" OR "virtual factory" (Topic) and woodframe OR wood-frame (Topic)

String 4:

"virtual factory" OR "virtual manufacturing"

AND steel-frame OR steelframe

Retorno:

0 results from Web of Science Core Collection for: "virtual manufacturing" OR "virtual factory" (Topic) and steel-frame OR steelframe (Topic)

Análise prévia: Apesar dos termos parciais apresentarem retornos, o que valida os conectores empregados, as *strings* completas não apresentaram nenhum retorno.

Publishers (Editoras)

As editoras não apresentam a opção de busca em Título, Palavra-chave e Resumo de forma agrupada, somente individualmente. Portanto, a busca foi realizada em uma parte por vez, procedendo-se posteriormente ao agrupamento e compilação dos retornos, como identificação de duplicados. A *Springer* não apresenta nenhuma opção de busca em parte do artigo, o que faz com que aumente o retorno de resultados não aderentes aos termos de busca e dificulte a filtragem.

As editoras *Taylor & Francis* e *Wiley*, apesar de apresentarem retornos em termos parciais mais curtos, ao dar-se sequência no concatenamento dos termos, já não apresentam resultados. A editora *Sage*, apesar de apresentar retornos para os termos parciais, não retornou nenhum documento para a *strings* finais. Sendo assim, não foram descritos a seguir, apesar de terem sido feitas as buscas.

04/11/2024 Atualização

Springer Nature Link

A ferramenta de busca da editora não apresenta opção de busca em parte do documento, o que aumentou o número de retornos não aderentes aos termos solicitados, dificultando a filtragem.

Content type: Article (Artigo), *Research article* (Artigo de pesquisa), *Conference paper* (Publicação em Conferência).

Disciplines: Engineering.

Ano: a partir de 2019.

String 1:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND building

Retorno:

Showing 1-20 of 71 results ("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND building

Refinamento:

(I) Subdisciplines: Civil Engineering.

Retorno:

Showing 1-6 of 6 results: ("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (plant OR layout) AND building

Análise prévia:

O fato de a ferramenta de busca não apresentar a opção de busca em parte do artigo dificultou a filtragem e consequentemente aumentou o volume para análise. Mesmo com os filtros afunilando para engenharia civil, nenhum dos retornos traziam contribuição relacionada à indústria da construção. Conforme descrito na Figura 2, quatro não apresentam relação com a pesquisa e apenas dois é aderente ao assunto da busca, mas **não na construção civil**.

String 2:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (precast concrete)

Retorno:

*Sorry, **no results** were found.*

String 3:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (woodframe OR wood-frame)

Retorno:

Sorry, **no results** were found.

String 4:

("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)

Retorno:

Showing 1-10 of **10** results: ("virtual factory" OR "virtual manufacturing") AND (steel-frame OR steelframe)

Excluídos por título: 5.

Leitura do resumo: **5**.

Análise prévia:

O fato de a ferramenta de busca não apresentar a opção de busca em parte do artigo dificultou a filtragem e consequentemente aumentou o volume para análise. Mesmo com os filtros, nenhum dos retornos são a respeito de *steelframe*, apenas um sobre a produção na indústria de aço estrutural, mas não relacionado à construção civil e não acessível. Como descrito na Figura 2, dos cinco retornos em que foram lidos os resumos, um está fora do tema e os outros quatro estão relacionados à pesquisa, mas **não na construção civil**. Porém, três desses não são acessíveis à pesquisadora.

Análise final:

A partir das análises prévias dos retornos obtidos pela presente revisão sistemática da literatura, considerando as condições de contorno descritas, nenhum dos documentos encontrados apresentam o assunto proposto pela pesquisadora, o emprego de ferramentas de simulação de VF da produção de PMVV para EI. Sendo assim, é comprovado o ineditismo do estudo e justificado o trabalho, visto que as ferramentas propostas não são aplicadas atualmente na indústria da construção civil e que pesquisas nessa área para futura implantação poderá favorecer a produtividade e incremento da qualidade do processo e do produto final, o que se pretende comprovar ao final do estudo.

Como não foram obtidos retornos aderentes ao estudo, para a revisão sistemática da literatura, não foi necessário o uso da ferramenta StArt e não foi feita a extração de informações, etapas indicadas no método na Figura A1. A redação foi feita acerca do ineditismo da pesquisa e contextualizada para justificar a pesquisa proposta.

APÊNDICE B – DISCRIMINAÇÃO DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO POR TIPO DE PAINEL

E1 LIMPEZA E PREPARAÇÃO DOS MOLDES

E1.1 Limpeza e preparação de moldes dos tipos MPC ou MPR

E1.1.1 N/A

E1.1.2 Limpeza dos moldes de um dos tipos de painel MPC ou MPR por operador

E1.1.3 N/A

E1.1.4 N/A

E1.1.5 Aplicação e secagem de *spray* desmoldante nos moldes de um dos tipos de painel MPC ou MPR por robô autônomo

E1.1.6 Aplicação e aferição a laser de espessura de *gelcoat* nos moldes de um dos tipos de painel MPC ou MPR por robô autônomo

E1.1.7 Complemento de aplicação de *gelcoat* até atingir espessura requerida, caso o item E1.1.6 não tenha sido atendido, e nova aferição

E1.1.8 Transporte para a sala de colocação de material por AGV sobre trilho

E1.2 Limpeza e preparação de moldes dos tipos PC ou PR

E1.2.1 N/A

E1.2.2 Limpeza dos moldes de um dos tipos de painel PC ou PR por operador

E1.2.3 N/A

E1.2.4 N/A

E1.2.5 Aplicação e secagem de *spray* desmoldante nos moldes de um dos tipos de painel PC ou PR por robô autônomo

E1.2.6 Aplicação e aferição a laser de espessura de *gelcoat* nos moldes de um dos tipos de painel PC ou PR por robô autônomo

E1.2.7 Complemento de aplicação de *gelcoat* até atingir espessura requerida, caso o item E1.2.6 não tenha sido atendido, e nova aferição

E1.2.8 Transporte para a sala de colocação de material por AGV sobre trilho

E1.3 Limpeza e preparação de moldes dos tipos PH, PRH, PEL ou PRE

- E1.3.1 Limpeza do conjunto de insertos para um dos tipos de painel IHS, IHI, IES ou IEL por operador
- E1.3.2 Limpeza dos moldes de um dos tipos de painel PH, PRH, PEL ou PRE por operador
- E1.3.3 Fixação do conjunto de insertos nos moldes de um dos tipos de painel PH ou PRH, nas duas metades do molde por operador
- E1.3.4 Fixação do conjunto de insertos nos moldes de um dos tipos de painel PEL ou PRE por operador
- E1.3.5 Aplicação e secagem de spray desmoldante nos moldes de um dos tipos de painel PH, PRH, PEL ou PRE por robô autônomo
- E1.3.6 Aplicação e aferição a laser de espessura de *gelcoat* nos moldes de um dos tipos de painel PH, PRH, PEL ou PRE por robô autônomo
- E1.3.7 Complemento de aplicação de *gelcoat* até atingir espessura requerida, caso o item E1.3.6 não tenha sido atendido, e nova aferição
- E1.3.8 Transporte para a sala de colocação de material por AGV sobre trilho

E1.4 Limpeza e preparação de moldes dos tipos PJG, PJA e PP

- E1.4.1 Limpeza do conjunto de insertos para um dos tipos de painel IJG, IJA ou IPP por operador
- E1.4.2 Limpeza dos moldes de um dos tipos de painel PJG, PJA ou PP por operador
- E1.4.3 Fixação de um inserto IJG ou IJA em um dos moldes PJG ou PJA, nas duas metades do molde: 480 s
- E1.4.4 Fixação de um inserto IPP em um molde PP por operador
- E1.4.5 Aplicação e secagem de spray desmoldante nos moldes de um dos tipos de painel PJ G, PJA ou PP por robô autônomo
- E1.4.6 Aplicação e aferição a laser de espessura de *gelcoat* nos moldes de um dos tipos de painel PJ G, PJA ou PP por robô autônomo
- E1.4.7 Complemento de aplicação de *gelcoat* até atingir espessura requerida, caso o item E1.4.6 não tenha sido atendido, e nova aferição

E1.4.8 Transporte para a sala de colocação de material por AGV sobre trilho

E2 CORTE E AJUSTE DE MATERIAL

E2.1 Corte e ajuste de material nos moldes de um dos tipos de painel MPC ou MPR

E2.1.1 Retirada do compartimento refrigerado e recorte transversal do prepreg no comprimento planejado do painel MPC ou MPR de 2820 mm por equipamento de corte a laser

E2.1.2 Recorte com 620 mm de largura ao longo do comprimento planejado do painel e dos cantos para encaixar as faces verticais para cada molde de um dos tipos de painel MPC ou MPR por equipamento de corte a laser

E2.1.3 N/A

E2.1.4 Retirada do filme superior de proteção por operador

E2.1.5 Enrolamento do prepeg cortado

E2.1.6 Transferência do prepreg para o molde com a face superior voltada para baixo, desenrolamento e posicionamento em cada molde por operador

E2.1.7 Retirada do filme da face oposta agora voltada para cima por operador

E2.1.8 Ajuste do prepreg na cavidade do molde, e fixação de tiras de fita adesiva junto à borda onde o material não estiver aderido ao *gelcoat* por operador

E2.1.9 Recolocação das sobras de recorte na refrigeração por operador

E2.1.10 Transporte dos dois moldes por AGV sobre trilhos para a sala de moldagem e cura SMC

E2.2 Corte e ajuste de material para os moldes de um dos tipos de painel PC ou PR:

E2.2.1 Retirada do compartimento refrigerado e recorte transversal do prepreg no comprimento planejado do painel PC ou PR de 2820 mm por equipamento de corte a laser

E2.2.2 Recorte de 1120 mm de largura ao longo do comprimento do painel e dos cantos para encaixar as faces verticais para cada molde de um dos tipos de painel PC ou PR por equipamento de corte a laser

E2.2.3 N/A

E2.2.4 Retirada do filme superior de proteção por operador

E2.2.5 Enrolamento do prepeg cortado

E2.2.6 Transferência do prepreg para o molde com a face superior voltada para baixo, desenrolamento e posicionamento em cada molde por operador

E2.2.7 Retirada do filme da face oposta agora voltada para cima por operador

E2.2.8 Ajuste do prepreg na cavidade do molde e fixação de tiras de fita adesiva junto à borda onde o material não estiver aderido ao *gelcoat* por operador

E2.2.9 Recolocação das sobras de recorte na refrigeração por operador

E2.2.10 Transporte dos moldes por AGV sobre trilhos para a sala de moldagem e cura SMC

E2.3 Corte e ajuste de material para moldes de um dos tipos de painel PH, PRH, PEL ou PRE:

E2.3.1 Retirada do compartimento refrigerado e recorte transversal do prepreg no comprimento planejado do painel PH, PRH, PEL ou PRE de 2820 mm por equipamento de corte a laser

E2.3.2 Recorte de 1120 mm de largura ao longo do comprimento planejado do painel, dos cantos do molde e dos dos insertos para encaixar as faces verticais para cada molde de um dos tipos de painel PH, PRH, PEL ou PRE por equipamento de corte a laser

E2.3.3 N/A

E2.3.4 Retirada do filme superior de proteção por operador

E2.3.5 Enrolamento do prepeg cortado

E2.3.6 Transferência do prepreg para o molde com a face superior voltada para baixo, desenrolamento e posicionamento em cada molde por operador

E2.3.7 Retirada do filme da face oposta agora voltada para cima por operador

E2.3.8 Ajuste do prepreg na cavidade do molde e fixação de tiras de fita adesiva junto à borda onde o material não estiver aderido ao *gelcoat*, nas duas metades do molde por operador

E2.3.9 Recolocação das sobras de recorte na refrigeração por operador

E2.3.10 Transporte dos moldes por AGV sobre trilhos para a sala de moldagem e cura SMC

E2.4 Corte e ajuste de material para os moldes de um dos tipos de painel PJG, PJA ou PP:

- E2.4.1 Retirada do compartimento refrigerado e recorte transversal do prepreg no comprimento planejado do painel PJG, PJA ou PP de 2820 mm por equipamento de corte a laser
- E2.4.2 Recorte de 1120 mm de largura ao longo do comprimento planejado do painel e dos cantos para encaixar as faces verticais para cada molde de um dos tipos de painel PJG, PJA ou PP por equipamento de corte a laser
- E2.4.3 Recorte da abertura, considerando as dimensões planejadas, para um dos tipos de painel PJG, PJA ou PP por equipamento de corte a laser
- E2.4.4 Retirada do filme superior de proteção por operador
- E2.4.5 Enrolamento do prepeg cortado
- E2.4.6 Transferência do prepreg para o molde com a face superior voltada para baixo, desenrolamento e posicionamento em cada molde por operador
- E2.4.7 Retirada do filme da face oposta agora voltada para cima por operador
- E2.4.8 Ajuste do prepreg na cavidade do molde e fixação de tiras de fita adesiva junto à borda onde o material não estiver aderido ao *gelcoat* por operador
- E2.4.9 Recolocação das sobras de recorte na refrigeração por operador
- E2.4.10 Transporte dos moldes por AGV sobre trilhos para a sala de moldagem e cura SMC

E3 MOLDAGEM E CURA SMC

Nesta etapa todos os moldes dos tipos de painel trabalhados possuem tempos invariáveis.

- E3.1.1 Posicionamento do molde sob o ponto fixo no solo para descida do contramolde do equipamento SMC por AGV sobre trilhos e travamento
- E3.1.2 Prensagem e cura no molde
- E3.1.3 Transporte por AGV sobre trilhos para a sala de montagem

E4 MONTAGEM DE INSTALAÇÕES E FECHAMENTO DOS MOLDES PARA COMPOR PAINÉIS COMPLETOS

E4.1 Montagem dos painéis do tipo MPC:

- E4.1.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas
- E4.1.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo
- E4.1.3 N/A
- E4.1.4 N/A
- E4.1.5 N/A
- E4.1.6 N/A
- E4.1.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes por operador
- E4.1.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes por operador
- E4.1.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.1.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.1.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV
- E4.1.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.1.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por AGV sobre trilhos

E4.2 Montagem dos painéis do tipo MPR:

- E4.2.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas
- E4.2.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo
- E4.2.3 N/A

- E4.2.4 Posicionamento e adesão de chapa de reforço de madeira compensada com adesivo e fibra nos dois moldes por operador
- E4.2.5 N/A
- E4.2.6 N/A
- E4.2.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes por operador
- E4.2.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes por operador
- E4.2.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.2.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.2.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV
- E4.2.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.2.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por AGV sobre trilhos

E4.3 Montagem dos painéis do tipo PC:

- E4.3.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas
- E4.3.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo
- E4.3.3 N/A
- E4.3.4 N/A
- E4.3.5 N/A
- E4.3.6 N/A
- E4.3.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes por operador
- E4.3.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes por operador
- E4.3.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.3.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.3.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV

- E4.3.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.3.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por AGV sobre trilhos

E4.4 Montagem dos painéis do tipo PR:

- E4.4.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas
- E4.4.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo
- E4.4.3 N/A
- E4.4.4 Posicionamento e adesão de chapa de reforço de madeira compensada com adesivo e fibra nos dois moldes por operador
- E4.4.5 N/A
- E4.4.6 N/A
- E4.4.7 Fixação das nervuras longitudinais, nos dois moldes por operador
- E4.4.8 Fixação das nervuras transversais, nos dois moldes por operador
- E4.4.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.4.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.4.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV
- E4.4.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.4.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por AGV sobre trilhos

E4.5 Montagem dos painéis do tipo PH:

- E4.5.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas

- E4.5.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo
- E4.5.3 Retirada dos insertos dos moldes por operador
- E4.5.4 N/A
- E4.5.5 Posicionamento e encaixe da tubulação hidráulica desde a caixa superior até o ponto de saída para fixação de torneiras no molde onde foram colocados os insertos por operador
- E4.5.6 Teste de pressão e vazamentos na tubulação hidráulica por operador
- E4.5.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes, sendo que o molde com a tubulação hidráulica deverá ficar embutido na nervura longitudinal por operador
- E4.5.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes por operador
- E4.5.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.5.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.5.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV
- E4.5.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.5.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por AGV sobre trilhos

E4.6 Montagem dos painéis do tipo PRH:

- E4.6.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas
- E4.6.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo
- E4.6.3 Retirada dos insertos dos moldes por operador
- E4.6.4 Posicionamento e adesão de chapa de reforço de madeira compensada com adesivo e fibra, nos dois moldes por operador

- E4.6.5 Posicionamento e encaixe da tubulação hidráulica embutida desde a caixa superior até o ponto de saída para fixação de torneiras no molde onde foram colocados os insertos por operador
- E4.6.6 Teste de pressão e vazamentos na tubulação hidráulica por operador
- E4.6.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes, sendo que o molde com a tubulação hidráulica deverá ficar embutido na nervura longitudinal por operador
- E4.6.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes por operador
- E4.6.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.6.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.6.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV
- E4.6.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.6.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por equipamento hidráulico no AGV

E4.7 Montagem dos painéis do tipo PEL:

- E4.7.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas
- E4.7.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo
- E4.7.3 Retirada dos insertos dos moldes por operador
- E4.7.4 N/A
- E4.7.5 Posicionamento e encaixe do eletroduto com a fiação embutida desde a caixa superior até o ponto de saída para fixação de tomada ou interruptor no molde onde foram colocados os insertos, passagem da fiação e testes de passagem de corrente elétrica por operador

E4.7.6 N/A

E4.7.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes, sendo que o molde com o eletroduto deverá ficar embutido na nervura longitudinal por operador

E4.7.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes por operador

E4.7.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo

E4.7.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV

E4.7.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV

E4.7.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador

E4.7.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por equipamento hidráulico no AGV

E4.8 Montagem dos painéis do tipo PRE:

E4.8.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas

E4.8.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo

E4.8.3 Retirada dos insertos dos moldes por operador

E4.8.4 Posicionamento e adesão de chapa de reforço de madeira compensada com adesivo e fibra nos dois moldes por operador

E4.8.5 Posicionamento e encaixe do eletroduto com a fiação embutida desde a caixa superior até o ponto de saída para fixação de tomada ou interruptor no molde onde foram colocados os insertos, passagem da fiação e testes de passagem de corrente elétrica por operador

E4.8.6 N/A

E4.8.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes, sendo que o molde com o eletroduto deverá ficar embutido na nervura longitudinal por operador

E4.8.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes por operador

- E4.8.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.8.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.8.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV
- E4.8.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.8.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por equipamento hidráulico no AGV

E4.9 Montagem dos painéis do tipo PJG:

- E4.9.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas
- E4.9.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo
- E4.9.3 Retirada dos insertos dos moldes por operador
- E4.9.4 N/A
- E4.9.5 Posicionamento e fixação dos quatro insertos de alumínio nas duas metades do molde em que será fixada a esquadria de janela grande por operador
- E4.9.6 N/A
- E4.9.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes, acima e abaixo do vão por operador
- E4.9.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes, na metade da distância acima e abaixo do vão por operador
- E4.9.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.9.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.9.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV
- E4.9.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.9.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por equipamento hidráulico no AGV

E4.10 Montagem dos painéis do tipo PJA:

- E4.10.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas
- E4.10.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo
- E4.10.3 Retirada dos insertos dos moldes por operador
- E4.10.4 N/A
- E4.10.5 Posicionamento e fixação dos quatro insertos de alumínio para fixação da esquadria de janela alta, nas duas metades do molde por operador
- E4.10.6 N/A
- E4.10.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes, acima e abaixo do vão por operador
- E4.10.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes, na metade da distância acima e abaixo do vão por operador
- E4.10.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.10.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.10.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV
- E4.10.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.10.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por equipamento hidráulico no AGV

E4.11 Montagem dos painéis do tipo PP:

- E4.11.1 Rebarbação por usinagem dos moldes por robô autônomo para garantir que as bordas estejam paralelas, sem excesso de material e permitam o perfeito encaixe ao serem contrapostas
- E4.11.2 Limpeza de restos, poeiras e resíduos do interior dos moldes laminados por robô autônomo: 300 s

- E4.11.3 Retirada dos insertos dos moldes por operador
- E4.11.4 N/A
- E4.11.5 Posicionamento e fixação dos três insertos de alumínio para fixação da folha da porta, nas duas metades do molde por operador
- E4.11.6 N/A
- E4.11.7 Fixação das nervuras longitudinais nos dois moldes, acima do vão por operador
- E4.11.8 Fixação das nervuras transversais nos dois moldes, duas em cada lado do vão, dividindo a altura do vão em três partes iguais por operador
- E4.11.9 Impregnação com adesivo nas bordas de um dos moldes por robô autônomo
- E4.11.10 Fechamento sob compressão do molde 'borboleta' por equipamento hidráulico no AGV
- E4.11.11 Rotação dos moldes para a posição vertical lateral onde estão os orifícios por equipamento hidráulico no AGV
- E4.11.12 Inserção de espuma PU pelos orifícios específicos na quantidade medida por operador
- E4.11.13 Transporte do molde travado e fechado para a sala de desmoldagem, montagem complementar e embalagem por equipamento hidráulico no AGV

E5 DESMOLDAGEM, MONTAGEM COMPLEMENTAR E EMBALAGEM

E5.1 Para todos os tipos de painel, exceto PJG, PJA e PP:

- E5.1.1 Conexão de terminais de ar comprimido por operador e desmoldagem
- E5.1.2 Retirada do excesso de espuma expandida de PU dos orifícios de respiro e fechamento com *gelcoat* por operador
- E5.1.3 Inspeção por falhas superficiais como defeitos, vazios, bolhas por operador
- E5.1.4 Correção das imperfeições superficiais com *gelcoat* por operador
- E5.1.5 Tamponamento de orifícios com protetores se o painel for do tipo PH, PRH, PEL ou PRE por operador
- E5.1.6 Adesão do selo de qualidade tipo QR-Code por robô autônomo
- E5.1.7 Fixação com fita adesiva de lâminas de EPS com espessura de 10 mm em todas as faces por robô autônomo

E5.1.8 Embalagem com plástico bolha por robô autônomo

E5.1.9 Colocação do engradado de madeira para transporte por robô autônomo

E5.1.10 Transporte para área de estocagem para expedição por AGV sobre trilhos

E5.1.11 Retorno do AGV com os moldes para reinício do processo

E5.2 Para os painéis PJG e PJA:

E5.2.1 Conexão de terminais de ar comprimido por operador e desmoldagem: 780 s

E5.2.2 Retirada do excesso de espuma expandida de PU dos orifícios de respiro e fechamento com *gelcoat* por operador

E5.2.3 Inspeção por falhas superficiais como defeitos, vazios, bolhas por operador

E5.2.4 Correção das imperfeições superficiais com *gelcoat* por operador

E5.2.5 Fixação das esquadrias de janela grande ou alta no vão e imobilizar por operador

E5.2.6 Adesão do selo de qualidade tipo QR-Code por robô autônomo

E5.2.7 Fixação com fita adesiva de lâminas de EPS com espessura de 10 mm em todas as faces por robô autônomo

E5.2.8 Embalagem com plástico bolha por robô autônomo

E5.2.9 Colocação do engradado de madeira para transporte por robô autônomo

E5.2.10 Transporte para área de estocagem para expedição por AGV sobre trilhos

E5.2.11 Retorno do AGV com os moldes para reinício do processo

E5.3 Para o painel PP:

E5.3.1 Conexão de terminais de ar comprimido por operador e desmoldagem

E5.3.2 Retirada do excesso de espuma expandida de PU dos orifícios de respiro e fechamento com *gelcoat* por operador

E5.3.3 Inspeção por falhas superficiais como defeitos, vazios, bolhas por operador

E5.3.4 Correção das imperfeições superficiais com *gelcoat* por operador

E5.3.5 Fixação das esquadrias de porta no vão e imobilizar por operador

E5.3.6 Adesão do selo de qualidade tipo QR-Code por robô autônomo

E5.3.7 Fixação com fita adesiva de lâminas de EPS com espessura de 10 mm em todas as faces por robô autônomo

E5.3.8 Embalagem com plástico bolha por robô autônomo

E5.3.9 Colocação do engradado de madeira para transporte por robô autônomo

E5.3.10 Transporte para área de estocagem para expedição por AGV sobre trilhos

E5.3.11 Retorno do AGV com os moldes para reinício do processo

Caso no subitem E5.X.3 (X variando de 1 a 3) verificam-se imperfeições que não possam ser corrigidas com pequenos retorques, como arestas ou cantos com pequenas falhas, mas seja por exemplo superfícies corrugadas, mal vedadas, com vazamento de espuma expandida, e outros defeitos visíveis que no processo deverão ser enumerados como críticos, o painel será descartado para o processo de reciclagem.