

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

FERNANDO NOGUEIRA CARDOSO

Avaliação dos indicadores ambientais durante o ciclo de vida das Manufaturas Convencional e Aditiva de Arame e Arco na Indústria 4.0: Um estudo de caso.

Rio de Janeiro
2025



UFRJ

FERNANDO NOGUEIRA CARDOSO

Avaliação dos indicadores ambientais durante o ciclo de vida das Manufaturas Convencional e Aditiva de Arame e Arco na Indústria 4.0: Um estudo de caso.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Claudinei de Souza Guimarães, D. Sc.

Coorientador: João da Cruz Payão Filho, Dr. Ing.

Rio de Janeiro

2025

Cardoso, Fernando Nogueira.
Avaliação dos indicadores ambientais durante o ciclo de vida das Manufaturas Convencional e Aditiva de Arame e Arco na Indústria 4.0: Um estudo de caso: Um estudo de caso / Fernando Nogueira Cardoso. – 2025.
F 123: il. 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2025.

Orientadores: Claudinei de Souza Guimarães e João da Cruz Payão Filho.

1. Avaliação de ciclo de vida. 2. Gases com Efeito estufa. 3. Resíduos Sólidos. 4. Procura de Energia. Guimarães, Claudinei. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnicae Escola de Química. III. Avaliação dos indicadores ambientais durante o ciclo de vida das Manufaturas Convencional e Aditiva de Arame e Arco na Indústria 4.0: Um estudo de caso: Um estudo de caso

UFRJ

Avaliação dos indicadores ambientais durante o ciclo de vida das Manufaturas Convencional e Aditiva de Arame e Arco na Indústria 4.0: Um estudo de caso.

Fernando Nogueira Cardoso

Orientador: D. Sc. Claudinei de Souza Guimarães

Coorientador: Dr. Ing. João da Cruz Payão Filho.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente, Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc, UFRJ

Prof. Eduardo Gonçalves Serra, D.Sc, UFRJ

Prof. Israel Bernardo de Souza Poblete, D.Sc, UFRJ

Prof. Estevão Freire, D.Sc, UFRJ

Rio de Janeiro
2025

“Vencer sem correr riscos é triunfar sem glórias.”

Ayrton Senna

AGRADECIMENOS

Gostaria de agradecer a Deus e ao meu pai Sergio Cardoso por todo o carinho de ter cuidado de mim e me incentivado a escrever essas tantas páginas desta dissertação. Um coração de ouro faz com que atitudes venham a valer mais do que palavras. Com amor e compreensão, escrevemos os trabalhos que serão utilizados com grandiosidade por aqueles que leem ou desejam aprender mais sobre tal tema no futuro.

Agradeço ao meu orientador Claudinei Guimarães por ter aceitado este desafio de realizar um trabalho inovador comigo. Sua assistência foi nobre durante esses anos de esforço, além de sua paciência e das boas brincadeiras e momentos de reflexão que tivemos. Um dos melhores orientadores que tive em todo esse tempo de carreira nas áreas de engenharia por onde passei.

Agradeço ao professor João da Cruz Payão Filho, meu coorientador, pela disponibilidade dos resultados experimentais do Laboratório Nacional de Tecnologia da Soldagem - LNTSOLD, da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - Brasil.

Agradeço às instituições do PEA e do PRH-17, as quais me concederam o conhecimento para adentrar profundamente nos tópicos, forneceram os recursos para me manter neste estudo e das reuniões de acompanhamento que proporcionaram boas conversas entre os professores e os alunos nas aulas. Os colegas feitos nas instituições são de mais valia para o futuro.

Aos amigos que desejam ler esta dissertação, embora não seja a área de vocês, tenho certeza de que os incentivos e ajudas em referências, softwares e pesquisas, além de todo o apoio emocional dos anos que se sucederam mostram que vocês são toda a família de que preciso e sempre precisei. Continuem participando da minha hoje e sempre, meus verdadeiros amigos.

Por fim, agradeço a você leitor que ao desejar estudar ou consultar sobre esta dissertação, trilhe um caminho no qual estou trilhando, e espero que possa encontrar as respostas ou inspirações para seu objetivo.

RESUMO

Cardoso, Fernando. N. **Avaliação dos indicadores ambientais durante o ciclo de vida das Manufaturas Convencional e Aditiva de Arame e Arco na Indústria 4.0: Um estudo de caso.** Rio de Janeiro, 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

A manufatura aditiva (MA) tem se mostrado capaz de apoiar ou até mesmo substituir a manufatura convencional (MC) em diversos setores, como transporte, siderurgia, aeroespacial, militar, arquitetura, construção civil e outros, com o objetivo de melhorar seus processos, reduzir o consumo de energia e o desperdício, racionalizar suas etapas e cumprir as novas regulamentações ambientais. O principal objetivo deste trabalho foi realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) "berço-ao-portão", considerando as etapas de extração de matéria-prima, pré-processamento, fabricação e pós-processamento, comparando dois métodos de fabricação para a mesma peça de flange metálica ER-90, o forjamento convencional e a manufatura aditiva de arame e arco (MAAA), todos seguindo os requisitos e operações propostos pelas normas ISO 14040/14044. A MAAA é uma tecnologia de Deposição de Energia Direcionada (DED) que usa processos de soldagem para produzir objetos 3D com geometrias mais complexas. Em comparação com o setor de forjamento, que exige muito calor e energia mecânica em suas etapas de produção de peças metálicas, o MAAA é uma alternativa mais sustentável e moderna, pois não exige altas temperaturas e energia elétrica para produzir a mesma peça. Os indicadores ambientais comparados foram o consumo de energia, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e os resíduos sólidos. O consumo total de energia, emissões e resíduos gerados no MA foram 63,8%, 90,5% e 31,6% menores do que os indicadores ambientais calculados para a MC, justificando a eficiência ao escolher a MA.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Manufatura Aditiva de Arame e Arco; Deposição de Energia Dirigida; Manufatura Convencional; Resíduos Sólidos; Gases de Efeito de Estufa; Demanda de Energia; Pegada de Carbono.

ABSTRACT

Cardoso, Fernando. N. **Assessment of environmental indicators during the life cycle of conventional and Wire and Arc Additive manufacturing in Industry 4.0: A case study.** Rio de Janeiro, 2025. Dissertatiton (Master's degree) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Additive manufacturing (AM) has been shown to support or even replace conventional manufacturing (CM) in various sectors such as transport, steel, aerospace, military, architecture, construction and others, with the aim of improving their processes, reducing energy consumption and waste, streamlining their stages and complying with new environmental regulations. The main objective of this work was to carry out a "cradle-to-gate" Life Cycle Assessment (LCA), considering the raw material extraction, pre-processing, manufacturing and post-processing stages, comparing two manufacturing methods for the same ER-90 metal flange part, conventional forging and wire and arc additive manufacturing (WAAM), all following the requirements and operations proposed by the ISO 14040/ 14044 standard. WAAM is a Directed Energy Deposition (DED) technology that uses welding techniques to produce 3D objects with more complex geometries. Compared to the forging industry, which requires a lot of heat and kinetic energy in its metal part production stages, WAAM is a more sustainable and modern alternative because it does not require high temperatures and energy to produce the same part. The environmental indicators evaluated were energy consumption, greenhouse gases (GHG) emissions and solid waste. The total energy consumption, emissions and solid waste generated in AM was respectively 63.8%, 90.4% and 31.6% lower than the environmental indicators calculated for CM, justifying efficiency by choosing AM.

Keywords: Life Cycle Assessment; Wire and Arc Additive Manufacturing; Directed Energy Deposition; Conventional Manufacturing; Solid Waste; Greenhouse Gases; Energy Demand; Carbon Footprint.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Emissões atmosféricas da produção global de ferro da WSA 61
Equação 2: Geração de resíduos das etapas de manufatura 65
Equação 3: Emissões atmosféricas da manufatura convencional 66
Equação 4: Gasto energético na manufatura aditiva 69
Equação 5: Emissões atmosféricas da manufatura aditiva 71
Equação 6: Consumo energético do pós-processamento 74
Equação 7: Demanda energética do pós-processamento 74
Equação 8: Emissões atmosféricas do pós-processamento 75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processos de injeção da manufatura formativa 10
Figura 2: Etapas do processo de laminação a quente 12
Figura 3: Exemplos de aplicações da impressão 3D pela MA 14
Figura 4: Relação custo acurácia da utilização da manufatura aditiva e convencional . 15
Figura 5: Esquema de barreiras, desafios e perspectivas dos fatores de MA.....16
Figura 6: Representação do processo de DED 17
Figura 7: Representação do processo de FDM.....18
Figura 8: Representação do processo de LOM.....19
Figura 9: Representação do processo de fusão de leito em pó 20
Figura 10: Representação do processo de fotopolimerização de cuba 21
Figura 11: Representação do processo de jateamento de material 22
Figura 12: Representação do processo de jateamento de aglutinante 23
Figura 13: Modelos robóticos cartesianos. Padrão (esquerda) e GANTRY (direita) 27
Figura 14: Modelo articulado do tipo esférico 27
Figura 15: Comparação visual entre os tipos de manufatura.....28
Figura 16: Comparação de escolha do uso nos tipos de manufatura.....29
Figura 17: Relacionamento das etapas de uma ACV 47
Figura 18: Fronteiras do sistema de uma AICV 48
Figura 19: Categorias de impacto do RECIPE 49
Figura 20: Diagrama de fronteira do sistema da MC e MA 56
Figura 21: Molde tubular do ER-90 para o estudo de caso 67
Figura 22: Célula de impressão de soldagem MAAA utilizado, modelo KR10 68
Figura 23: Usinagem da peça do estudo antes (a) e depois (b) 72
Figura 24: Torneadora CNC CENTUR 50 utilizada para o pós-processamento.....73
Figura 25: Furadeira D-1250 CENTUR 50 utilizada para o pós-processamento.....73
Figura 26: Região de impressão afetada por oxidação antes (a) e depois de lixado (b)..86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Processos de usinagem da manufatura subtrativa 8
Quadro 2: Subcategorias de processos de conformação 11
Quadro 3: Categorias de manufaturas aditivas da norma ASTM F2792-10e 24
Quadro 4: Normas da família 14040 45
Quadro 5: Classificação das categorias de impacto do RECIPE 50
Quadro 6: Dados de entrada da etapa de conversor elétrico do metal ER-90 59
Quadro 7: Dados de entrada da etapa de conversor a explosão do metal ER-90 59
Quadro 8: Dados de entrada da etapa de laminação a quente do ER-90 62
Quadro 9: Dados de entrada da etapa de trefilação 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões de qualidade do ar dos poluentes regulados 40
Tabela 2: Exemplo de resultados dos impactos na trefilação da MAAA do estudo 53
Tabela 3: Composição química do metal ER-90.....58
Tabela 4: Valores das emissões globais de CO_2 segundo o WSA 61
Tabela 5: Parâmetros de emissões da etapa de forjamento 66
Tabela 6: Parâmetros considerados para o cálculo energético da MAAA 70
Tabela 7: Parâmetros dos períodos ociosos considerados para a MAAA 70
Tabela 8: Parâmetros considerados para o cálculo de emissões GEE da MAAA.....71
Tabela 9: Valores energéticos das manufaturas convencional e aditiva 78
Tabela 10: Valores de emissões das manufaturas convencional e aditiva 82
Tabela 11: Valores residuais das manufaturas convencional e aditiva 85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Consumo energético total das manufaturas convencional e aditiva 79
Gráfico 2: Emissões atmosféricas totais da manufatura convencional e aditiva..... 82
Gráfico 3: Resíduos totais da manufatura convencional e aditiva 85

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ASTM	Soc. Am. Teste em Materiais (*American Society for Testing and Materials*)
AWS	Sociedade Americana de Arame (*American Welding Society*)
BOF	Forno de Explosão à Oxigênio (*Blast Oxygen Furnace*)
CAD	Desenho Assistido por Computador (*Computer Aided Design*)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMT	Transferência de Metal a Frio (*Cold Metal Transfer*)
CNC	Controle numérico computadorizado
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DED	Deposição de Energia Direcionada (*Directed Energy Deposition*)
DMLS	Sintetização Direta a Laser de Metal (*Direct Metal Laser Sintering*)
EAF	Forno de Arco Elétrico (*Electric Arc Furnace*)
EBM	Fabricação Aditiva por Feixe de Elétrons (*Electron Beam Melting)*
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ETA	Estação de Tratamento de Águas
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FDM	Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling*)
GEE	Gases do Efeito Estufa
GTAW	Soldagem de Arame do Gás Tungstênio (*Gas metal arc welding*)
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IOT	Internet das coisas (*Internet of Things*)
ISO	Org. Inter. de Normalização (*International Standard Organization*)
LBM	Fusão por Feixe de Elétrons (*Laser Beam Melting*)
LCPA	Laboratório de Controle da Poluição do Ar
LENS	Modelagem de Rede Projetada a Laser (*Laser Engineered Net Shaping*)
LNTSOLD	Laboratório Nacional de Tecnologia da Soldagem
LOM	Manufatura de Objetos Laminados (*Laminated Object Manufacturing*)
LSM	Deposição a Lazer de Metal (*Laser Metal Deposition*)
MAAA	Manufatura Aditiva de Arame e Arco (*Wire and Arc Additive Manufacturing – WAAM*)
MP	Material Particulado
NMVOC	Compostos Orgânicos Não Voláteis Não Metano
NR	Norma Regulamentadora
PBF	Fusão de leito de pó (*Powder Bed Fusion*)
PRONAR	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
PTAW	(*Plasma Transferred Arc Welding*)
SLS	Sintetização Seletiva a Laser
UC	Consolidação Ultrassônica
UV	Ultravioleta
WSA	Associação Mundial do Metal (*World Steel Association*)

LISTA DE SIMBOLOS

R = Resíduo gerado (kg)

EM_{MC} = Emissões GEE da manufatura convencional ($kgCO_2$-eq);

M = Massa do metal a ser manufaturado (kg).

E^{MAAA} = energia primaria do processo de MAAA (MJ);

N = Coeficiente de conversão de energia elétrica primaria;

P_{stb} = Energia de Standby do processo de MAAA da célula energética (kW);

T_{stb} = Tempo de Standby e desligamento do componente do processo de MAAA (h);

SEC = Energia específica consumida durante a deposição (kWh/kg)

M_{wire} = Massa do fio e seu material a ser depositado (kg);

P_{arc} = Energia do processo de arame e arco (kW);

T_{arc} = Tempo de operação do componente do processo de MAAA(h);

E_{gas} = Energia primária do gás de proteção (MJ/l);

T_{gas} = Tempo de fluxo do gás de proteção (h);

Q_{gas} = Vazão do fluxo do gás de proteção (l/h)

CES = Fator de emissão da pegada de carbono ($kgCO_2$-eq/kWh);

CF_{CO2} = Fator de emissão de GEE do gás de proteção (CO_2-eq/kg).

P_{stb}: Consumo de energia da máquina em *standby* (kW);

T_s: Tempo de preparação, fixação, e descarga da peça (h);

SEC: Consumo específico de Energia durante o corte (kWh/kg);

M_{Ci}: Massa do material a ser removido (kg);

t_{tci}: Tempo de mudança de ferramentas (h);

tc_i: Tempo de corte (h)

t_i: Tempo de vida útil da ferramenta (h).

E_{mt}: Energia de demanda (kWh);

N: Coeficiente de conversão de energia elétrica em primaria;

E_{tool}: Energia incorporada da ferramenta de corte (MJ);

E_{lub}: Energia incorporada do fluido de corte (MJ/kg);

Q_l: Taxa de consumo do fluido de corte (kg/h);

CO_{2tool}: Pegada de carbono da ferramenta de corte ($kgCO_2$);

CO_{2lub}: Pegada de carbono do fluido de corte ($kgCO_2$/kg).

SUMÁRIO

1 – Introdução **1**
2 – Fundamentação teórica **3**
2.1 –Manufatura na Indústria 4.0 ..... **3**
2.2 – Manufaturas Convencionais **7**
2.2.1 – Manufatura Convencional Subtrativa 7
2.2.2 – Manufatura Convencional Formativa 9
2.3 – Manufatura Aditiva **13**
2.4 - Impactos ambientais das indústrias manufatureiras **28**
2.4.1 – Interações entre os tipos de manufatura 28
2.4.2 – Impactos das manufaturas convencional e aditiva 31
2.4.2.1 – Recursos naturais 32
2.4.2.2 – Consumo energético 34
2.4.2.3 – Efluentes 35
2.4.2.4 – Saúde ocupacional 36
2.5 – Poluentes atmosféricos **37**
2.5.1 – Camadas da Atmosfera 37
2.5.2 – Características e definições dos poluentes 38
2.5.2 – Poluentes regulados 39
2.5.2.1 – Monóxido de Carbono (CO) 40
2.5.2.2 – Ozônio troposférico (O_3) 41
2.5.2.3 – Dióxido de enxofre (SO_2) 41
2.5.2.4 – Dióxido de nitrogênio (NO_2) 42
2.5.2.5 – Material Particulado (MP) 42
2.6 – Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) **44**
2.6.1 Métodos de ACV 48
2.6.2 Softwares 52
3 - Objetivos **54**
3.1 – Objetivos Gerais **54**
3.2 – Objetivos específicos **54**
4 – Metodologia **55**
4.1 – Definição e escopo **55**
4.2 – Fronteiras do sistema **56**
4.3 – Qualidade e obtenção dos dados do material **57**
4.3.1 – Extração e produção do metal (Etapa 1) 58
4.3.2 – Laminação a quente (Etapa 2) 62

4.3.3 – Dados da Manufatura Convencional (Etapa 3) 63
4.3.3.1 – Cálculos dos indicadores ambientais da Manufatura Convencional 64
4.3.4 – Dados da etapa de Trefilação (Etapa 5)..... 66
4.3.5 – Dados da Manufatura Aditiva de Arame e Arco (Etapa 6)..... 68
4.3.5.1 – Cálculos dos indicadores ambientais da MAAA. 69
4.3.6 – Dados do pós-processamento de ambas manufaturas (Etapas 4 e 7) 72
4.3.6.1 – Cálculos dos indicadores ambientais do Pós-Processamento..... 74
5 – Resultados e discussões 76
5.1 – Aspectos energéticos 76
5.2 – Aspectos das emissões atmosféricas..... 80
5.3 – Aspectos residuais 83
5.4 – Discussões gerais 87
5.4.1 – Malha energética 87
5.4.2 – Combustíveis dos equipamentos 88
5.4.3 – Reciclagem e reutilização residual..... 91
6 – Conclusão 933
7 – Sugestões parra trabalhos futuros 965
8 – Referências 966
ANEXOS 1044

1 – Introdução

A automação do sistema e a troca e o acúmulo de dados nas etapas de produção tornam o setor manufatureiro mais produtivo e eficiente, além de reduzir o desperdício, rumo a um modelo mais sustentável (HUANGA, 2023). A manufatura aditiva (MA), um conceito relativamente novo em comparação com outros processos tradicionais do mercado, tem se mostrado essencial para apoiar essa transformação da produção na indústria, utilizando muitos tipos de materiais. O Comitê de Testes e Materiais da Sociedade Americana F42 (ASTM) definiu a MA como um processo de união de materiais a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada por camada, em oposição às metodologias convencionais, obtendo assim uma geometria mais próxima da peça final em primeira instância (ASTM, 2025).

Entre os vários processos de MA, a Manufatura Aditiva por Arame e Arco (MAAA) se destaca na produção de peças metálicas, com o objetivo de reduzir o tempo e os custos de produção, diminuindo o desperdício de matéria-prima e o consumo de energia, além de tornar o processo de produção mais sustentável (ASTM, 2015). Tal manufatura é um processo bem estruturado e complexo, derivado dos processos de soldagem a arco, que utiliza uma tocha com alimentação contínua de arame para depositar o material de base (PRIARONE, 2019).

A MAAA é uma nova tecnologia pertencente à categoria de Deposição de Energia Direcionada (DED), que está sendo cada vez mais aplicada em diversas áreas e permite a construção de componentes camada por camada usando arame de soldagem como material de enchimento e um arco elétrico como fonte de calor (XIAN, 2025). Essa oferece várias vantagens, incluindo menores custos de equipamento, maior eficiência no uso de materiais, produção superior e excelente camada de solda (SWORD, 2024). Essas características tornam a manufatura aditiva de arame e arco particularmente adequada para a produção de grandes estruturas (WANG, 2025).

Sua eficácia pode ser demonstrada pela realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), um método de análise dos impactos ambientais de um produto, processo, serviço ou outra atividade econômica em todo o seu ciclo de vida. É uma ferramenta importante para avaliar o desempenho das etapas de um processo e identificar os impactos ambientais, o que pode ajudar na tomada de decisões, nas medidas de controle e na

quantificação das emissões para a atmosfera, o solo e os efluentes durante o ciclo de vida de um processo ou produção. A ACV envolve a coleta, a organização e a avaliação de todas as entradas e saídas de um sistema de produção, permitindo a análise dos possíveis impactos ambientais durante todo o seu ciclo de vida (ISO, 2025).

Entretanto, apesar das muitas aplicações da ACV, a metodologia tem limitações que devem ser consideradas nos estudos, bem como na avaliação de seus resultados. Particularmente no Brasil, as principais limitações dos estudos de ACV são a dificuldade de obtenção de bancos de dados nacionais, incerteza do método em termos de resultados para a tomada de decisões, coleta de dados primários e de comparar resultados quantitativos de estudos sobre o mesmo assunto, e o alto custo e o tempo necessários para realizar uma ACV (DE EIKER, 2010).

Em um contexto ambiental de altas emissões, resíduos, esgotamento de recursos e degradação ambiental é cada vez mais necessário mudar os processos de produção, e as indústrias devem investir nessas mudanças. Para a impressão final das peças, quatro fatores são considerados no processo de fabricação: a fonte de energia, o material usado, dados coletados e a geometria final do produto. Esses são estágios importantes que afetam o modelo CAD criado no software, a escolha do robô que traduz o programa, a quantidade de matéria-prima necessária para a impressão e a qualidade do acabamento da superfície da peça produzida usando os dois métodos de fabricação.

Este trabalho propõe em uma análise de ciclo de vida do berço-ao-portão calcular a demanda de energia, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e os resíduos gerados durante a fabricação de um flange metálico, comparando-os com o método de fabricação convencional de forjamento (MC) e o MAAA, a fim de contribuir para a compreensão das práticas de fabricação atuais e justificar o MAAA como uma tecnologia mais sustentável e convencional do que a manufatura convencional.

2 – Fundamentação teórica

A fim de compreender os tópicos estudados neste trabalho, será descrito nesta fundamentação teoria os temas de manufaturas abordados. Tópicos como o processo de industrialização, categorias e subcategorias de manufaturas convencionais e aditivas, descrição dos impactos ambientais, abordagens das ACV e softwares serão abordados para apresentar uma base de compreensão do estudo de caso. As metodologias aderidas seguem as normas estabelecidas e processos das manufaturas apresentadas na fundamentação teórica a seguir.

2.1 –Manufatura na Indústria 4.0

O termo industrialização se caracteriza como um processo de avanço tecnológico e socioeconômico. Este culminou na mudança de paradigma do desenvolvimento organizacional, e dos métodos utilizados para realizar a produção de tecnologias e de bens de consumo. Tal avanço alterou os meios de produção, também reverberando em tópicos de discussões recentes, como questões ambientais, segurança dos trabalhadores e do uso de máquinas autônomas para realizar trabalhos mais complexos (CANO, 2018).

A fim de entender a tecnologia e os processos atuais das manufaturas de fabricação e montagens de peças é interessante compreender sua evolução, desde a Primeira Revolução Industrial (Indústria 1.0) com máquinas a vapor rudimentares, até a Indústria 4.0 no Brasil, com a substituição das mesmas por computadores autômatos. Esta linha do tempo também abre um tópico de discussão, apresentando ideais que estão levando países europeus a discutirem o próximo avanço para a futura Industria 5.0.

A Primeira Revolução Industrial, que se iniciara na Inglaterra entre o Século XVIII e XIX, teve sua produção majoritariamente manual substituída por maquinários a vapor, servindo a diversos setores, principalmente os de produção e transportes. A energia necessária para operar estas maquinas se dava através do uso do carvão mineral, onde sua procura e extração se intensificaram pela Europa. Um ponto a ser considerado seria de que na época ainda não se tinha preocupação ambiental, marcando-a como um dos períodos com elevadas emissões de gases do efeito estufa (SAKURAI, 2018).

A necessidade do sistema capitalista de reduzir o tempo de produção e de transportes dos produtos manufaturados, propiciou as condições a investimentos

tecnológicos. Como consequência, novos equipamentos e veículos mais sofisticados foram utilizados e comercializados, abrindo as portas para uma corrida desenvolvimentista, onde se adentrou o período conhecido como a Segunda Revolução Industrial (Indústria 2.0) (CAVALCANTE, 2011).

A Segunda Revolução Industrial foi marcada pela propagação das inovações tecnológicas, uso de novas fontes de energia e do desenvolvimento de indústrias, principalmente da siderurgia e química. Os processos de manufatura utilizavam energia elétrica e do refino do petróleo para produzirem cada vez mais em menos tempo. A indústria química avançou ao ponto de produzir derivados do petróleo, medicamentos e fertilizantes utilizados até os dias de hoje. Também foi responsável pela transformação do ferro em aço, tornando notório o avanço das siderúrgicas e seu papel nesta era (SAKURAI, 2018).

Com a racionalização do trabalho e otimização da produção, Henry Ford desenvolveu em 1914 o sistema de produção Fordista. Este introduziu linhas de montagem, obtendo mais eficiência, ou seja, produzir mais e com menor custo, sistematizando as manufaturas. Posteriormente no Japão em 1970, o Toyotismo trouxe uma alternativa ao modelo fordista, onde com a criação do sistema "*just-in-time"* priorizou a demanda dos consumidores, a fim de evitar o desperdício de matéria-prima e evitar grandes estoques. Por volta desse período, se iniciara a Indústria 3.0 (GOUNET, 1999).

A Terceira Revolução Industrial, veio com a visão de automatização das fábricas e avanços tecnológicos provenientes do século XX e XXI. Conhecida como Revolução Técnico-Científica e Informacional, levaram destaque os setores voltados para as áreas de informática, robótica, genética, telecomunicações, dentre outras áreas correspondentes. Com a sofisticação das máquinas nas indústrias, a mão-de-obra necessária para operá-las e, também, teve seu salto nos direitos trabalhistas e especialização, embora tenha levado a uma alta taxa de desemprego (SILVA, 2002).

A globalização possibilitou diferentes culturas a compartilhar suas inovações tecnológicas e se comunicar cada vez mais rápido. A mesma acarretou crescentes competições de mercado entre as empresas desejando expandir suas filiais, decidiram investir em indústrias robotizadas, novos combustíveis alternativos, gestões de eficiência no trabalho e massificação de produtos tecnológicos (SILVA, 2002).

O aumento da preocupação ambiental começou a ser um assunto mais presente, levando a elaboração de projetos visando o desenvolvimento sustentável. Fontes de energias renováveis começaram a ser um conceito mais difundido e aplicado na indústria manufatureira, gerando uma economia de energia, de custos operacionais e de uma propaganda mais sustentável das empresas ao alavancar suas reputações no mercado.

A Indústria 3.0 teve como consequência uma mudança social e econômica permitindo a expansão das multinacionais para outros países, devidos as vantagens, mão-de-obra e incentivos apresentados. Este capitalismo financeiro consolidado buscou cada vez mais automatizar suas fábricas, substituindo as manufaturas por maquinofaturas, com o intuito de otimizar cada vez mais seus processos de produção. Com este pensamento e a subsequente revolução digital, trilharam o caminho para a nova Indústria 4.0 (SAKURAI, 2018).

A 4º revolução surgiu na Alemanha em meados de 2013, originada de um plano de ação estratégica do governo para assegurar a competitividade no ramo tecnológico. Com a evolução dos sistemas da indústria nas áreas de robótica e informática, as características da revolução voltam-se para as novas inteligências artificiais, Internet das Coisas (IOT), armazenagem de dados em nuvem, fabricas inteligentes e Sistemas Físico-Cibernéticos (CPS - *Cyber-Physical Systems*) (ALBERTIN, 2017).

Segundo SANTOS (2018), ao estudar diversos autores, cada um apresenta uma definição diferente da Indústria 4.0, onde alguns a consideram como "*um termo coletivo para tecnologias e conceitos de organização de cadeias de valor*" (HERMANN et al, *apud* SANTOS, 2016), outros como a aplicação de novas tecnologias de produção para obter valores e serviços para a organização (KHAN e TUROSWSKI, *apud* SANTOS, 2016). Com essas análises apresentadas, a Indústria 4.0 interpreta-se pelo avanço tecnológico, onde a interface de humanos com maquinas nas operações se torna mais conectada.

As fabricas inteligentes facilitam a integração das necessidades dos consumidores e dos processos de comunicação interna. Utilizando o CPS, o qual realiza a troca de informações entre os programas e sistemas para operar de forma autônoma, tornam os processos de produção mais transparentes. A comunicação de comandos em tempo real, redução da taxa de falhas, conhecimento preciso de status e rotas das operações, facilita

o monitoramento das linhas de produção, alterando etapas caso venha a ser necessário (SANTOS, 2018).

A Internet das Coisas tem a função de facilitar a conexão desses dispositivos. A mesma integra objetos físicos e virtuais em redes conectadas a internet, onde estes dados são coletados, processados e analisados na nuvem para otimizar o sistema como um todo. Os resultados otimizam as operações, avalia a performance e o consumo energético e econômico. O sistema permite ao usuário acessar facilmente em qualquer aparelho conectado estes dados, flexibilizando o relacionamento de humanos com as fabricas inteligentes (ALBERTIN, 2017).

Algumas tecnologias voltadas para a indústria também estruturam a base para a manufatura aditiva. A utilização de programas de computador para efetuar o design dos produtos, simular seus efeitos sob condições realistas e realizar cálculos de gastos energéticos, de consumo de material e até de seus impactos no meio ambiente através de uma ACV, podem ditar a eficiência do mesmo, sem mesmo ter o fabricado (ALBERTIN, 2017).

O Brasil possui a maioria de suas manufaturas, inserindo no modelo convencional da indústria 3.0 e encontra-se em estágios de transição para a indústria 4.0. A disponibilidade energética ambiental, infraestrutura para receber tais equipamentos, a especialização de mão-de-obra apta para operar os sistemas e o incentivo governamental na adoção dessas tecnologias, são parâmetros e indicativos de que o país está caminhando para indústria 4.0 (VILLALBA, 2022).

Embora a utilização de ambientes virtuais para melhorar a visão dos processos fabris, do uso de novas inteligências artificiais que aprendem e interpretam as informações coletadas em campo, caminhamos para a Indústria 5.0, onde se integra uma sinergia maior com máquinas e humanos. Ainda que a utilização de termos como Big Data e inteligências artificiais estejam presentes nos dias atuais, esta nova indústria poderá vir a surgir, com máquinas e dados com maior complexidade e qualidade, podendo se ter fábricas que podem se administrar totalmente autônomas (CARRO, 2022).

2.2 – Manufaturas Convencionais

Com a evolução da indústria diversos processos de fabricação de produtos foram desenvolvidos, substituindo os antigos meios artesanais. A manufatura convencional (MC), também conhecida como tradicional, compreende-se como todos os processos de larga escala estabelecidos na indústria, desde a segunda e terceira revolução industrial. Mesmo com as revoluções impactando diretamente na MC, existem limitações e considerações antes de se escolher um processo, lidando com suas incertezas, quantidade de dados, requisitos técnicos e complexidade (LIANG, 2018).

Na escolha do processo de manufatura alguns fatores devem ser considerados, tais como: matéria-prima, geometria, pós-processamentos, qualidade superficial da peça, vida útil do equipamento, custos e tempo de produção. Além desses fatores a equipe do projeto deve ser treinada para adaptar a produção em todas as etapas, sendo necessária a interação de diversas áreas da empresa a depender da complexidade do produto final (MACHADO, 2015).

Das manufaturas existentes, é possível dividi-las em três tipos, sendo subtrativas, formativas e aditivas. Enquadramos as subtrativas e formativas na manufatura convencional, podendo ter suas adaptações implementadas juntamente com a aditiva recebendo o nome de manufatura híbrida (LIANG, 2018). Para os tópicos seguintes será comentado acerca das manufaturas subtrativa e formativa, falando de seus processos e métodos de escolha. Posteriormente será comentado sobre as tecnologias e conceitos que se adaptam para a manufatura híbrida.

2.2.1 – Manufatura Convencional Subtrativa

A manufatura subtrativa (MS) constitui na construção de uma peça através da remoção de material, sendo esculpida e/ou lapidada a partir de um molde bruto. Utilizando técnicas de usinagem CNC (controle numérico computadorizado), torneamento, fresamento, retificação, eletroerosão por penetração ou a fio, dentre outras, o molde possui uma perda percentual material, essas conhecidas como cavaco. Para se atingir as especificações desejadas com um bom acabamento em sua geometria final, é necessário experiência por parte dos operadores das máquinas e da escolha das metodologias aplicadas durante as etapas de produção (WILTGEN, 2022).

Existem metodologias de usinagem convencional, as quais são voltadas para o uso de energia mecânica, e não convencional, onde existem outros meios energéticos a serem como energia elétrica, química, térmica, laser, etc. Os convencionais mais usados são torneamento, fresamento, furação, mandrilhamento, brochamento e retificação. Para os não convencionais existem usinagem por jato d'água, química, mas vale o destaque para a eletroerosão, seja por penetração ou a fio. O Quadro 1 apresenta os principais processos de usinagem subtrativa que podem utilizar CNC.

Processo de usinagem	Equipamento	Função
Torneamento	Torno	Voltado para a fabricação de peças cilíndricas, o equipamento através do deslocamento linear desgasta a peça que exerce um movimento rotacional até a dimensão desejada.
Fresamento	Fresa	Ferramenta com múltiplas arestas cortantes que rotaciona em direção a peça presa à mesa. A peça realiza movimentos transversais e longitudinais.
Furação	Furadeira	O equipamento gira enquanto realiza o movimento de avanço manual ou automático em direção a superfície de furação.
Mandrilhamento	Mandriladora	Fresamento para peças com grandes dimensões e assimétricas, realiza movimentos de corte e avanço, com a peça estática. É utilizada no acabamento interno de furos cilíndricos.
Brochamento	Brocha	Gera furos diferentes de formas cilíndricas. Realiza um furo inicial para o perfil desejado a depender dos "dentes" utilizados.
Retificação	Retifica	Geralmente posterior ao torneamento e fresamento. Lixamento, desbaste e polimento de superfícies. Pode ser utilizada para cortes com discos de corte
Eletroerosão por penetração	Eletrodo	Um eletrodo feito de cobre ou grafite, é moldado na forma que ele deve reproduzir na peça. Ele dispara descargas elétricas em pontos previamente determinados pelo programa, removendo micropartículas de metal da ferramenta usinada, transferindo a forma do eletrodo para a peça.
Eletroerosão a fio	Eletrodo	Um eletrodo em formato de fio é controlado pelo computador para seguir um caminho pré-determinado, cortando ranhuras estreitas através da peça para produzir a forma desejada.

Quadro 1: Processos de usinagem da manufatura subtrativa.
Fonte: Adaptado de MACHADO, 2015.

Algumas das vantagens na utilização da MS incluem sua alta precisão e acabamento utilizando as técnicas de usinagem, exemplo de fresamento e torneamento que permitem a obtenção de tolerâncias difíceis e superfícies com alta qualidade. Além disso, sua flexibilidade na escolha do material inclui a construção da peça utilizando plásticos, cerâmicas, metais, compósitos, etc. podendo ser produzidas em alta escala, com uma resistência e durabilidade garantindo uma integridade estrutural adequada.

2.2.2 – Manufatura Convencional Formativa

A manufatura formativa (MF), diferentemente da MS, não possui uma grande remoção de porcentagem do cavaco, onde para a formação de suas peças é aplicada pressão a um corpo de matéria-prima ou utilizado um molde pré-pronto. Processos nos quais utilizam moldes o material é aquecido até seu estado líquido, posteriormente introduzindo-se na cavidade do molde até se solidificar ao ser resfriado, conformando-se ao formato desejado. Tal deformação plástica também pode vir a ocorrer em temperatura ambiente, a depender do material. Os principais processos são os de fundição, injeção, soldagem, metalurgia do pó e conformação. Dentro do processo de conformação, suas subcategorias são laminação, extrusão, trefilação, forjamento e estampagem (MACHADO, 2015).

A fundição é voltada para a utilização de metais ferrosos e não ferrosos, consistindo no aquecimento do material e despejo em moldes metálicos (por gravidade, centrifugação ou pressão) ou não metálicos (área verde, cura frio, modelo concha e cera). O modelo mais utilizado no mundo é o de pressão, enquanto no Brasil é o modelo de areia verde, devido ao baixo custo e simplicidade. Suas desvantagens incluem a heterogeneidade da areia a qual influencia em um acabamento superficial inferior as demais opções (CASOTTI, 2011).

O processo de injeção necessita utilizar um molde mecânico com uma cavidade de geometria da peça específica. Inicialmente o material termoplástico é depositado em um cilindro de plastificação, onde é aquecido até seu estado liquido ou semilíquido por eletricidade, sendo transportado até o molde. Neste local, o mesmo se solidifica por resfriamento no formato mecânico desejado. Tal manufatura tem a possibilidade de reversão, diferente dos materiais termofixos que não podem ser conformados novamente mediante a um novo processo de aquecimento (WILTGEN, 2022). A Figura 1 representa o processo de injeção descrito.

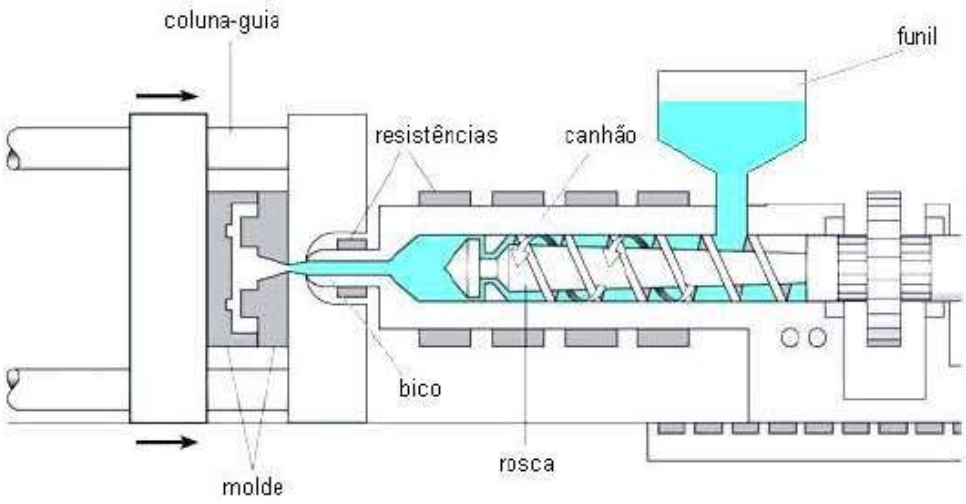


Figura 1: Processos de injeção da manufatura formativa.
Fonte: WILTGEN, 2022.

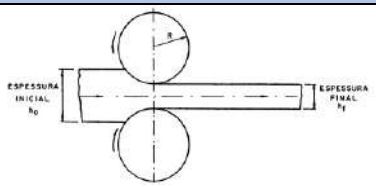
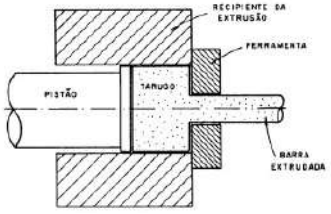
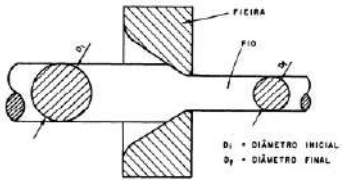
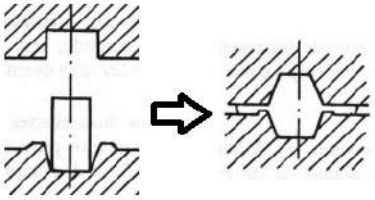
A soldagem pode ser definida como um processo de união entre duas partes metálicas podendo utilizar uma fonte de calor, pressão ou ambas. A escolha da soldagem se dá quando é visado uma integração maior entre as partes, contendo maior resistência mecânica. Outro cenário para sua utilização é devido a impossibilidade de união devido a partes delicadas (componentes eletrônicos) ou dado outros processos realizados anteriormente (cola, rebites, parafusos, etc.) (WAINER, 2015).

As vantagens do uso deste processo englobam a elevada integridade e eficiência da junção das partes, aplicação a diversos tipos de materiais, equipamentos portáteis, isento de vazamentos, não ocorre perda de apertos e com um custo considerável. Das desvantagens a união não pode ser desfeita, pode levar a distorções e tensões residuais, pode necessitar de tratamento térmico, sensível a falha total e demandar um alto grau de habilidade do operador (WAINER, 2015).

O uso da metalurgia do pó consiste em compactar principalmente o pó metálico e aquece-lo, a fim de melhorar a coesão da estrutura interna. Sua característica deriva de sua temperatura permanecer abaixo do ponto de fusão do metal utilizado. Embora existam vantagens chamativas em seu uso, como a perda mínima de material, bom acabamento superficial em sua geometria, eficiência energética, facilidade de automação e a obtenção de uma peça mais pura, a mesma enfrenta desvantagens como o custo elevado da ferramenta, impedimento de processos posteriores de soldagem devido a propriedades físico-químicas, e em relação ao formato e tamanho limitados da peça final (NUNES, 2003).

Por fim, os processos de conformação visam a modificação da forma de um corpo metálico para outra definida. Sua divisão se dá por dois grupos, sendo eles os mecânicos e metalúrgicos. O mecânico as modificações de forma são derivadas de tensões externas sem a liquefação do metal, podendo utilizar ou não elevadas temperaturas, enquanto no metalúrgico mesmo que ainda envolva modificações por tensões, ocorre a liquefação do metal ou a difusão de partículas metálicas (BRESCIANI, 1997).

Um fator a ser comentado na formação mecânica são os processos de conformação plástica, onde as tensões aplicadas são inferiores ao limite de resistência à ruptura do material, e dos processos de usinagem onde as tensões são superiores ao dos limites mencionados. Para garantir uma fabricação solida, especificações como as condições superficiais, propriedades mecânicas e dimensões e forma são levadas em conta na escolha das subdivisões de conformação (BRESCIANI, 1997). O Quadro 2 cita os tipos de conformação, seguido de suas características e respectivas áreas de aplicação.

Processo	Características	Representação visual
Laminação	Passagem de um corpo sólido por dois cilindros que rotacionam em sentidos contrários	
Extrusão	Passagem de um lingote ou tarugo circular dentro de um recipiente e pressionado por um pistão	
Trefilação	Deformação do material por esforço de tração aplicado pela compressão	
Forjamento	Deformação do material através de martelos ou aplicação gradativa de pressão, com a utilização de aquecimento ou temperatura ambiente	
Estampagem	Utilização de cortes ou deformações em prensas, sem aquecimento	

Quadro 2: Subcategorias de processos de conformação.
Fonte: Adaptado de BRESCIANI, 1997.

O método conhecido como *Hot Rolling* (laminação a quente) consiste no uso de pares de rolos, rotacionando em sentidos opostos em torno do próprio eixo na mesma velocidade. Uma placa de metal é pré-aquecida para evitar deformidades, posteriormente passando por uma esteira entre os rolos cuja a espessura é inferior à da placa, sofrendo uma deformação plástica e reduzindo-a por atrito e tensão. Com sua espessura reduzida a cada novo par de rolos com distâncias ainda menores, seu comprimento e largura se expandem, sendo nivelados posteriormente por outros rolos (SONG, 2022).

Para se obter os formatos citados, convém a depender dos diferentes tipos de rolos, sendo achatados, arredondados ou não simétricos. Uma vez que o metal é deformado, ele precisa ser resfriado, geralmente se utilizando água pressurizada, também utilizada em limpezas superficiais de detritos durante as etapas de aquecimento do metal. Todo o processo é computadorizado, necessitando alterar apenas os parâmetros das máquinas. O processo visual se encontra na Figura 2 abaixo.

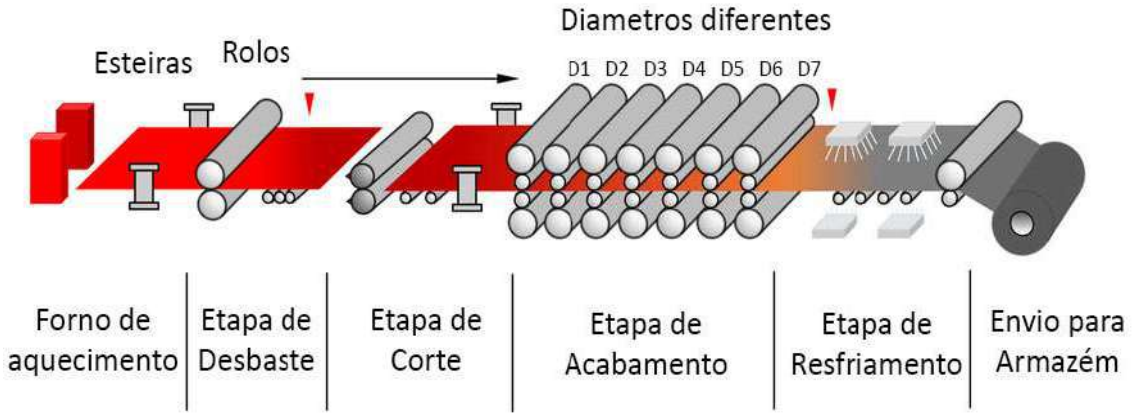


Figura 2: Etapas do processo de laminação a quente.
Fonte: Adaptado de SONG, 2022.

Embora os rolos criem barras e lingotes com dimensionamentos diferentes, a massa utilizada para a formação dos mesmos possui a mesma perda durante a laminação a quente. Processos convencionais utilizam a laminação a quente para se obter os lingotes, enquanto para a obtenção de barras para a manufatura aditiva também se utiliza o mesmo conceito, porém com rolamentos côncavos, processo conhecido como *Wire Bar Rolling*.

2.3 – Manufatura Aditiva

As empresas, atualmente, têm como meta acompanhar novas demandas e tecnologias nos setores industriais, além de produzir e desenvolver produtos mais complexos, tendo como prioridade a redução de custos, maior qualidade, mais rapidez e flexibilização durante as operações dos produtos manufaturados. Neste sentido, a manufatura aditiva (MA) vem sendo introduzida no mercado mundial desde a década de 1980 (GODEC, 2022).

Durante esta década, a comercialização dos primeiros modelos de peças criadas pela MA recebeu terminologias para sua descrição, tais como prototipagens, manufatura aditiva por camada, impressão em 3 dimensões (3D), usinagem rápida, dentre outros. Com o avanço da Indústria 4.0, a integração da manufatura com softwares de modelagem e impressão 3D em diversos formatos (exemplo de CAD, 3MF STEP, CLI, etc.), internet e os estágios iniciais de automação, levou a incorporação desta manufatura em substituição ou complementação das manufaturas convencionais (WONG, 2012).

A manufatura aditiva é definida pela norma ISO/ASTM 52900-15 como um processo de obtenção de peças a partir de dados de modelos 3D, geralmente por deposição de camada por camada, diferente dos métodos convencionais subtrativos e formativos, tais como usinagem e fundição, respectivamente. Sua utilização visa a flexibilidade na produção de peças, além de redúzir seu custo e tempo de fabricação.

As impressões provenientes dessa manufatura podem vir com uma geometria complexa, onde se torna difícil ou impossível de ser feita com métodos de fabricação convencionais. Uma característica do aditivo seria o planejamento dos produtos provenientes de modelos CAD 3D, reproduzindo de acordo a complexidade da peça, não necessitando de ferramentas ou acessórios adicionais (GODEC, 2022).

O processo de MA pode ser aplicado a vários tipos de atividades e setores, tais como indústria petroleira e de óleo e gás, civil e arquitetura, transporte, médicas, aeroespacial, naval, etc. As peças podem ser produzidas de uma variada gama de materiais, como concreto, plástico, silicone, metais, polímeros, químicos, dentre outros (BUCHANAN, 2018). Na Figura 3, alguns exemplos de produções de modelos, protótipos e design de peças podem ser observados em algumas atividades descritas anteriormente.



Figura 3: Exemplos de aplicações da impressão 3D pela MA.

A) Ponte MX3D em Amsterdam. MX3D, 2022; B) Prótese humana – BESPOKE, 2023; C) Boneco decorativo – Gibson, 2021; D) Peça metálica de turbina – SOLID CONCEPTS. 2023; E) Design em joias e anéis – PRO-JET, 2023; F) Três Rinocerontes decorativos – Gibson, 2021.

A definição do processo adequado para a produção de uma peça depende de variáveis como o tempo de execução, a complexidade geométrica do item e os custos envolvidos. O custo para a produção é influenciado pelo tempo de impressão, consumo energético, equipamentos, matéria-prima, treinamento dos trabalhadores. Métodos convencionais necessitam de mais tempo e etapas adicionais de pós-processamento para alcançar um resultado próximo em comparação ao aditivo (THOMAS, 2014).

Embora o processo de MA venha sendo barateado ao longo do tempo pela evolução tecnológica, a escolha do mesmo depende da geometria da peça, levando a um possível custo elevado. A fim de maximizar os benefícios na escolha da manufatura, CODEG (2022) apresenta na Figura 4 um gráfico onde a relação de custo e acurácia de produção em relação a complexidade do produto. Neste se tem uma área otimizada para a escolha da adoção do método da MA, em contraponto aos convencionais.

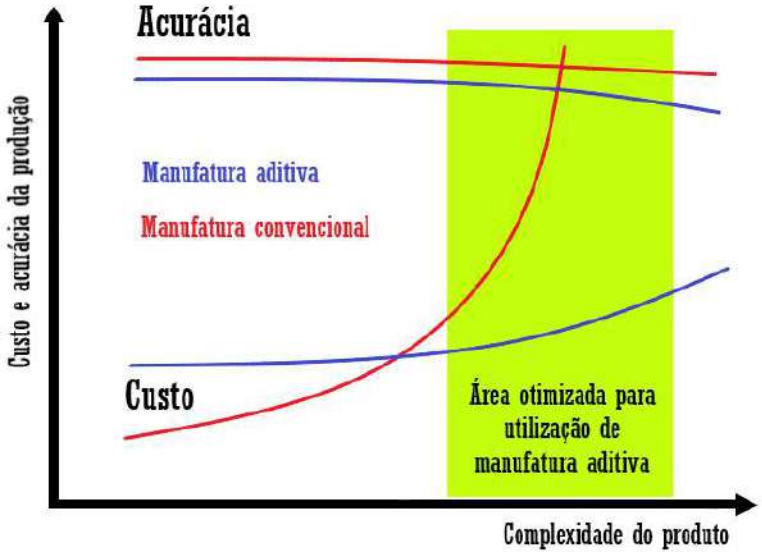


Figura 4: Relação custo acurácia da utilização da manufatura aditiva e convencional.
Fonte: Adaptado de GODEG, 2022

GIBSON (2021) considera 8 etapas principais para a fabricação em MA, sendo elas: ideia e montagem do produto no programa CAD; conversão do arquivo CAD para STL/AMF (formato mais utilizado); transferência do arquivo para a máquina de MA e configurações adicionais; preparação da máquina; construção do objeto; remoção e limpeza; pós-processamento; e aplicação.

As etapas da manufatura aditiva são divididas em quatro fatores a serem considerados: a fonte energética, o material utilizado, o processo de formação da camada e a geometria do produto final. Esses fatores interferem na qualidade do acabamento superficial da peça, assim como na sua precisão dimensional, propriedades e no tempo e custo de produção. Com essas etapas e fatores considerados o projeto do produto se concretiza, podendo ser comercializado e adaptado quando necessário de acordo com as tendências do mercado GODEC (2022).

Para GAO (2015) a consideração dos fatores se baseia na geometria da peça, seus materiais utilizados, ferramentas e interfaces computacionais e no desenvolvimento de etapas de MA. Seus estudos levaram a elaboração de um esquema de barreiras, desafios e perspectivas das linhas de pesquisa sobre o design do produto na MA, sendo representados na Figura 5 a seguir.

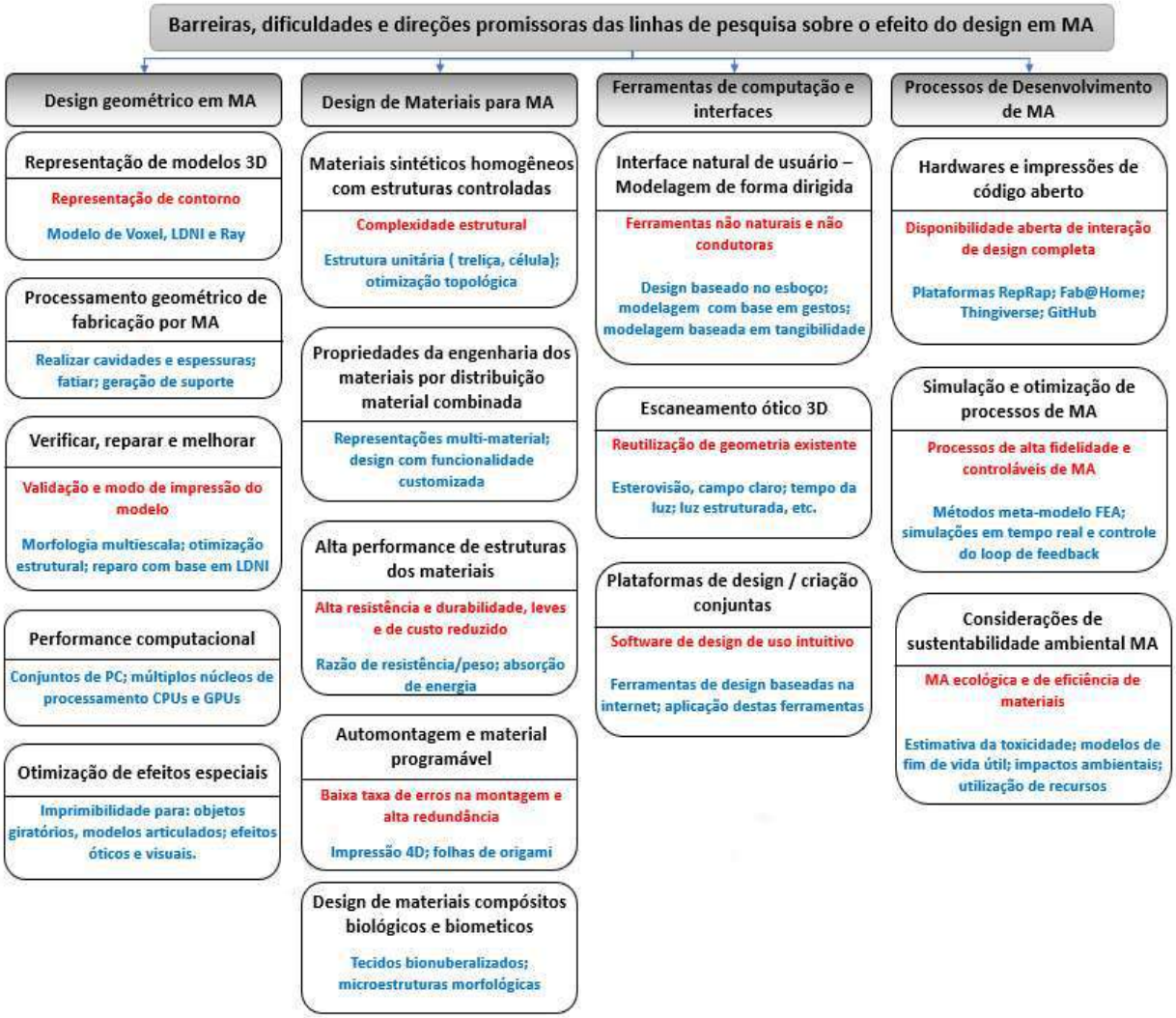


Figura 5: Esquema de barreiras, desafios e perspectivas dos fatores de MA.
Fonte: Adaptado de GAO, 2015.

A norma internacional ASTM F2792-12a define a existência de 7 (sete) categorias de tecnologias de MA, tanto para fins educacionais quanto de propostas de desenvolvimento. As classificações são: deposição de energia direcionada, extrusão de material, laminação de folhas, fusão de leito em pó, polimerização de cuba, jateamento de material e de aglutinante. Tal norma utiliza como documento de referência a ISO 10303-1:2021 de Integração de sistemas de automação industrial – Representação e troca de dados de produtos.

O processo de Deposição de Energia Direcionada (DED) também conhecido como Modelagem de Rede Projetada a Laser (*Laser Engineered Net Shaping* - LENS), recebeu atenção do mercado pela sua capacidade de imprimir peças utilizando qualquer liga de metal, principalmente aqueles com gradiente funcional. Um metal com gradiente

funcional é aquele no qual as propriedades do material mudam de acordo com a posição das partículas, podendo variar suas propriedades térmicas, mecânicas e químicas pela sua composição química ou microestrutura (KIEBACK, 2003).

O DED consiste no cruzamento de um feixe de energia que se cruza em um ponto focal com a deposição da matéria-prima, presentes em um ambiente com gás de proteção inerte, derretendo-a e formando poças de fusão. Existem variações do sistema DED baseados em alimentação em pó ou por arame, utilizando fontes energéticas (laser, elétron, plasma ou arco elétrico) ou energia cinética como fontes de calor provenientes do feixe de energia (DASS, 2019).

A alimentação em pó é a técnica mais utilizado para uso em metais, usando o laser como fonte de calor. Este fato se dá pela capacidade de revestir superfícies existentes e realizar a mistura de diversos tipos de pós, a fim de fabricar materiais diversificados. A técnica de arame, embora possua uma resolução inferior em comparação com o pó, possui uma maior taxa de deposição e a capacidade de construção de estruturas maiores, utilizando elétrons, plasma ou arco elétrico como fonte de aquecimento (DASS, 2019). A formação do processo pode ser visualizada na Figura 6.

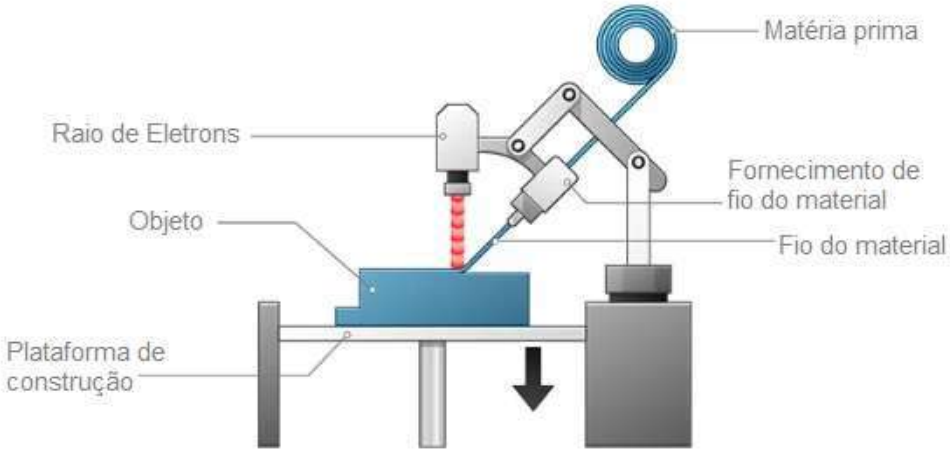


Figura 6: Representação do processo de DED.
Fonte: Adaptado DASSAULT Systems, 2023.

A definição fornecida pela norma ASTM 52900-15 classifica o processo de extrusão de material como a fabricação por deposição e extrusão de uma solução ou termoplástico, através de um bocal onde inclui o molde por deposição de material fundido (*Fused Deposition Modeling* – FDM). Extrusão é o processo de tratamento térmico com altas temperaturas e um curto espaço de tempo, onde combinando calor, trabalho e umidade, altera os formatos e composição das matérias-primas utilizadas na fabricação.

No FDM as peças são fabricadas por extrusão de um filamento fundido, possuindo no equipamento duas pequenas extrusoras, onde o material passa por um bocal aquecido até ser depositado em uma superfície. Uma vez esfriado, solidifica-se e realiza uma ligação camada a camada no material. Após a camada ser depositada, a superfície base se move para baixo, na mesma distância do próximo filamento a ser depositado, como apresentado o esquema na Figura 7 (SUN, 2008).

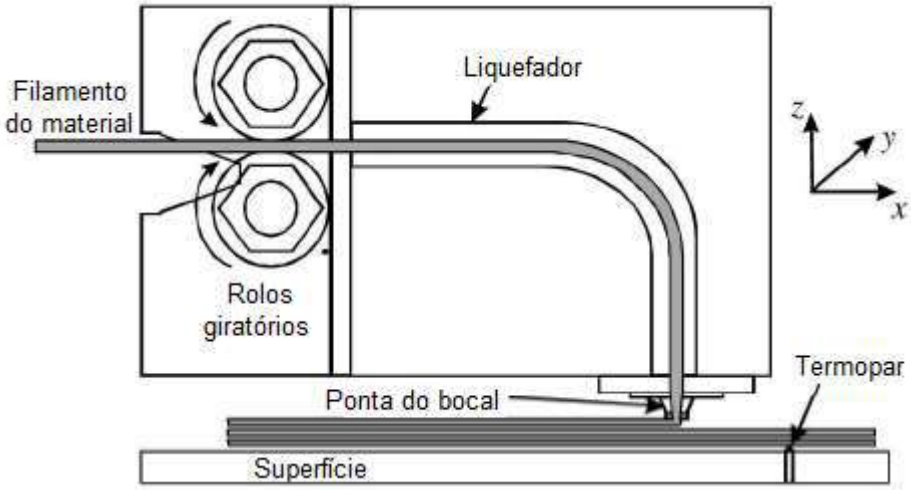


Figura 7: Representação do processo de FDM.
Fonte: Adaptado de SUN, 2008.

Uma característica importante do FDM é a possibilidade de fabricação com propriedades controladas de modo local, como a densidade e propriedades mecânicas. Para seu uso, é requerido o mínimo de mão-de-obra, sendo uma ferramenta voltada para a elaboração de protótipos. Para alcançar o estágio pleno de fabricação, são necessárias algumas melhorias como: elevação da qualidade das propriedades mecânicas da peça, a fim de manter a integridade durante o processo; aumentar a variedade do uso de materiais poliméricos; obtenção de resultados com melhores dimensões e tolerâncias e partes funcionais com melhoria na finalização superficial da peça (SUN, 2008).

O uso da laminação de folhas ou conhecido como fabricação de objetos laminados (*Laminated Object Manufacturing* – LOM), consiste na utilização de chapas metálicas, geralmente de alumínio, cobre e aço inoxidável como matéria-prima. Se utiliza uma fonte de calor localizada para unir as chapas, previamente cortadas, em uma peça com um máximo de precisão. Podendo ser utilizada como fonte de calor a energia ultrassônica ou laser, a consolidação ultrassônica é a técnica mais utilizada (ZHANG, 2018).

As chapas são unidas por difusão pela liberação das ondas ultrassônicas e pressão mecânica exercida sobre as mesmas, unindo-as camada por camada até formar o objeto 3D. Lembrando que esta junção por difusão se dá pela união das folhas por alta pressão, e não for fusão, uma vez que não se utilizando uma fonte de calor neste processo. Após a união, é realizado um polimento e corte opcional para consolidar um acabamento mais detalhado e limpo (ZHANG, 2018). O processo de LOM é apresentado na Figura 8.

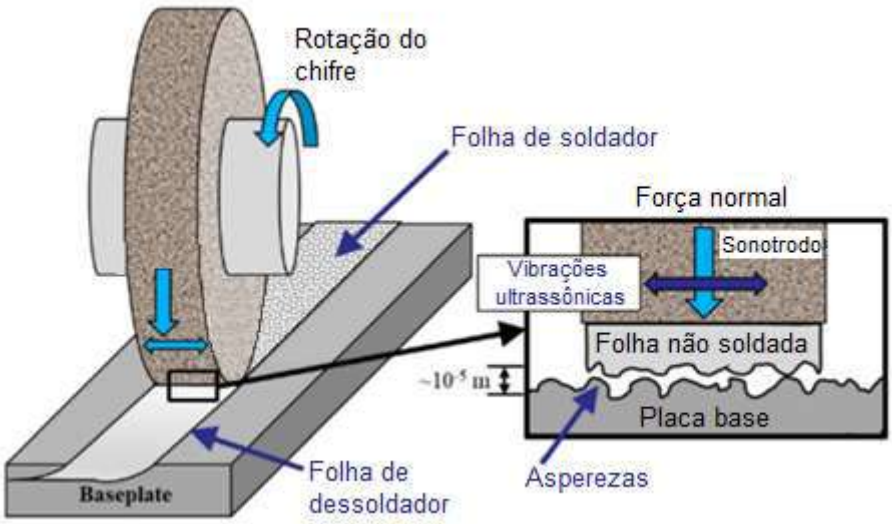


Figura 8: Representação do processo de LOM.
Fonte: Adaptado de AHN, 2021.

As chapas são empilhadas sobre uma base, onde um sonotrodo se move juntamente de um rolamento, cuja função é transferir a energia vibracional ultrassônica para a peça e aplicar pressão. A temperatura se eleva devido a fricção que ocorre com a força exercida, sendo resfriado as chapas a cada camada para reduzir quaisquer tensões residuais. As placas se moldam com este calor produzido da fricção, até se obter o produto, onde o mesmo é destacado da base e polido para um melhor acabamento superficial (ZHANG, 2018).

O processo de fusão de leito de pó, do inglês *Powder Bed Fusion* (PBF), utiliza pós metálicos os quais são depositados na superfície por um rolo de pressão, onde o pó é submisso a feixes de energia a laser (*Laser Beam Melting* – LBM) ou elétron *(Electron Beam Melting* – EBM), fundindo as partículas dos substratos metálicos e formando uma camada solida de pó fundido. Para finalizar as etapas, é resfriando a camada e se repete o processo com a próxima camada, apresentado na Figura 9 (HERZOG, 2016).

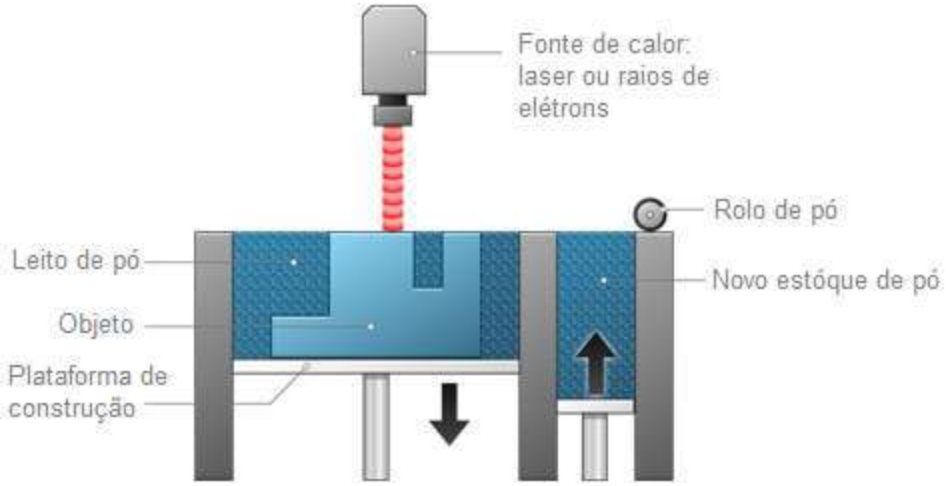


Figura 9: Representação do processo de fusão de leito em pó.
Fonte: Adaptado de Make3dexperience, 2023.

O aquecimento pelo LBM é mais utilizado pelas indústrias. O feixe é posicionado diretamente acima do pó, seguindo o plano x-y até a temperatura atingir a fusão do material. É realizado um pré-aquecimento do substrato, a fim de evitar o elevado nível te tensão residual na peça. Existem duas categorias de laser, a depender do material, sendo o método de sintetização direta a laser de metal (DMLS) para materiais metálicos e a sintetização seletiva a laser (SLS) para os demais materiais (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2023).

A impressão de peças neste processo é realizada em uma atmosfera com gases inertes ou no vácuo para evitar possíveis oxidações na peça. O processo era utilizado para polímeros, sendo adaptado para uso de peças metálicas. A fusão dos feixes de laser e elétrons são os utilizados em algumas impressões, onde a fusão por feixe EBM é o mais adotado dos processos devido à alta rigidez e resistência mecânica para a impressão no metal (HERZOG, 2016).

A fotopolimerização de cuba, conhecida do inglês como *VAT photopolymerization*, é um processo de no qual utiliza um liquido de resina onde se constrói o modelo da peça de camada a camada. Inicialmente a plataforma é rebaixada até a espessura da camada a ser impressa, seguindo com a cura realizada por um raio ultravioleta o qual enrijece a peça. Em alguns equipamentos uma lâmina se move entre as camadas, a fim de deixar a superfície lisa para a adição de uma nova camada. No fim do processo a cuba na qual a resina se encontra é drenada, e o objeto removido (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2023).

Segundo MEDELLIN (2019), existem duas configurações de sistema que podem ser utilizadas para a impressão de fotopolimerização, sendo elas com movimentação da plataforma de cima para baixo e de baixo para cima. Na abordagem de cima para baixo após a camada ser curada pelos raios UV, a plataforma se move para o fundo do tanque, permitindo o fluido seguir para a próxima camada.

Na abordagem de baixo para cima, a configuração funciona pela transparência no fundo do tanque, onde o processo de cura ocorre com a luz vindo por baixo e acertando a superfície. A plataforma se move para cima permitindo o preenchimento de mais camadas. As diferenças na escolha das configurações do sistema se dão pela abordagem de cima para baixo demandar mais material, e da de baixo para cima não ter tanta tensão na parte impressa devido a camada inferior não ser cortada após a cura das camadas MEDELLIN (2019). Na Figura 10 é apresentado o layout dos processos de cima para baixo (esquerda) e de baixo para cima (direita).

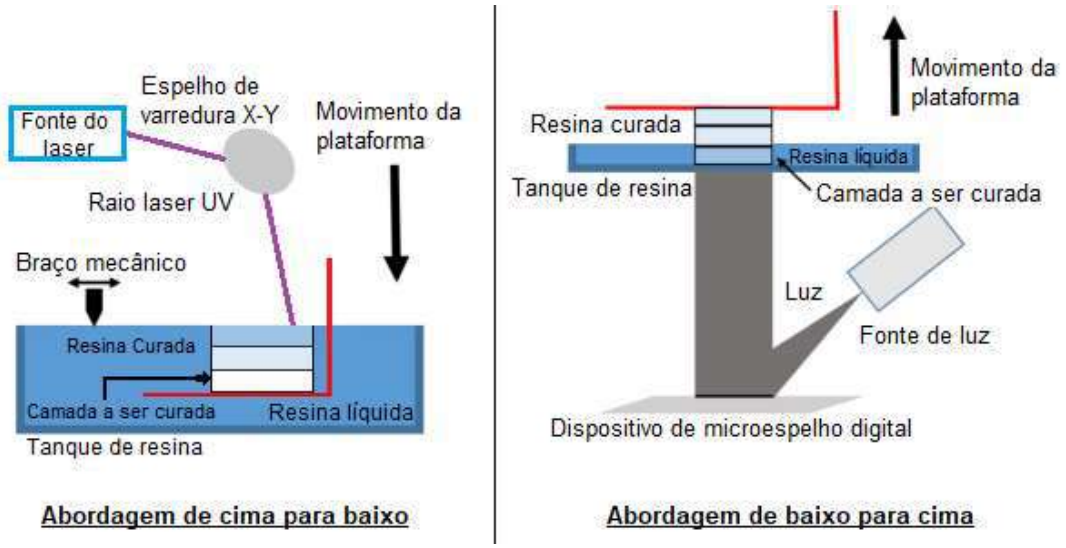


Figura 10: Representação do processo de fotopolimerização de cuba.
Fonte: Adaptado de MEDELLIN, 2019.

A utilização do processo de jateamento de material se baseia na impressão de peças através da deposição de gotas de fotopolímero liquido, assemelhando-se de maneira similar a uma impressora de jato de tinta. O material polimérico é armazenado em tanques de exclusão de ar, após um aquecimento, o mesmo é gotejado através de um bocal de impressão de piezo, formando uma fina camada na base de construção. Posteriormente, uma luz ultravioleta é emitida no material fundido na base para ser curado (GÜLCAN, 2021).

Posterior a etapa de cura, a plataforma base da construção da peça é rebaixada de acordo com a nova espessura a ser adicionada a camada anterior. As etapas são repetidas até a confecção total da peça, onde se finaliza o processo removendo as estruturas de suporte de gel do molde da peça. A remoção dessas estruturas pode ser utilizada ondas ultrassónicas (sonicação) em um banho de solução de hidróxido de sódio, uso de jatos de alta pressão d'água ou aquecimento (GÜLCAN, 2021). A representação do processo de jateamento de material se encontra na Figura 11.

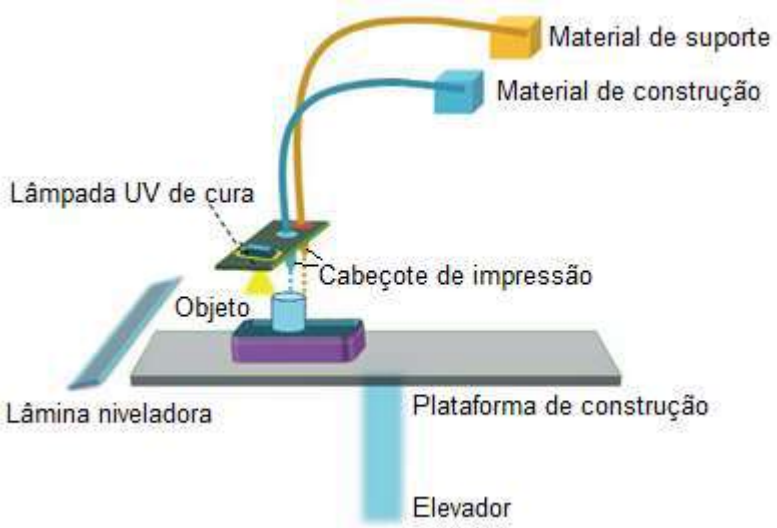


Figura 11: Representação do processo de jateamento de material.
Fonte: Adaptado de GÜLCAN, 2021.

Impressoras de jato de tinta 3D podem utilizar materiais poliméricos e cera devido a viscosidade natural e boa formação de gotas. A orientação da impressão é fundamental para determinar a precisão, qualidade e resistência da peça, onde se utiliza aquela que reduz o uso de material e tempo de construção por demanda, levando a negligenciar alguns parâmetros de impressão, como a posição da peça, limpeza do bocal, preparação da máquina e a própria orientação da impressão (YAP, 2017).

A união por jateamento de aglutinante se constitui na utilização de um líquido polimérico ligante em um leito de pó. Na primeira etapa de impressão o liquido é guiado para se infiltrar nas camadas do pó, agindo como um coagulante que uni o pó, a fim de formar a seção transversal das camadas. De um modo geral, quaisquer materiais que possam ser espalhados nesta forma e não possuindo caraterísticas hidrofóbicas, podem ser utilizados nesta tecnologia, como polímeros, cerâmicas, metais, areia de fundição, etc. (LI MING, 2020).

Na segunda etapa a peça é curada e desempoeirada para ser destacada e sintetizada, sendo colocadas em um ambiente térmico para melhorar a integridade mecânica. LI MING (2020) afirma que este processo não requer um ambiente a vácuo ou com a presença de gases de proteção inertes. O autor complementa o raciocínio ao dizer que a formação de baixa temperatura juntamente com os processos de consolidação tornam este processo mais adequado para a utilização de outros materiais.

Embora o aquecimento fortaleça a integridade da peça, devido a sua impressão ser pela união do pó ao liquido ligante, as mesmas podem não possuir requisitos de alta resistência mecânica, não se adequando para construções com foco em resistência estrutural. Na Figura 12 são apresentados os componentes do processo de jateamento de aglutinante.

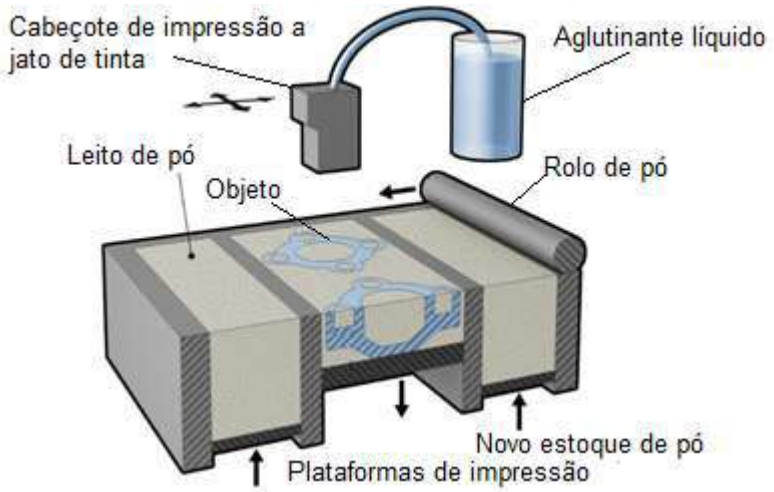


Figura 12: Representação do processo de jateamento de aglutinante.
Fonte: Adaptado de GÜLCAN, 2021.

GAO (2015) agrupa as categorias de MA por meio de uma visão geral das evoluções tecnológicas, e das análises de pesquisa segundo suas terminologias, baseadas na norma internacional ASTM. Suas vantagens e desvantagens, fontes de aquecimento e dos melhores materiais a serem utilizados, auxiliam na tomada de decisões a definir a melhor metodologia a se seguir para a peça desejada. O Quadro 3 a seguir foi adaptado para melhor visualizar essa divisão e definição das categorias descritas pela norma.

Terminologia	Materiais utilizados	Fonte energética	Vantagens	Desvantagens
Jateamento de Aglutinante	Cerâmica, metal em pó e polímeros	Térmica	Vasta seleção de materiais	Impressão de objetos coloridos, requer infiltração após peça pronta / alta porosidade na peça final.
Deposição de energia direcionada (DED)	Fusão de metal em pó	Feixe de laser	Impressão funcional de peças complexas / várias composições químicas do material	Reparo de peças, requer pós usinagem / baixa acurácia de impressão
Extrusão de material	Lama de cerâmica, metal em pasta, termoplásticos	Térmica	Equipamentos de baixo custo, flexibilidade de materiais	Limitação de resolução da peça, mau acabamento superficial
Jateamento de material	Fotopolímero / Cera	Térmica	Impressão de diversos materiais / alto acabamento superficial	Material de baixa resistência. / Requer pós processamento
Fusão de leito de pó	Pó metálico atomizado, pó cerâmico / poliamidas, polímeros	Feixe de laser de alta potência / Feixe de elétrons	Alta precisão e detalhes, peças completamente densas, alta rigidez e força, manuseio do pó e reciclagem	Possível surgimento de trincas devido ao tipo de material absorver diferente os feixes de energia
Laminação de folha	Folhas metálicas, fita cerâmica, filmes plásticos	Feixe de laser	Alto acabamento superficial, Baixo custo de material, processo e equipamento.	Possíveis trincas e fissuras na peça / presença de espaços vazios.
Polimerização de Cuba	Fotopolímero, cerâmicos	Feixe de laser ultravioleta	Alta velocidade de construção, boa resolução da peça, sobre cura e escaneamento em forma de linha	Alto custo para fornecedores e materiais / pode ser degradado quando exposto a muita luz solar / peças frágeis não adequadas para protótipos funcionais

Quadro 3: Categorias de manufaturas aditivas da norma ASTM F2792-10e
Fonte: Adaptado da norma ASTM F2792-10e, 2023 / GAO *et al*, 2015.

Considerando o presente estudo da utilização da Manufatura Aditiva de Arame e Arco, a mesma se encontra-se na terminologia de deposição de energia direcionada, voltada para impressão 3D ou reparo de peças metálicas. Seu processo funciona pela deposição de material camada por capada, se utilizando de um arco voltaico para a aquecer o material e do uso de um gás de proteção para evitar interferências do ambiente na soldagem e impressão.

A manufatura aditiva de arame e arco (MAAA) era conhecida como soldagem estrutural (*shape welding*) ou de forma. Em 1926 um cientista chamado Baker patenteou o uso de arco elétrico como uma fonte de geração de calor, a fim de produzir objetos a granel por pulverização de metal fundido nas camadas depositadas. Em 1983 Kussmaul utilizou tal soldagem para fabricar grandes peças de aço estrutural nuclear (20MnMoNi5 5) com alta resistência a peso. Em 1993 foi patenteada uma combinação de tecnologias de incremento de material utilizando fresagem em máquinas de CNC, posteriormente sendo utilizado pelos ingleses para a deposição de metais moldados e pelos alemães para a fabricação de componentes nucleares primários no final do século XX (KORZHYK, 2017).

Como descrito no tópico anterior sobre o processo DED, a MAAA é uma variação do DED, utilizando a combinação de arame como matéria-prima e fonte energética a base de arco elétrico. As combinações dos recursos com o método de aquecimento podem interferir tanto na criação do produto, quanto em sua manufatura. A utilização do arame e arco elétrico possui um potencial de fabricação de peças com maiores dimensões, resistência, menor custo e alta eficiência (SYED, 2006). O fio é inicialmente aquecido, depois sendo derretido e transferido para a poça de fusão, onde se solidifica nos limites da poça, e forma a peça projetada na deposição de camada a camada (JIN, 2020).

SYED (2006) comenta acerca da escolha do arame em relação ao pó metálico, devido à porosidade final da peça. Seu exemplo se deu pelo experimento de combinação do pó e do arame apresentando entre 20 – 30% menos porosidade na montagem das peças, mas nenhuma porosidade utilizando apenas o arame. Outro fator de relevância seria pelo custo do fio metálico ser de aproximadamente 10% do mesmo peso do pó metálico.

Existem métodos que acompanham o uso do MAAA, exemplo da transferência de metal a frio (*Cold Metal Transfer – CMT*) o qual a máquina detecta um curto circuito e retrai o material a fim de resfriar o arame, auxiliando no destacamento da gota. Outro bastante utilizado é o de soldagem de plasma (*Plasma Transferred Arc Welding - PTAW*) considerando-se uma evolução da soldagem de arame do gás tungstênio (GTAW), onde o arco queima entre o eletrodo resistente ao calor de tungstênio e o bico de plasma. Com isso, o gás é acelerado, acendendo o arco principal, onde o mesmo, queima entre o eletrodo e a peça trabalhada.

A utilização de robôs de soldagem na MAAA parte desde 1980, onde sua utilização inicial de soldagem dava conta da montagem de um grande volume de veículos. Suas características permitiram a adaptação para robôs de soldagem por arco, sendo mais barato e produtivo do que as máquinas a laser do DED. Seus sistemas podem variar nas dimensões máximas e mínimas da impressão de uma peça, sistemas de carregamento de material, resolução da espessura das camadas, utilização de braços robóticos para maleabilidade e fornecimento constante de arame na impressão, maior carga de peso depositado, etc. (JIN, 2020).

A composição de um sistema robótico na MAAA consiste na máquina de soldagem contendo a tocha de soldagem alimentando o material, sistema de posicionamento e base de fixação da peça, sensores, sistema de regulação de gás de proteção e o robô controlador em si. Suas fases de operação incluem a de preparação, onde o operador organiza e calibra os parâmetros, equipamentos e peças a serem soldadas, a fase de soldagem controlando o caminho da tocha para as posições necessárias e a fase de análise, onde se necessita de ajustes das primeiras duas fases.

Existe uma rotina à qual os robôs são submetidos, tendo as trajetórias de soldagem sendo programadas e armazenadas na memória do controlador do robô operante. Os comandos são enviados para os robôs reposicionarem a peça, adicionando graus de liberdade no sistema, e assim reiniciar o processo de impressão.

A estrutura de um robô engloba seu corpo principal interconectados por articulações (ligadas por juntas prismáticas ou rotativas), um manipulador que garante a mobilidade (caracterizado por um braço mecânico), um pulso para movimentos de precisão e um efetor (mão) para auxiliar no termino da impressão. Sua movimentação possui um grau de liberdade em cada junta, onde as prismáticas transladam entre os dois elos e as rotativas rotacionam entre os mesmos elos. A preferência das articulações rotativas é devido a sua confiabilidade e compacidade (SICILIANO, 2010).

O manipulador posiciona o pulso, o qual orienta a impressão até o efetor final. Os graus de liberdade das juntas, tipos de articulações e seus movimentos criam classificações dos braços mecânicos, onde existindo modelos de impressão cilíndricos, esféricos e SCARA (para geometrias especiais com duas juntas de revolução), os mais utilizados na indústria são o modelo cartesiano e articulado (antropomórfico) (SICILIANO, 2010).

O modelo cartesiano utiliza três juntas prismáticas cujos eixos são mutualmente ortogonais. Seus movimentos retilíneos permitem carregar mais carga dado seu custo, dispor de uma ótima rigidez mecânica, além de garantir uma excelente precisão no processo. Entretanto um fator limitante de seu sistema é de não possuir articulações rotativas, limitando grande parte de sua impressão. Tal arquitetura se assemelha a máquinas CNC utilizadas na MC de usinagem. Existem processos híbridos da utilização de ambas manufaturas com estes modelos robóticos. A Figura 13 representa um modelo cartesiano e uma variação do tipo GANTRY, sendo o destaque na utilização industrial.

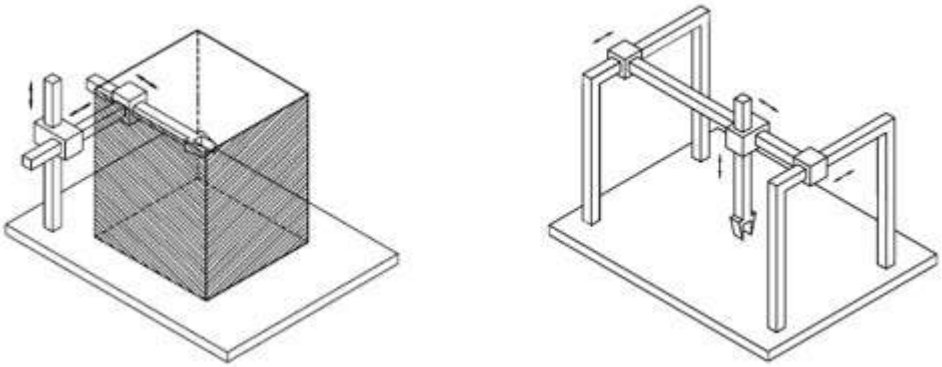


Figura 13: Modelos robóticos cartesianos. Padrão (esquerda) e GANTRY (direita).
Fonte: Adaptado de SICILIANO, 2010.

O modelo articulado, diferente do cartesiano, possui juntas rotativas com seus respectivos graus de liberdade. Para a soldagem, o robô antropomórfico (voltado para arquitetura esférica) se destaca devido a mobilidade semelhante à de um braço humano. Tal flexibilidade no posicionamento do robô permite maior liberdade para a montagem da peça, representado na Figura 14.

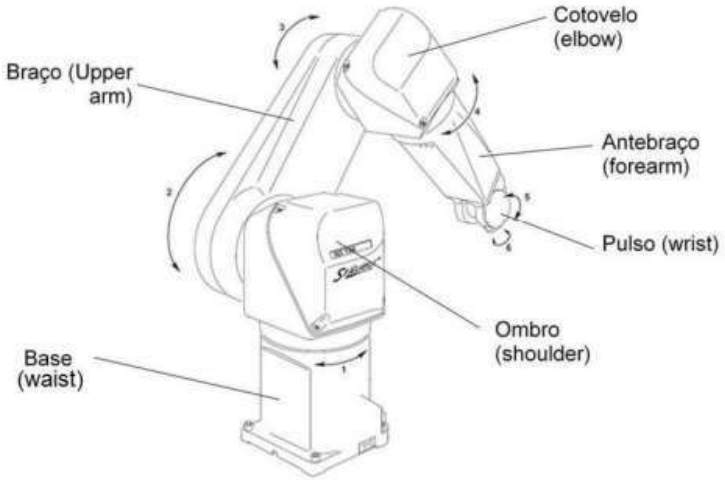


Figura 14: Modelo articulado do tipo esférico.
Fonte: STÄUBLI, 2010.

2.4 - Impactos ambientais das indústrias manufatureiras

É de senso comum compreender que impactos ambientais das indústrias envolvam a emissão de poluentes na atmosfera, geração de resíduos no solo e na água, interferência na fauna e flora local, etc. Entretanto, cada setor manufatureiro possui suas categorias próprias de impactos. Tendo esta visão como base, é conveniente compreender as interações entre os tipos de manufaturas nas categorias principais, sendo elas de recursos, energia, efluentes e saúde.

2.4.1 – Interações entre os tipos de manufatura

A escolha da manufatura subtrativas, formativa ou aditiva varia de acordo com a demanda, matéria-prima, custos e complexidade da peça. A subtrativa se utiliza de cortes e atrito para remover partes de um molde inicial do material, porém é limitada na formação de objetos prismáticos ou rotacionais, retirando a possibilidade de impressão complexa que a aditiva permite. A formativa aplica pressão e pode utilizar aquecimento para moldar uma peça em um molde pré-determinado, mas sem muito espaço para adaptação do modelo. Para a aditiva o processo se baseia no inverso da subtrativa, imprimido por deposição camada a camada o objeto físico, embora possa possuir baixa precisão. A Figura 15 representa visualmente as diferenças das manufaturas.

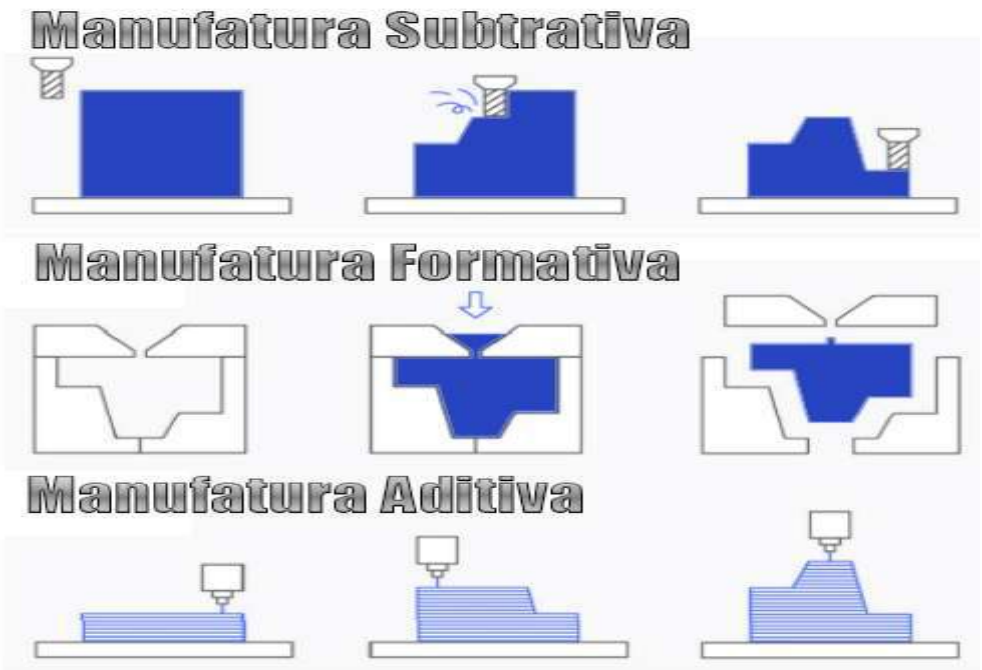


Figura 15: Comparação visual entre os tipos de manufatura.
Fonte: Adaptado de WILTGEN, 2022.

Os fatores de relevância para a escolha da manufatura se baseiam principalmente no custo por peça e da quantidade das mesmas a serem produzidas. Para uma peça simples em larga escala de produção a formativa é a melhor escolha, enquanto para maiores complexidades a aditiva é recomendada. A subtrativa funciona como um meio termo entre ambas, uma vez que a qualidade da peça também possui seu grau de relevância no processo.

O maquinário formativo e subtrativo é aplicado em larga escala nas indústrias, levando menos tempo para a confecção das peças, com um grau de detalhamento inferior ao aditivo. Em contrapartida, o aditivo realiza um trabalho mais detalhado, porém podendo ser mais custoso e demorado a depender do tipo e quantidade de impressões desejadas. A Figura 16 representa um gráfico de escolhas para a tomada de decisão das manufaturas, em relação ao seu custo por peça e sua respectiva quantidade.

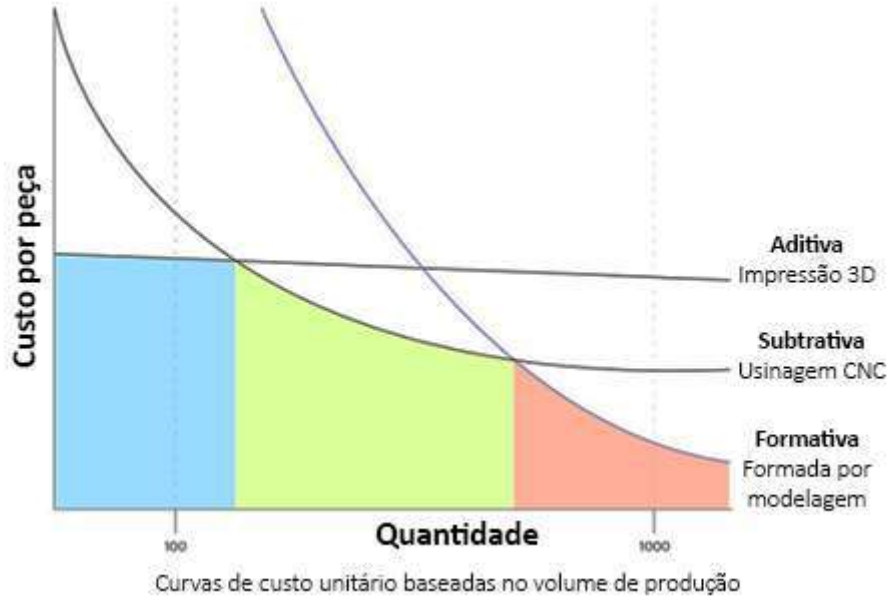


Figura 16: Comparação de escolha do uso nos tipos de manufatura.
Fonte: Adaptado de WILTGEN, 2022.

Uma tendência tecnológica convém mesclar os processos subtrativos e formativos com os aditivos em uma única plataforma a fim de garantir vantagens, conhecida como manufatura híbrida (MH). A integração das manufaturas possibilita a entrega dos produtos de uma geometria detalhada, além de fabricá-la em menor tempo. A combinação principal da MA com a MS é a mais utilizada, pois além dos diversos tipos de materiais que podem ser utilizados, facilitar a remanufatura e revestimento, possibilita o reparo das peças (FERIOTTI, 2022).

Um exemplo apresentado por FERIOTTI (2022) utiliza a combinação de usinagem para realizar a raspagem de um disco metálico danificado, onde posteriormente é realizada uma deposição por camada do processo de *Laser Metal Deposition* (LMD), concluindo com um pós-processamento e a recuperação total da peça. Mesmo que a MH necessite de duas máquinas para os processos aditivos e subtrativos, existem novos modelos de maquinários híbridos no mercado que utilizam múltiplos processos para a fabricação de peças metálicas. Ainda sim, existe a necessidade de outras máquinas complementares para pinturas, tratamentos térmicos e outros.

Para a formativa o modelo citado por WILTGEN (2022) considera um projeto de construir canais de refrigeração para os moldes mecânicos mais homogêneos e eficientes. O elevado tempo da etapa de resfriamento do molde pode ser contornado pela manufatura aditiva, construindo canais de resfriamento mais complexos, que abrangem uma área maior e reduz o ciclo de injeção plástica e acelera a produção.

FERIOTTI (2022) também conduziu um estudo sobre a relevância do tema de MH, coletando artigos no período entre 2017 até 2021. Utilizando dados da *Web of Science* para a pesquisa dos trabalhos acadêmicos, e mapeando os mesmos com o software *VOS viewer*, o número de autores e artigos foi crescente e alcançou seu pico de trabalhos publicados em 2021, contendo 26 artigos e 305 citações de 168 autores. A comprovação da junção da aditiva com a subtrativa ser um das mais utilizadas no mercado também se dá pela pesquisa identificar em sua maioria nos artigos e trabalhos, as palavras chave “aditiva híbrida” (*Hybrid Additive*).

As combinações dos processos visam maior redução do tempo de fabricação e melhora da qualidade do produto, mas o impacto negativo das manufaturas ainda representa um espaço aberto para melhorias e mitigações de seus efeitos. Devido a utilização de diversos equipamentos que utilizam gases, calor, recursos e uma elevada carga energética para suas atividades, devem ser listados os impactos específicos em cada setor, a fim de esclarecer os pontos que serão avaliados no inventário da análise de ciclo de vida das manufaturas.

2.4.2 – Impactos das manufaturas convencional e aditiva

Segundo a Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986, em seu artigo primeiro a definição de um impacto ambiental se dá por "*qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais*".

As atividades que são realizadas pelas manufaturas incluem o uso de recursos, tecnologias e mão-de-obra para confeccionar o produto desejado. Desse modo, existem impactos ambientais e sociais positivos e negativos evidentes, acerca dos processos de administração, produção e fabricação. Esses incluem o manejo da matéria-prima, custos energéticos dos maquinários e instalações, emissões atmosféricas a depender do combustível utilizado, possíveis despejos químicos em efluentes, questões sociais e de saúde ocupacional (REJESKI et al, 2018).

A fim de identificar as implicações ambientais das manufaturas, é necessário levar em consideração as variáveis aplicadas em um processo. A escolha do material (metais, cerâmicas, polímeros, compósitos, etc.), sua forma (sólida, folhas, pó, líquido e filamentos), energia utilizada, método, localização (espaço de fabricação, instalação industrial, carga de impressão) e necessidade de pós-processamento são barreiras para realizar uma avaliação completa da magnitude de seus impactos (FERIOTTI, 2022).

Uma interpretação social acerca da produção elevada de produtos manufaturados se dá pelo quesito de consumo da população. Com a crescente necessidade se se obter cada vez mais produtos, muitas vezes optando pela compra de um novo à reparação de um antigo, com a obsolescência acelerada de certos eletrodomésticos e consequentemente as peças fabricadas para os mesmos, o aumento das ações antrópicas e suas respectivas consequências no meio ambiente se encontram cada vez mais presentes e em maior escala de deterioração ambiental. Mesmo que o desenvolvimento sustentável seja de um interesse para uma tentativa de frear esta situação, o pensamento de mercado obscurece muitas vezes esta linha de pensamento.

2.4.2.1 – Recursos naturais

O uso eclético de diversos tipos de matérias-primas nas manufaturas, reforçam a escolha para se obter um potencial na eficiência dos materiais no ciclo de vida do produto. A MA possui eficiência superior aos processos convencionais, sem a necessidade de utilizar várias ferramentas na fabricação, além de reduzir o desperdício de materiais. Métodos de usinagem como fresamento e torneamento geram mais desperdícios, aparando um volume maior de um bloco inicial, em comparação a MA que ao imprimir necessita de um pós-processamento com geração residual inferior aos convencionais.

Os impactos no meio ambiente variam de acordo com o tipo de recurso utilizado. O descarte de metais pesados (cobre, manganês, chumbo, níquel, cobalto, etc.) podem causar intoxicações no ecossistema ao serem absorvidos pelos seres vivos e plantas, também vindo a colaborar com a acidificação do solo no qual são despejados. Outro impacto seriam os processos químicos da mineração, como minas de carvão que emitem arsênio e mineração do ouro ao utilizar mercúrio. Para indústrias de processamento de metais, as altas temperaturas, também vem a causar emissões de material particulado no ambiente, se dispersando por deposição seca ou úmida, levando a contaminação dos solos e água (SOUZA, 2018).

Para polímeros como polipropileno e polietileno (plástico) as consequências são evidentes e de conhecimento público. Processos de usinagem quando utilizam tal polímero podem gerar micropartículas de plástico, as quais são ingeridas por seres humanos e seres vivos, causando problemas de saúde. Esse material leva cerca de 450 anos para ser totalmente decomposto no ambiente. A utilização de bioplástico que possui um tempo menor de decomposição no ambiente vem se mostrando uma alternativa de interesse no mercado (ALVES, 2011).

O cimento (recurso para gerar concreto) em sua fabricação emite dióxido de carbono, sendo um dos principais poluentes atmosféricos causadores do efeito estufa. Assim como o silicone, ele não é considerado um produto biodegradável. Compósitos são uma alternativa ao concreto, sendo um material que possui no mínimo dois componentes com propriedades diferentes. Embora também venha a gerar uma pegada de carbono significativa, é menor em relação a produção do concreto em si. Sua estrutura química pode variar a carga dos impactos, podendo dificultar a reciclagem desses produtos, necessitando de maior energia e recursos para realizar a separação dos mesmos (MEDEIROS, 2016).

A utilização da MA reduz bastante o desperdício de matéria-prima, uma vez que suas etapas consistem na impressão 3D dos objetos, diferente da convencional que muitas vezes envolve cortes em blocos sólidos. Os resíduos derivados das matérias-primas podem ser reciclados e minimizados os impactos. A reciclagem possui maior vantagem na manufatura convencional devido a maior quantidade de resíduos produzidos, não descartando sua utilização na MA.

Fatores a serem considerados no consumo do material utilizado na MA implicam que nem todo material se encontra na etapa final do processo, e que parte da impressão da peça são de suportes para a mesma, onde são removidos ou dissolvidos manualmente, levando a uma perda de recursos (FERIOTTI, 2022).

Um exemplo de reutilização dos recursos na MA seria no processo de leito em pó, onde se reutiliza o pó metálico sintetizado com laser EBM. Um contraponto é devido a janela de tempo de realizar a reciclagem seja pequeno, devido a alteração da composição do metal e a deterioração de suas propriedades. Isso pode levar a uma perda de material deposto não sendo fundido, levando a uma perda na análise ambiental (FERIOTTI, 2022).

Um ponto levantado por REJESKI et al, (2018) comenta acerca da possibilidade de falha humana ou da própria máquina. Estes erros podem levar a impressão de uma peça com dimensões incorretas, sendo descartada totalmente e seu material tendo que passar por um processo de reciclagem, demandando energia e tendo uma porcentagem de material perdido. Em peças de polímero manufaturadas por MA, existe a reciclagem distribuída ou localizada de filamentos e peças residuais usando extrusoras. Uma consequência das tentativas de remanufatura de peças de fibra de carbono reforçadas com ácido poliláctico seria a maior deterioração e redução do desempenho em sua montagem.

A extração da matéria-prima bruta ou para sintetizar outros compostos, se encontram no estágio inicial dos processos de manufatura. Existe uma gama de impactos negativos que convém das práticas de extração, onde catalogar os impactos dependeria do estudo de todos os métodos de extração de cada material utilizado na MA e convencional. Existem medidas alternativas de reduzir os efeitos negativos no ambiente para cada método, porém seria necessário um estudo para cada um. Para a confecção deste estudo demandaria muito tempo, desviando-se dos objetivos estabelecidos, além de poder se tornar um estudo autônomo complementar do mesmo.

2.4.2.2 – Consumo energético

O consumo energético necessário para operar as maquinas e equipamentos das indústrias podem ser provenientes de fontes fósseis ou renováveis. O desafio da eficiência energética se consolida com as máquinas operarem em níveis variantes de energia, dependendo do material utilizado, da carga aplicada e do uso espacial. A MA possui o potencial de redução de desperdício de energia, principalmente por não necessitar o uso de demais equipamentos para as operações de impressão (BARROS, 2017).

Contudo, segundo uma citação de FERIOTTI (2022) dos autores MALSHE et al. (2017) é citado um exemplo sobre o consumo energético na MA não ser tão eficiente quanto certos métodos convencionais. No exemplo é dito que mesmo sendo apenas uma máquina é equipada com periféricos, levando ao consumo e tempo de processamento mais significativos.

A energia consumida está diretamente relacionada com o tempo de processamento da peça, ou seja, processos que são otimizados em sua rapidez, possuem tendências a demandarem menor consumo energético. A matéria-prima utilizada na manufatura aditiva pode vir a demandar mais energia pela sua composição química, sendo essa incorporada no processo de atomização. Um exemplo seria o método de fusão utilizando feixes de alta energia e com material pós-metálico, consumindo mais energia por unidade de produção que a manufatura convencional (REJESKI et al, 2018).

Na questão dos impactos ambientais vem a depender das fontes energéticas utilizadas pelo país. Países como Noruega, Nova Zelândia, Brasil, Colômbia, Canadá, etc. possuem a maior parte de sua matriz energética totalmente renovável. Embora os países como China, Estados Unidos e Japão possuam os maiores investimentos na geração de energias limpas, apesar de utilizarem as fontes fósseis para a produção de eletricidade (ENERDATA, 2025).

As consequências são visíveis pelas ações antrópicas sociais na natureza. O aquecimento global, queimadas provenientes do mesmo, extinção de espécies, acumulo de gases tóxicos na atmosfera, depleção da camada de ozônio, elevação dos períodos de secas, tempestades, derretimento das calotas polares, dentre outros fatores, são consequências diretas da escolha da utilização de combustíveis fósseis nos processos de manufatura, produção e geração energética do país (ENERDATA, 2025).

2.4.2.3 – Efluentes

O despejo de efluentes nos corpos hídricos é um indicador ambiental que possui consequências tanto no ecossistema marinho, quanto no meio ambiente que se utiliza destes recursos. Tais efluentes podem ser derivados de processos de fabricação de materiais mecânicos, componentes elétricos, confecção e tingimento de tecidos, produtos alimentícios, geração de energia elétrica (resfriamento de usinas nucleares por exemplo), dentre outros. A depender da manufatura e de seus respectivos materiais utilizados, processos e produtos, o impacto pode vir a ser diferente em sua composição física, química e biológica, tendo sua magnitude operando em diferentes níveis.

SELLITTO (2010) realizou uma modelagem para avaliação de um desempenho ambiental em operações de manufatura, onde utilizando bibliografias de outros autores, dados de ETE e ETA (Estação de Tratamento de Efluentes e Estação de Tratamento de Águas), além de seus próprios experimentos, identificou a importância dos indicadores dos poluentes e seus impactos respectivos para diversos modelos de operação. Utilizando os exemplos de fabricação de materiais elétricos, constatou que 13% dos impactos eram gerados por efluentes líquidos, voltados para os indicadores de processos gerais, trefilação e da utilização de caldeirões.

Para materiais mecânicos a importância foi de 25%, com indicadores derivados de esgoto residencial, óleos e graxas, emulsões oleosas e efluentes derivados de fosforização. Para operações têxteis com importância de aproximadamente 24%, obteve-se óleos hidráulicos e de cozinha, além de efluentes sanitários e de lavagem. Dentre estas e as demais categorias, os efluentes se encontraram entre os mais impactantes estudados.

Em processos de manufatura convencional a água é utilizada como um fluido dielétrico pelos tipos de eletroerosão. Sua funcionalidade serve para eliminar descargas elétricas, além de resfriar a área e remover detritos do material usinado, onde estes detritos podem conter partes metálicas ou poliméricas que venham a elevar a carga do despejo do efluente (SELLITTO, 2010).

Na manufatura aditiva para impressão de peças, processos que utilizem água para resfriamento ou operações diversas, em caldeiras, processos químicos e até mesmo limpeza, podem também acarretar metais pesados, materiais tóxicos ou compostos provenientes de emissões atmosféricas para elevar o impacto. Embora na manufatura aditiva os efeitos aparentam serem reduzidos, não podem deixar de serem analisados.

2.4.2.4 – Saúde ocupacional

Um ambiente de trabalho seguro e sadio é um direito fundamental para um trabalhador de qualquer quadro social e setor industrial. O entendimento da saúde ocupacional, assim como as técnicas convencionais de fabricação podem angariar maiores precauções para a saúde e segurança geral. Embora haja um grau de negligência por parte de empregadores nas indústrias, o conceito e questões de segurança do trabalho vem recebendo maior discussão no Brasil com o passar dos anos (CARDOSO, 2022).

Operações na MC com equipamentos que envolvam o manuseio de materiais submetidos a altas temperaturas e impacto podem causar lesões, queimaduras ou cortes, correndo o risco de incapacitar o funcionário. Visando a segurança do mesmo, a hierarquia de controle de riscos ocupacionais apresenta nesses casos que, isolar as pessoas do risco se trata da melhor alternativa de segurança cabível, seguido do uso do equipamento de proteção individual (NR-6). Considerando o ambiente da MA, pelo equipamento se encontrar isolado e sendo operado remotamente, os riscos físicos aos funcionários são mitigados, devendo sempre desligar os equipamentos para manutenções.

Outro fator de risco à saúde é voltado para a inalação de partículas finas e componentes tóxicos, dependendo do material utilizado e sua respectiva ficha química. A inalação de compostos metálicos em forjas tais como o ferro, chumbo e semelhantes a fuligem, podem causar problemas respiratórios e cardiovasculares, necessitando muitas vezes da internação dos trabalhadores. Para a MAAA, não existe riscos de contaminação ao se inalar o gás de proteção, muitas vezes por se utilizar a maioria do gás argônio.

Alguns processos na MA podem utilizar por exemplo polímeros de ABS (acrilonitrila butadieno estireno), sendo considerado como um composto orgânico volátil (COV) em certas ocasiões, onde sua exposição ao ser humano tem como consequências ao ser inalado: irritações na mucosa, náusea, sonolência, vertigem e vômito; em casos mais graves causando convulsões, tremores, eritema (manchas vermelhas na pele) e possivelmente o óbito (REJESKI et al, 2018 e CETESB, 2020). Entretanto, em doses controladas nas etapas de impressão, não apresentam grandes riscos à saúde.

A MAAA se apresenta como um processo com menor risco ao trabalhador, devido a sua automação proveniente da indústria 4.0. Embora não seja um tópico de grande relevância para o estudo, vale lembrar que trabalhadores que venham a ser incapacitados, atrasam as linhas de produção da MC, aumentando os custos e gerando riscos as pessoas.

2.5 – Poluentes atmosféricos

2.5.1 – Camadas da Atmosfera

A atmosfera é a camada gasosa que envolve o sistema terrestre, a qual retêm os gases a partir da força gravitacional. Sua existência garante a concepção de vida em um planeta, tendo como principais funções o equilíbrio da temperatura terrestre, filtro das emissões de raios ultravioletas (UV) provenientes do Sol, e opera como um escudo natural contra detritos espaciais (HARE, 1996).

Sua divisão se compõe de 5 (cinco) camadas, variando de acordo com a altitude e temperatura. Seguindo da camada mais externa até a superfície terrestre temos em sequência: exosfera, termosfera, mesosfera, estratosfera e troposfera. A exosfera representa o pseudolimite da atmosfera, onde este não pode ser definido com exatidão, devido a perda de densidade ao se afastar da superfície da Terra (AYOADE, 1996).

Na termosfera se encontra a região com maior nível de radiação solar, possuindo uma variação de temperatura entre 500º C a 2000º C. Seguindo com a mesosfera, com aproximadamente 30 km de comprimento, a sua temperatura varia entre 143º C até -3º C. A partir da estratosfera se encontra a camada de ozônio, responsável pela maior parte da absorção da radiação UV, com temperaturas de 0º C até -57º C. Por fim, a camada mais próxima da superfície sendo a troposfera, é a camada que ocorrem as questões relacionadas as mudanças climáticas. Possuindo, cerca de 18 km de espessura, ela possui uma estimativa de 75% da massa total atmosférica, devido aos efeitos da gravidade (GOULART, 2018).

A composição química dos gases troposféricos possuem em abundância o nitrogênio (N_2 ~ 78,084%), seguido do oxigênio (O_2 ~ 20,946%) e argônio (Ar ~ 0,934%) somando aproximadamente 99.96% de sua totalidade. Os 0.04% restantes, conhecidos como gases traços, são compostos de dióxido de carbono, hélio, hidrogênio, metano, dentre outros. Embora estes gases traços apresentem quantidades inferiores em relação aos troposféricos, estes participam em processos de ciclos biológicos e de controle da temperatura em uma faixa aceitável para abrigar vida (PRETTO, 2005).

2.5.2 – Características e definições dos poluentes

Segundo a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 491/2018, um poluente atmosférico é definido como *"... toda e qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna e flora; prejudicial ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade*".

A resolução apresenta os padrões de qualidade do ar, relacionando a intensidade das concentrações sobre os limites estabelecidos pelo Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR), definindo como primários e secundários. Os padrões primários se definem pelas concentrações de poluentes ultrapassados pelos limites, levando a impactos negativos diretos na saúde. Os secundários quando possuem seus limites ultrapassados, causarão efeitos mínimos adversos sobre o bem-estar público e ao ambiente.

A categorização de poluentes primários e secundários também e proposto pela Resolução CONAMA nº 491/2018. Os primários são emitidos diretamente das fontes, permanecendo na atmosfera em sua forma inicial por um período de tempo. Os principais poluentes são Materiais Particulados (MP), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Os poluentes secundários são formados através de reações químicas atmosféricas, provenientes das emissões primárias. Os principais poluentes secundários a serem citados são conhecidos como *smog* fotoquímico, material particulado inalável (MP_{10}) e fino ($MP_{2,5}$), dióxido de nitrogênio (NO_2) formado a partir do monóxido de nitrogênio (MO) e dióxido de enxofre, e oxidantes fotoquímicos em especial o ozônio troposférico (O_3) (GUIMARÃES, 2017).

As fontes emissoras são categorizadas como naturais ou antrópicas, sendo estacionárias ou móveis. As de origem natural são derivadas de atividades vulcânicas, queimadas repentinas, descargas elétricas, decomposição de matéria orgânica, etc., enquanto as antrópicas são de atividades humanas. Fontes pontuais são originadas de um ponto fixo, tais como indústrias, refinarias e siderúrgicas, enquanto os móveis são emitidos enquanto em movimento.

Uma subcategoria das fontes dos GEE seriam pontuais, fugitivas e evaporativas. As fontes pontuais são liberadas de pontos móveis ou fixos, como o escapamento veículos automotores, e chaminés de indústrias nesta ordem. Emissões fugitivas são liberadas por vazamentos aleatórios em válvulas, ductos, compressores, etc. As evaporativas ocorrem através da evaporação de compostos orgânicos voláteis, exemplo da evaporação de combustível em um armazenamento em postos de abastecimento ou de uma transportadora (QUINTANILHA, 2009).

Para algum vetor de emissão vir a causar danos colaterais na saúde e meio ambiente, deve-se considerar 3 etapas de identificação. Primeiramente sendo a análise da substância, definindo sua composição e propriedades. Em seguida identificar sua fonte de contaminação, componentes físico-químicos e toxidade. Por fim definir a exposição do vetor em relação ao tempo e frequência, monitorando suas possíveis vias de exposição. As consequências dos danos podem ser classificadas pelos seus efeitos de exposição única (agudos) ou constantes (crônicos); locais e a distância; reversíveis e irreversíveis; danos primários ou catalíticos de danos anteriores (SILVA, 2005).

2.5.2 – Poluentes regulados

São considerados poluentes regulados pela Resolução CONAMA nº 491/2018: materiais particulados inaláveis e partículas totais em suspensão (MP_{10}, $MP_{2,5}$ e PTS), fumaça, ozônio (O_3), monóxido de carbono (CO), Chumbo (Pb), dióxido de nitrogênio (NO_2) e de enxofre (SO_2). A inclusão do Chumbo se deu com a revogação da antiga Resolução CONAMA 03/1990, devido a adoção das normas internacionais o considerarem. Anteriormente este não era medido devido a se encontrar apenas em áreas específicas, ficando a cargo de ser monitorado a critério do órgão ambiental competente.

Os padrões de qualidade do ar do CONAMA se encontram no Anexo I da Resolução 491/2018, onde todos os poluentes são medidos em microgramas por metro cubico ($\mu g/m^3$), com exceção do monóxido de carbono, medido em partes por milhão (PPM). Cada poluente possui seus padrões iniciais e finais (PI – PF) que representam a melhoria gradativa da qualidade do ar e os valores finais de longo prazo, respectivamente. Esses valores são apresentados na Tabela 1.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 µg/m³	PI-2 µg/m³	PI-3 µg/m³	PF µg/m³	PPM
Material Particulado - MP_{10}	24 Horas	120	100	75	50	-
	Anual[1]	40	35	30	20	-
Material Particulado - $MP_{2,5}$	24 Horas	60	50	37	25	-
	Anual[1]	20	17	15	10	-
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 Horas	-	-	-	240	-
	Anual[4]	-	-	-	80	-
Dióxido de Enxofre - SO_2	24 Horas	125	50	30	20	-
	Anual[1]	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO_2	1 Hora[2]	260	240	220	200	-
	Anual[1]	60	50	45	40	-
Ozônio - O_3	8 Horas[3]	140	130	120	100	-
Fumaça	24 Horas	120	100	75	50	-
	Anual[1]	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	24 Horas	-	-	-	-	9
Chumbo – Pb[5]	Anual[1]	-	-	-	0,5	-

[1]Média aritmética anual / [2]Média horária /[3]Máxima média móvel obtida no dia /[4]Média geométrica anual / [5]Medido nas partículas totais em suspensão.

Tabela 1: Padrões de qualidade do ar dos poluentes regulados.
Fonte: Adaptado de CONAMA 491, 2018.

O conhecimento dos efeitos adversos dos poluentes legislados e regulados, permite uma melhor percepção acerca de suas medidas mitigadoras para que as empresas que os emitem possam tomar as medidas necessárias. Alguns desses poluentes também convém a causar efeitos na saúde e no meio ambiente, podendo se comportar como gases tóxicos, asfixiantes ou até mesmo inflamáveis, a depender de suas concentrações em locais fechados.

2.5.2.1 – Monóxido de Carbono (CO)

Este é um gás extremamente tóxico, incolor, inodoro e insípido, permanecendo por longos períodos na atmosfera quando emitido normalmente. Sua emissão se dá através de combustões incompletas, atividades vulcânicas, descargas elétricas e gás natural, usinas termelétricas a carvão, sistemas de aquecimento, queima de biomassa e tabaco. Sua formação também pode vir a ocorrer pela oxidação fotoquímica de COV presentes na atmosfera durante o dia (GUIMARÃES, 2017).

Dos efeitos na saúde, a via respiratória é a porta de entrada para a exposição ao poluente, onde sua intoxicação pode ser fatal. Isso se dá pelo efeito de impedir o transporte do oxigênio no sangue, causando hipoxia tecidual (condição onde os tecidos não são oxigenados adequadamente por obstruções ou falta de O_2). Outros efeitos adversos podem incluir tonturas, sonolência, dores de cabeça e agravamento de doenças cardíacas (CETESB, 2025).

2.5.2.2 – Ozônio troposférico (O_3)

O ozônio encontrado na estratosfera não é considerado um poluente, na realidade sua atuação é vital para filtrar os raios UV que chegam à superfície terrestre. O ozônio troposférico é gerado a partir das reações de NO_x e COV, na presença de luz solar, gerando oxidantes fotoquímicos, dentre eles o ozônio troposférico. (QUINTANILHA, 2009).

As misturas destes poluentes secundários na troposfera, age de modo prejudicial para a saúde, podendo reduzir a função pulmonar, irritação nos olhos e agravamento de problemas respiratórios tais como asma, enfisema e bronquite. Outra consequência seria devido ao alto poder oxidativo do ozônio poder causar danos nas espécies vegetais nativas e agrícolas, penetrando nas folhas e prejudicando o processo de fotossíntese. (CETESB, 2025).

2.5.2.3 – Dióxido de enxofre (SO_2)

Diferente do CO embora seja incolor, apresenta um forte odor incomodo, sendo considerado tóxico e se tornando irritante quando em contato com a umidade do ambiente. Este é formado por gases vulcânicos e fontes antropogênicas, exemplo de emissões veiculares, produção de fertilizantes, produção de eletricidade, fundição de alumínio e por meio de indústrias cujos processos incluam compostos de enxofre (CETESB, 2025).

Seus impactos negativos ocorrem pela formação da deposição ácida, além de ser um dos precursores dos sulfatos (um dos componentes das partículas inaláveis – MP_{10}). Gera corrosão em edificações, metais, condutores elétricos e acidifica o pH do solo. O *smog* industrial causa danos foliares nas plantas, e interfere no crescimento das mesmas. Implicações à saúde, a via inalatória é a responsável pela entrada do poluente. Existe a possibilidade de ocorrer irritações nas mucosas dos olhos, agravamento da asma, doenças respiratórias (exemplo de bronquite e enfisema) e doenças do coração (CETESB, 2025).

2.5.2.4 – Dióxido de nitrogênio (NO_2)

Sua formação se dá pela exposição a luz solar do óxido de nitrogênio (NO), gerando o NO_2 na atmosfera, onde este possui uma grande participação formação de oxidantes como o ozônio. A meteorologia influencia na concentração do composto, considerando a temperatura do ambiente, velocidade dos ventos, episódios de inversão térmica, dentre outros. As emissões naturais do NO_2 ocorrem pelas transformações microbianas no solo e decorrência de descargas elétricas na atmosfera. As emissões antropogênicas se dão por processos de usinas termelétricas e siderúrgicas, queimadas, veículos automotores e motores de combustão interna (CÓNSUL, 2004).

Usado como agente oxidante em motores de foguetes, propelente em aerossol, otimizador de queima de combustíveis em motores (nitro) além de anestésico, conhecido como gás hilariante, seus efeitos para o aquecimento global são em torno de 300 vezes mais eficientes que o CO_2 (MACHADO, 2005).

Os efeitos no ambiente ocorrem quando o NO_2 é oxidado na atmosfera, produzindo o ácido nítrico (HNO_3), onde este eleva a acidez presente na água da chuva, colaborando para os efeitos corrosivos da deposição ácida. As consequências para a saúde se dão pelo NO_2 ser um gás tóxico. Quando em contato superficial com o ser humano, os efeitos adversos incluem ardência nos olhos, nariz e mucosas em geral. Quando inalado provoca lesões nos revestimentos das células, ocorrendo inflamações no sistema respiratório e degeneração celular. Em casos graves, pode causar edemas pulmonares, hemorragias dos alvéolos, insuficiência respiratória e óbito (CÓNSUL, 2004).

2.5.2.5 – Material Particulado (MP)

O material particulado é um grupo de mistura de partículas suspensas no ar, derivado de compostos orgânicos e inorgânicos. Em sua composição encontram-se poeiras, fumaça, fuligem, sujidades e gotículas que se mantem no ar devido ao seu tamanho, segundo o CONAMA 419 de 2018.

VALLERO (2014) discuti sobre a classificação do MP pela química e propriedades físicas. Denominações como fumos, fuligem, fumaça, névoa, neblina e poeira, estas possuem diferentes composições, acarretando em tamanhos e propriedades diferentes em suas formações. Dentre as denominações citadas pelo autor, névoa e neblina

são consideradas as partículas higroscopias (contendo líquidos), em relação as demais sólidas. Vale ressaltar que uma parcela presente no MP pode ser orgânica, onde está é complexa de ser caracterizada, devido a milhares de compostos orgânicos presentes. Suas fontes de emissões naturais tendem a possuir de maioria material particulado grosso, sendo exaladas pelo pólen, poeira do solo, spray marinho e intensas atividades vulcânicas.

Os impactos negativos no ambiente levam a acidificação de recursos hídricos, esgotamento de nutrientes do solo e danos respiratórios na fauna nativa. Em relação aos impactos na saúde, quanto mais fina uma partícula, maior a chance de inalação pelas vias aéreas até chegar aos alvéolos pulmonares. O MP gera maior incidência de ataques cardíacos, asma agravada, bronquites crônicas, irritações nas vias respiratórias e nas mucosas dos olhos, redução de visibilidade devido a fuligem. Algumas partículas podem adentra à corrente sanguínea causando sérios riscos à saúde. Geralmente estas partículas estão na faixa de 10 a 2,5 μm, conhecidas como MP_{10} e $MP_{2,5}$ (US.EPA, 2012).

2.6 – Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

O crescimento da conscientização ambiental gera como consequência a importância da aplicação do desenvolvimento sustentável, e da revisão dos impactos ambientais negativos de certos serviços de fabricação e consumo. Para mitigar tais preocupações e visualizar uma tomada de decisão sobre processos e suas possíveis comparações mitigadoras, foi elaborado uma abordagem de estudo do ciclo de vida. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) começou a ser uma ferramenta para tal objetivo.

As primeiras avaliações de ciclo de vida foram realizadas na década de 1960, uma vez que o tópico da crise petroleira sobre a limitação da extração dos recursos naturais fósseis foi questionado. O consumo energético, balanço de massa e energia, utilização de matéria-prima e por fim sobre a geração de resíduos sólidos eram os principais pontos de estudo em uma ACV da época. O nome dado aos analistas as tais avaliações se davam como “análise de recursos e perfil ambiental” (HAUSCHILD, 2018).

Mesmo com seu interesse enfraquecendo devido a posterior crise do petróleo, por volta de 1980 foi alavancado devido à preocupação com o meio ambiente. Em 1990 vieram normas que proporcionaram maior entendimento, complementação e uma padronização da realização dessas ACV. As séries de normas da família ISO 14040 levaram a adoção de mais estudos de processos dentro de empresas e indústrias, tendo suas próprias metodologias, publicações e importância que são compartilhadas com a comunidade (COLTRO, 2007).

Segundo a norma ISO 14040, uma ACV é definida como uma ferramenta de avaliação dos potenciais impactos ambientais e recursos utilizados em todo o processo de produção de um produto, desde a extração do material até seu descarte. Suas funcionalidades se estendem para identificar oportunidades de melhoria das etapas do ciclo de vida do produto, onde a informação relatada através da coleta de dados será utilizada para tomadas de decisão das empresas, baseados nos indicadores de desempenho ambientais relevantes.

A norma cita a ideia da “propaganda verde” com aspectos ambientais que podem ser realizados pela empresa, gerando um esquema de rotulagem ou reinvindicação ambiental. Esta propaganda pode ser incentivada pelo governo, a fim de reduzir a pegada de carbono, gastos de energia, descartes indevidos de matéria prima, dentre outros impactos negativos no meio ambiente.

A norma ISO 14040 foi internalizada no Brasil em 2001, realizada pela ABNT. A família das normas ISO 14040 abrange as etapas de uma ACV, onde houve revisões e substituições pelas normas 14040 e 14044. A fim de padronizar as ACV, as normas 14041, 14042 e 14043 foram integradas na 14044, visando a atualização dos processos de avaliação e gestão ambiental. No Quadro 4 se observa as normas atuantes e suas respectivas áreas de aplicação.

NORMA ISO	Nome	Ano	Status
14040	Princípios e estrutura	2014	Atualizada
14041	Definição de metas e escopo e análise de inventário	2004	Substituída pela 14044
14042	Avaliação do impacto do ciclo de vida	2004	Substituída pela 14044
14043	Interpretação do ciclo de vida	2005	Substituída pela 14044
14044	Requisitos e Diretrizes	2014	Atualizada
14045	Avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto - Princípios, requisitos e orientações	2014	Atualizada
14046	Pegada hídrica — Princípios, requisitos e diretrizes	2017	Atualizada
14047	Examples of application of ISO 14042	2016	Atualizada
14048	Formato de documentação de dados	2002	Atualizada
14049	Exemplos de aplicação da ISO 14041 para definição de metas e escopo e análise de inventário	2014	Atualizada

Quadro 4: Normas da família 14040.
Fonte: Adaptado de COLTRO, 2007.

Para se realizar um estudo de ACV, segue-se uma estrutura dívida em quatro fases. A primeira é definida pelos objetivos e escopo, onde se comenta sobre as fronteiras do sistema, estimativas, métodos de alocação, unidade funcional, limitações e informações acerca do produto ou sistema. A unidade funcional opera como uma referência quantitativa das entradas e saídas que serão analisadas na fase seguinte. Um exemplo seria a proporção da massa do metal para dois processos de manufaturas comparados.

Seguindo para a fase de Análise do Inventário, são estudadas as entradas e saídas do sistema do produto, e quantificando os dados relevantes. Um fluxograma do sistema é elaborado a fim de definir suas fronteiras técnicas e variáveis. Nesta fase, é realizado um levantamento de dados, considerando no sistema o consumo energético, utilização de recursos naturais, emissões para a terra, água e ar. As categorias de impacto e fronteiras são definidas, levando em conta os resultados ponderados pela unidade funcional. A origem e qualidade dos dados são definidas como primários, gerados a partir de experimentos, extraídos de sistemas ou cálculos ou secundários, sendo retirados de bibliografias ou bancos de dados.

A próxima fase é a de Avaliação de Impacto, onde se correlaciona os dados analisados do inventário com impactos positivos ou negativos na toxidade humana ou do ambiente, no solo, corpos hídricos, atmosfera, etc. Para realizar tal avaliação, se utilizam de programas que realizam os cálculos necessários para identificar os impactos e atribuir as categorias aos seus graus de importância, se relacionando com as fronteiras do sistema.

Existem etapas opcionais que podem ser utilizados na avaliação de impacto ambiental, sendo elas: 1) normalização, relacionando os impactos do produto aos da quantidade total, utilizando um valor de referência para realizar o cálculo da magnitude dos resultados; 2) ponderação, tendo cada categoria de impacto ambiental atribuída a uma mesma base, convertendo os resultados por fatores numéricos; 3) agregação, agrupando e hierarquizando as categorias em uma mesma unidade. Essas etapas não são recomendadas para o Brasil, uma vez que seus modelos são voltados para o internacional, levando ao indicador das categorias serem modelados até o *Midpoint* (COLTRO, 2007).

Finalizada as etapas anteriores, os dados obtidos são interpretados relacionando-os aos objetivos e escopo do estudo. A qualidade dos mesmos é baseada em relação ao período de tempo, área geográfica, tecnologias abordadas, consistência, precisão, correlação com possíveis incertezas e reprodutibilidade dos métodos.

A fim de garantir uma maior confiabilidade do estudo, uma análise de sensibilidade deve ser realizada, onde é feito um estudo dos dados falhos, duvidosos e/ou estimados sobre os resultados encontrados. Esta análise é recomendada, uma vez que as fontes bibliográficas estejam atualizadas e que os experimentos realizados sejam feitos dentro de normas e protocolos específicos.

Os resultados obtidos através das etapas anteriores, leva a uma seleção de opções para determinar as quais apresentam maior qualidade e geram menos impactos no ambiente. A identificação de pontos críticos leva a tomadas de decisões que visam a eficiência energética, menor carga de poluentes gerados, menos custos de fabricação e produção, etc. Todos as informações mencionadas para se montar uma estrutura de uma ACV se encontram nas normas ISO 14040 e 14044, podendo novamente ser reproduzida por quaisquer empresas. Na Figura 17 é apresentado um modelo de fluxograma, o qual relaciona todas as etapas descritas de uma ACV.

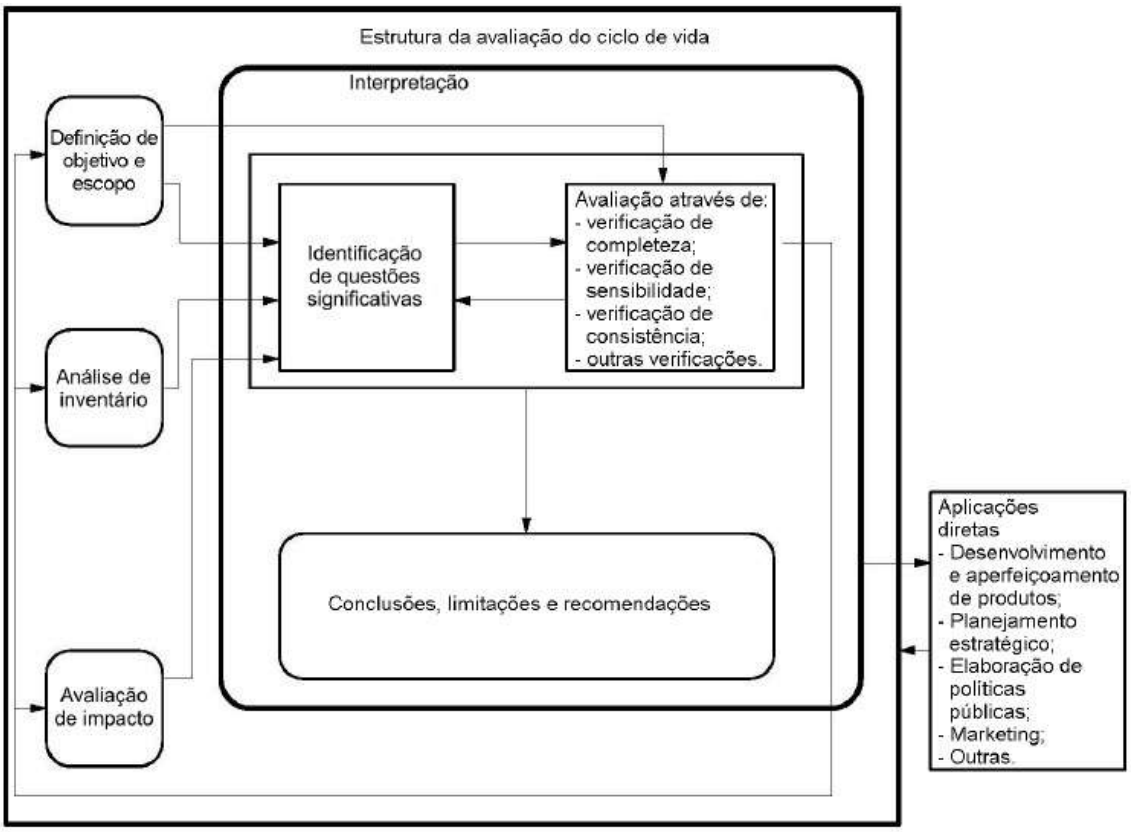


Figura 17: Relacionamento das etapas de uma ACV.
Fonte: ABNT ISO 14044, 2014.

2.6.1 Métodos de ACV

Existem diversas metodologias que podem ser utilizadas para se analisar um ciclo de vida. Suas funcionalidades se adaptam de acordo com o objetivo, fronteiras do sistema e níveis de avaliação dos temas abordados. Com os objetivos escolhidos, segue-se para definir a fronteira do sistema, onde ela pode ser do Berço ao Túmulo, Berço ao Portão e Portão ao Túmulo.

A fronteira do Berço ao Túmulo se dá pela análise da extração do material, preparação do produto e produção, até a etapa de transporte, uso e descarte. A fronteira do Berço ao Portão delimita o ciclo até as fases de produção, excluindo as etapas de transporte, uso e descarte. Por fim, a fronteira do Portão ao Túmulo possui o foco na produção até seu descarte. Para facilitar a visualização das possíveis fronteiras, a Figura 18 apresenta um esquema dos pontos citados.

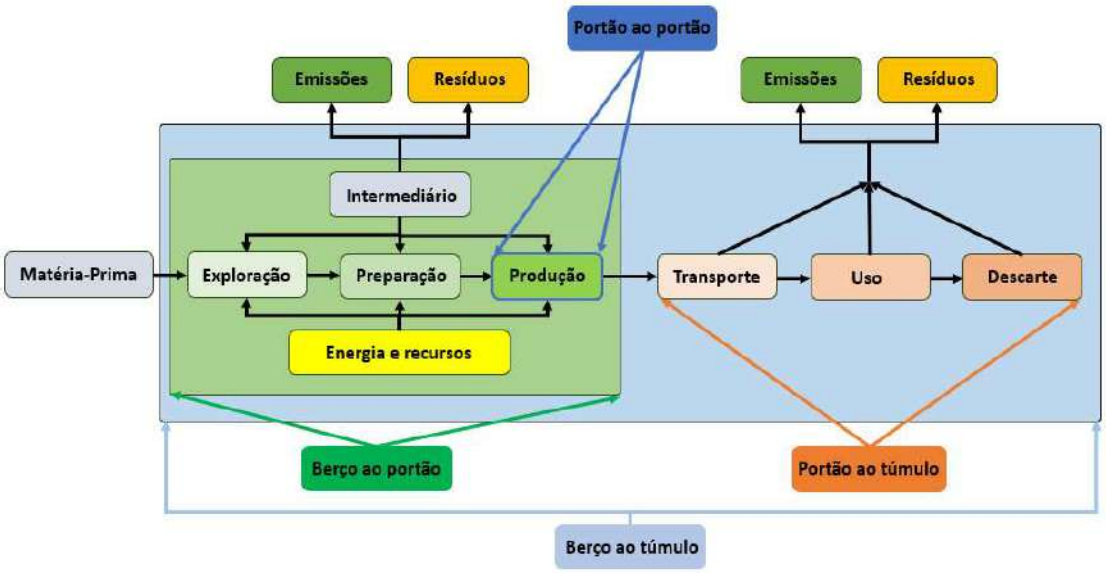


Figura 18: Fronteiras do sistema de uma AICV.
Fonte: Baseado na ABNT ISO 14044, 2014.

Os níveis de avaliação de impactos, como citados no tópico anterior, são categorizados como *midpoint* e *endpoint*. O *midpoint* se caracteriza pela ocorrência ao longo do mecanismo ambiental, antes de alcançar o ponto final da categoria, enquanto o *endpoint* considera o mecanismo ambiental, se referindo a um dano específico de uma área mais abrangente. Esta área pode ser voltada para ambiente natural, recursos naturais ou saúde humana (MENDES, 2013).

Os métodos possuem sua importância para determinados tipos de projetos, tendo suas características baseadas em propriedades físico-químicas na avaliação do inventário. Estes realizam, juntamente com os softwares, os cálculos de impactos no final da avaliação do inventário do ciclo de vida. Alguns exemplos de métodos seriam: ECO-INDICATOR 99, EPS 2000, CML 2002, IMPACT 2002, EDIP 2003, TRACI, LIME, RECIPE 2016, etc. Com um crescente número de métodos, a escolha novamente se relaciona com o tipo de projeto a ser estudado (HAUSCHILD, 2018).

Um dos mais utilizados atualmente é o RECIPE, provendo uma harmonização das características dos níveis de avaliação *midpoint* e *endpoint*. Criado em 2008 e atualizado em 2016, seus fluxos e bibliotecas tendem a representar fatores voltados para uma escala global em vez de apenas dados europeus, enquanto mantém a possibilidade das categorias de impacto se implementarem em escala nacional e continental (HUIJBREGTS, 2016).

O RECIPE possui em sua avaliação do nível *midpoint* 18 categorias de impacto, levando a 9 categorias de danos principais e finalizando com 3 categorias nível *endpoint*. A Figura 19 apresenta a relação entre os níveis citados e suas categorias.

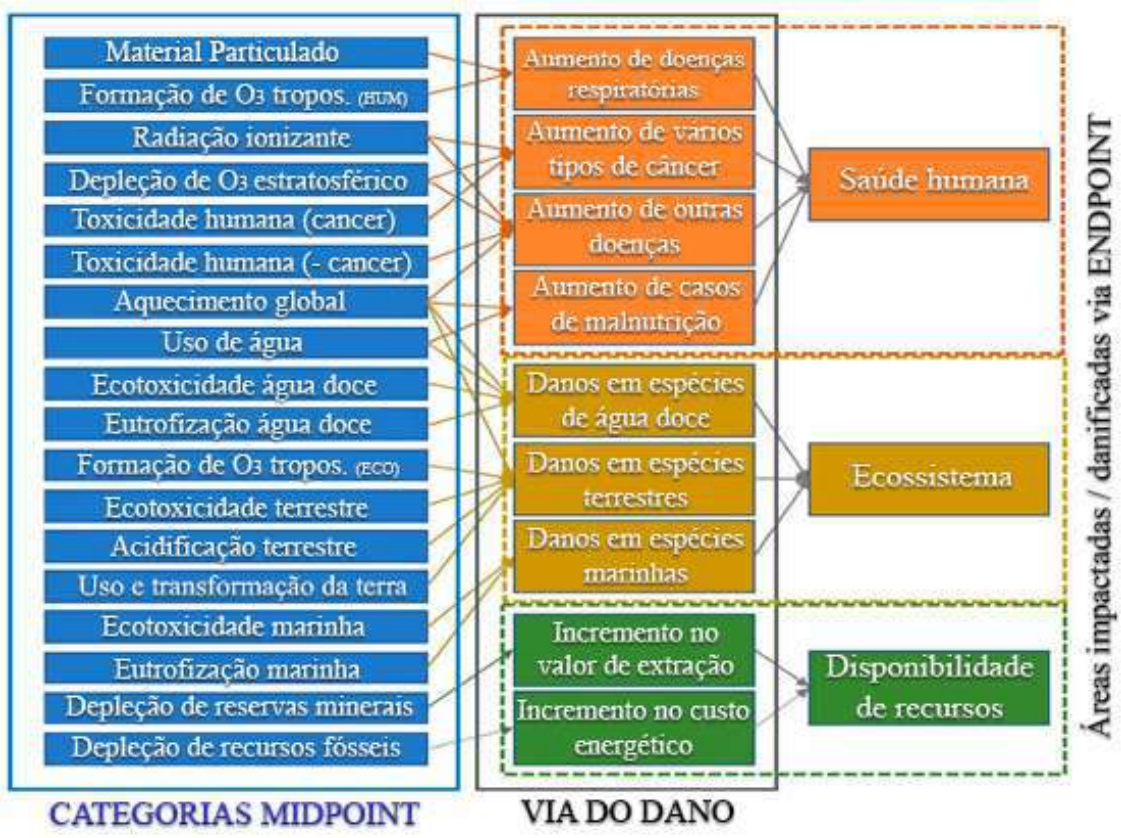


Figura 19: Categorias de impacto do RECIPE.
Fonte: Adaptado de HUIJBREGTS, 2016.

As categorias de impacto possuem análises acerca de pontos específicos nos processos, assim como unidades físico-químicas e dos resultados do indicador (impacto). O Quadro 5 apresenta as 18 categorias de avaliação dos impactos ambientais do RECIPE e suas características. Os tipos de formação de ozônio troposférico, assim como a toxicidade humana, foram mesclados nas respectivas categorias.

Categoria de impacto	Indicador	Unidade físico-química	Unidade de impacto	Fator de caracterização	Sigla
Mudanças climáticas	Forçamento radioativo infravermelho	W x yr/m^2	Kg CO_2 para o ar	Potencial de aquecimento global	GWP
Depleção de ozônio estratosférico	Concentração de ozônio estratosférico	Ppt x yr	Kg CFC-11 para o ar	Potencial de depleção de ozônio	ODP
Acidificação terrestre	Saturação base do solo	Yr x m^2 x mol/l	Kg SO_2 para o ar	Potencial de acidificação terrestre	TAP
Eutrofização de água doce	Incremento de fósforo na água doce	Yr x m^3	Kg P para água doce	Potencial de eutrofização de água doce	FEP
Eutrofização marinha	Incremento de nitrogênio na água marinha	Yr x m^3	Kg N para água marinha	Potencial de eutrofização de água marinha	MEP
Toxicidade humana	Incremento do risco de doenças	-	Kg 1,4-DCB para ar urbano	Potencial de toxicidade humana	HTP
Formação de oxidante fotoquímico	Aumento do ozônio troposférico	Kg para saúde humana / ppb x yr para qualidade de ecossistemas	Kg NOx para o ar	Potencial de formação de oxidante fotoquímico: humanos	HOFP (humanos) / EOFP (ecossistemas)
Formação de material particulado	Aumento da ingestão de MP 2.5 pela população	Kg	Kg MP 2.5 para o ar	Potencial de formação de material particulado	PMFP
Eco toxidade terrestre	Aumento ponderado pelo perigo em solos naturais	Yr x m^2	Kg 1,4-DCB para solo industrial	Potencial de Eco toxidade terrestre	TETP

Quadro 5: Classificação das categorias de impacto do RECIPE (continua).

Categoria de impacto	Indicador	Unidade físico-química	Unidade de impacto	Fator de caracterização	Sigla
Eco toxidade de água doce	Aumento ponderado pelo perigo na água doce	Yr x m^3	Kg 1,4-DCB para água doce	Potencial de Eco toxidade de água doce	FETP
Eco toxidade marinha	Aumento ponderado pelo perigo na água marinha	Yr x m^3	Kg 1,4-DCB para água marinha	Potencial de Eco toxidade marinha	METP
Radiação ionizante	Incremento da dose de absorção	Man x Sv	kBq Co-60 para o ar	Potencial de radiação ionizante	IRP
Ocupação de terras agrícolas	Ocupação e transformação pelo tempo	Yr x m^3	m^2 x yr terra de cultivo anual	Potencial de ocupação de terra agrícola	ALOP
Depleção de água	Incremento da água consumida	m^3	m^3 de água consumida	Potencial de água consumida	WCP
Depleção de recursos minerais	Diminuição do teor de minério	Kg	Kg Cu	Potencial de minério excedente	SOP
Depleção de combustível fóssil	Valor de aquecimento superior	MJ	Kg oil	Potencial de depleção fóssil	FDP

Quadro 5: Classificação das categorias de impacto do RECIPE (conclusão).
Fonte: Adaptado de HUIJBREGTS, 2016.

Existem 3 (três) perspectivas culturais que são utilizadas para modelar e caracterizar um conjunto de fatores de ponderação consistente, para as incertezas dos resultados de impactos obtidos. Isso significa que existem modos diferentes de se abordar os resultados, baseando-se em questões de gerenciamento, nível de evidência e temporal. Dentre eles temos as perspectivas individualista (I), hierárquica (H) e igualitária (E).

A perspectiva individualista visa interesses de curto prazo, onde os impactos são indiscutíveis e com um otimismo tecnológico em relação ao respeito à adaptação humana e com evidências provadas. A hierárquica é voltada para uma política adequada visando evitar problemas, balanceando o curto ao longo prazo com evidências baseadas em consenso. A igualitárias opera a longo prazo, sendo preventiva ao considerar todas as possíveis evidências, as quais podem levar a catástrofes futuras (HAUSCHILD, 2018).

2.6.2 Softwares

Para gerenciar o volume de dados a serem trabalhados em uma ACV é necessário a utilização de softwares específicos, a fim de facilitar o manejo e economizar tempo. Estes possuem ferramentas de análises para quaisquer objetivos, seja para uma comparação de processos, medição da magnitude dos impactos em certos períodos de tempo, influência de metodologias nas etapas estudadas, dentre outras ferramentas.

Alguns programas como o OPEN LCA, ONE CLICK LCA e ECOCHAIN apresentam licenças gratuitas para se realizar uma avaliação considerável, mas devendo algumas vezes pagar pelas bibliotecas a parte. Entretanto, softwares como SIMAPRO, GABI, e UMBERTO NXT são pagos, apresentando uma biblioteca própria e muito mais completa do que os gratuitos, porém oferecem testes gratuitos por um determinado período de tempo.

O SIMAPRO foi criado por um fundo do ministério da economia holandesa por volta de 1990, justificando seu nome sendo uma Análise Ambiental Sistemática de Produtos (*Systematic Environmental Analysis of Products*). Sua criação visou oferecer serviços de consultoria e cursos de treinamento para auxiliar na estratégia ambiental adotada em setores industriais, econômicos e administrativos. Suas contribuições geraram métodos que colaboraram para metodologias voltadas para biodiversidade e impactos sociais, como o ReCiPe 2016 e ECO-INDICATOR.

Tal software é um dos mais utilizados para analisar os impactos de produtos, serviços e processos pelo seu ciclo de vida. Sua flexibilidade, tradução do programa e interface amigável permitem ao usuário compreender rapidamente como estruturar uma avaliação sobre determinado processo. Seu banco de dados é vasto, apresentando por exemplo processos agrícolas, cerâmicas, químicos, eletrônicos, combustíveis, metais, polímeros, energéticos, transportes, processamento, uso, descarte, etc. das etapas de berço, portão e túmulo.

Uma das principais bibliotecas a serem utilizadas seria o ECOINVENT 3.11, a qual apresenta os dados citados nos exemplos anteriormente e mais. Esta é adaptável as condições de alocação e expansão das fronteiras do sistema, as metodologias ReCiPe, ECO-INDICATOR, EPS 2000, CML 2002, TRACI, dentre outras, além de poder realizar os cálculos de impactos ambientais seguindo dados do sistema ou dos próprios dados de entrada e saída colocados pelo usuário.

A base do programa se dá pela criação ou consulta de fluxos na base de dados, utilizando os mesmos para elaborar um processo a ser avaliado. Fatores como as entradas e saídas, qualidade dos dados, provedores das informações, valores de custos e quantidade de recursos utilizados para cada fluxo são utilizados para a realização dos cálculos. Seu funcionamento se dá através da compilação e escalonamento de processos, utilizando metodologias de categorização de impactos, assim como é possível comparar as mesmas e processos em seus sistemas de produto. Sua interface é apresentada no Anexo A, utilizando alguns processos utilizados neste estudo de caso.

Uma vez inserido os dados de entrada e saída, definido o método e hierarquia a ser utilizada, o software pode apresentar os dados como uma arvore de processos, dados específicos de cada componente de entrada ou os impactos totais. Na Figura 20 a seguir, utilizou-se o exemplo de a etapa de trefilação da manufatura aditiva de arame e arco, onde seguindo os 18 impactos do ReCiPe, apresentou os resultados em suas respectivas unidades funcionais equivalentes.

Categoria de impacto	Unidade	Total
Aquecimento global	kg CO_2 eq	75,4
Depleção de ozônio	kg CFC – 11eq	5,87E-6
Acidificação terrestre	kg SO_2 eq	0,17
Eutrofização água doce	kg P eq	0,0181
Eutrofização marinha	kg N eq	0,0374
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	14,4
Formação de oxidante fotoquímico	kg NMVOC	0,111
Formação de material particulado	kg PM_{10} eq	0,0676
Eco toxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	0,0906
Toxicidade de água doce	kg 1,4-DB eq	2,22
Toxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	1,89
Radiação ionizante	kBq U235 eq	2,49
Ocupação da terra de agricultura	m2a	5,18
Ocupação de terra urbana	m2a	0,386
Transformação de terra natural	m^2	0,0335
Depleção hídrica	m^3	3,67
Depleção de recursos mineral	kg Fe eq	33,9
Depleção de recursos fósseis	kg oil eq	9,02

Tabela 2: Exemplo de resultados dos impactos na trefilação da MAAA do estudo.
Fonte: O Autor, 2025.

Diferente de programas gratuitos, o SIMAPRO alerta quando algum dado inserido possa estar errado ou inconsistente dentro do processo. Infelizmente, tais programasse bibliotecas ainda são demasiados custosos em países como o Brasil, limitando muitos estudos de ACV que convenham a serem realizados para o bem da sustentabilidade.

3 - Objetivos

3.1 – Objetivos Gerais

A proposta do estudo é comparar através de uma avaliação de ciclo de vida a produção de um flange metálico, proveniente de dois métodos de manufatura, sendo eles o convencional por forjamento e aditiva de arame e arco.

3.2 – Objetivos específicos

- Analisar os impactos ambientais voltados para o consumo energético, emissões de gases do efeito estufa e geração de resíduos de ambas manufaturas.
- Avaliar as etapas de extração, produção, manufatura e pós-processamento de um flange metálica das manufaturas convencional e aditiva;
- Comparar do ciclo de vida das manufaturas convencional e aditiva, utilizando as normas ISO 14040 e ISO 14044;
- Utilizar de dados primários e secundários para efetuar os cálculos de resíduo gerado, emissões atmosféricas e energia consumida das etapas de manufatura, seguindo as metodologias de PRIARONE e YUSUF;
- Modelar e realizar simulações dos impactos ambientais, utilizando modelos do Instituto Aço Brasil, WSA e pelo software SIMAPRO, com sua respectiva biblioteca ECOINVENT 3.11 para as etapas de extração, produção e manufatura;
- Justificar a escolha da melhor manufatura, apontando os principais pontos de relevância e magnitude ambiental entre os processos presentes em cada etapa.

4 – Metodologia

4.1 – Definição e escopo

O presente estudo teve o objetivo de realizar uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) comparando dois métodos de manufatura de um mesmo flange, sendo eles a manufatura convencional de forjamento e a manufatura aditiva de arame e arco. A ACV foi desenvolvida, referenciando os indicadores de impactos ambientais de consumo energético, geração de resíduos sólidos e emissões atmosféricas, durante as etapas de produção até a finalização do produto.

Em resumo do processamento das manufaturas, a MC se dá pela utilização de uma prensa fechada para moldar o metal aquecido e posteriormente passa pelos pós processamento de torneamento e furação, enquanto na MA utiliza-se a trefilação para reduzir o diâmetro das barras provindas da laminação, para se transformar nos arames de alimentação para a MAAA, sendo então depositado camada-por-camada por um arco voltaico que aquece o material para impressão do produto.

A peça produzida neste trabalho é um flange metálico API 6A BX169, utilizado pelo setor naval da indústria de petróleo e gás, e suas aplicações incluem vedação, conexões sobre pressão e direcionamento de líquidos viscosos em tubulações, como o petróleo por exemplo. O material de sua formação é o AWS ER90S-B3, conhecido com ER-90, forjado tradicionalmente do F22 e das conexões de tubos da ASTM A182. Seu formato de bloco inicial antes de se tornar um tronco de cone possui dimensões de 38 X 38 X 20 cm, pesando 227,0 kg e com densidade de 7.860 kg/m^3, sendo essa do metal em si.

A norma ISO 14040 e 14044 estabelece que comparações entre sistemas devem ser quantificadas nas mesmas unidades funcionais para os requisitos avaliados, definidas neste estudo na seguinte ordem: consumo energético em mega joules (MJ); emissões atmosféricas em quilograma de gás carbônico equivalente (kgCO_2 -EQ); e resíduos em quilogramas (kg). A massa de 227,0 kg será a mesma no início da produção do flange nas manufaturas, a fim de facilitar a visualização dos impactos.

Um adendo se trata nas etapas iniciais de extração e processamento do metal, se tratando da utilização da alocação de massa para algumas bibliotecas presentes no software. A alocação se refere a parcela de impacto de cada coproduto gerado ou referente a múltiplas entradas, consistindo na divisão adequada dos fatores de impacto do processo.

4.2 – Fronteiras do sistema

Para representar os estágios de produção e o fluxo do produto desde o início de sua extração e produção até sua conclusão, foi realizado um fluxograma do mesmo apresentado na Figura 20. Os estágios foram divididos em blocos, nos quais a produção do metal é a mesma para ambos, diferindo na etapa 2 de processamento do metal, no qual ele é transformado em placas para MC e em barras para a MA. Esse processo se diferencia na energia e emissões geradas para produzir as barras e as placas.

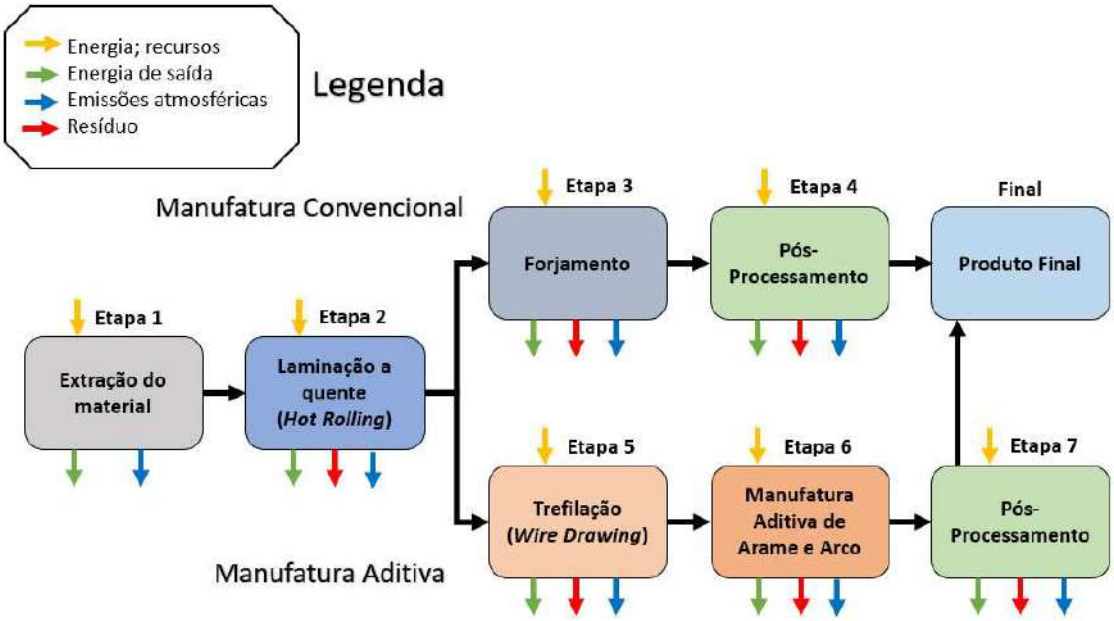


Figura 20: Diagrama de fronteira do sistema da MC e MA.
Fonte: O Autor, 2025.

A MC inclui os estágios de forjamento e pós-processamento, enquanto na MA inclui a trefilação, MAAA e seu pós-processamento. O método escolhido para analisar a produção final da peça na ACV foi do berço ao portão, com o nível de avaliação sendo o modelo europeu ReCiPe 2016 v 1.11 hierárquico, representa o resultado dos impactos numa janela de previsão de 100 anos (médio prazo). Para este estudo, foram utilizados os dados de energia, mudança climática e esgotamento de metais da biblioteca do software.

Um fator a ser considerado na MA seria anterior ao envio do metal a MAAA (etapa 6), onde o produto inicialmente é projetado no *software Solid Works* 3D em formato CAD, convertendo o mesmo para os parâmetros de linguagem do robô de impressão para assim iniciar a manufatura. Esta etapa por se tratar apenas de *inputs* de comandos em um computador e conversão de arquivos no mesmo, não possui impactos ambientais

significativos que possam influenciar nos cálculos deste estudo. Por isso essa etapa não necessitaria de um estudo de consumo energético pelo uso dos equipamentos.

A limitação do estudo baseou-se no chamado "túmulo", que inclui os estágios de transporte, utilização e eliminação do produto. A razão para a exclusão do transporte prendeu-se com a distância que seria percorrida para entregar a peça e os possíveis meios de transporte utilizados, bem como os respetivos combustíveis. Utilizando o exemplo de transporte de um produto do Brasil para o Chile, o mesmo pode ser efetuado de maneira via rodoviária, utilizando gasolina ou diesel. Considerando o transporte para a China, necessitaria de embarcações e possivelmente ferrovias, adicionando novos combustíveis como carvão e gás natural, percorrendo uma distância maior. Entretanto, se considerar que o transporte seja para o mesmo local e com a peça do mesmo peso, os impactos seriam muito próximos, não possuindo divergências significativas a serem comparadas.

Em relação a etapa de uso, pela peça em questão apresentar as mesmas características físicas e seu uso ser o mesmo (modo estático) não haveria diferenças significativas a serem apresentadas. Para o descarte, ambas as peças, novamente por obterem a mesma geometria e qualidades, seria apenas efetuado o descarte em um alto-forno como metal de sucata.

4.3 – Qualidade e obtenção dos dados do material

O estudo utilizou dados de fontes primárias para os valores da MAAA e seu pós-processamento, mensurados pelo LNTSOLD - Laboratório Nacional de Tecnologia da Soldagem, da COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro - Brasil. Os dados secundários foram obtidos através de pesquisas bibliográficas, do acervo fornecido pelo ECOINVENT 3.11 e de cálculos e modelos realizados pelo Laboratório de Controle da Poluição do Ar – LCPA/EQ/UFRJ.

O metal aço baixa liga AWS ER90S-B3 (ER-90) em sua nomenclatura: “ER” indica um eletrodo ou arame de soldagem; “90” a sua resistência de 90.000 PSI à tração; “S” sendo um arame de soldagem maciço; “B3” a composição química específica da liga. Este metal de baixa liga foi escolhido devido a sua alta resistência estrutural contra pressão e temperaturas elevadas, além de poder realizar diferentes combinações com outros aços, exemplo do aço cromo-molibdênio (2,25% Cr – 1% Mo) e do aço carbono.

De acordo com a Sociedade Americana de Soldagem (*American Welding Society – AWS*), em sua norma A5.28/A5.28M (2005) a composição do material de solda deve ser especificada em porcentagem dos elementos químicos contidos. A composição química define se esse possui as características para a aplicação em determinados processos industriais. A Tabela 3 apresenta as porcentagens requeridas pela qualidade AWS do ER-90 e as utilizadas para o estudo, utilizando dados do fornecedor americano Lincoln Eletric© do qual foi efetuado a compra do material.

Símbolo	Elemento	Porcentagem mínima AWS	Porcentagem máxima AWS	Porcentagem presente
C	Carbono	0,07	0,12	0,10
Mn	Manganês	0,40	0,70	0,58
Si	Silício	0,40	0,70	0,54
S	Enxofre	-	0,025	0,004
P	Fósforo	-	0,025	0,005
Cr	Cromo	2,30	2,70	2,4
Ni	Níquel	-	0,20	0,04
Mo	Molibdênio	0,90	1,20	1,04
Cu	Cobre	-	0,35	0,08
TOTAL SEM FERRO		**4,07%**	**6,02%**	**4,789%**
Quantidade de Ferro (Fe)		95,93	93,98	95,211
TOTAL COM FERRO		**100%**	**100%**	**100%**

Tabela 3: Composição química do metal ER-90.
Fonte: Adaptado de Lincoln Eletric Global Inc., 2024.

4.3.1 – Extração e produção do metal (Etapa 1)

Para a primeira etapa utilizou-se da biblioteca ECOINVET 3.11, com cálculos realizados pelo software SIMAPRO. Ao calcular os valores de um processo no software, é necessário informar as bibliotecas a serem referenciadas, cada uma contendo seus valores de entradas e saídas. Uma vez que foram utilizados dois tipos de fornos (elétrico e a oxigênio) para o aquecimento de minérios, metais reciclados e sucatas, cada forno possui sua biblioteca, com cada uma realizando metade da massa inicial nessa etapa.

As bibliotecas referenciadas para a produção do ER-90 foram a *"Steel low alloyed {RoW} steel production, electric, low alloyed allocation default, Unit"* para o forno elétrico e *"Steel low alloyed {RoW} steel production, converter, low-alloyed default, Unit"* para o forno a oxigênio, substituindo o metal do programa pelos componentes descritos na Tabela 2. Os inputs das bibliotecas de produção elétrica e de combustão se encontram no Quadro 6 e 7 respectivamente.

Material	Quantidade	Massa	Referência	Comentário
Água	0,0051567864	M^3	Water, cooling, unspecified natural origin, RoW	Resfriamento
Argônio líquido	0,00329043	kg	Argon, liquid {GLO}| market for | Alloc Def, U	Liquido resfriador. Asfixiante por deslocamento de ar
Anodo	0,0029821176	kg	Anode, for metal electrolysis {GLO}| market for | Alloc Def, U	Eletrólise do metal
Conversor de forno de arco elétrico	-	Peça	Electric arc furnace converter {GLO} | market for |Alloc Def, U	Forno de derretimento apenas de metais de reciclagem e restos.
Óxido de cálcio (cal virgem)	0,0521772951	kg	Quicklime, in pieces, loose {GLO} | market for | Alloc Def, U	Contendo impurezas presentes nos minérios de metais
Refratário	0,0134003290	kg	Refractory, basic, packed {GLO} | market for | Alloc Def, U	Armazenagem do metal pronto.
Ferrosilício	0,0037	kg	Ferrosilicon {GLO} | market for | Alloc Def, U	Mineral
Sucata	1,1048867989	kg	Iron scrap, sorted, pressed {GLO} | market for | Alloc Def, U	Sucata base
Oxigênio líquido	0,0510408395	kg	Oxygen, liquid {RoW} | market for | Alloc Def, U	Utilizado no processo do forno.
Gás natural de alta pressão total	0,0753	M^3	Natural gas, high pressure {RoW}| market for | Alloc Def, U	Gás natural utilizado para combustível de conversão do metal.
Carvão total	0,014	kg	Hard coal {RoW} | market for |Alloc Def, U	Combustível do equipamento

Quadro 6: Dados de entrada da etapa de conversor elétrico do metal ER-90
Fonte: Adaptado da ECOINVENT, 2024.

Material	Quantidade	Massa	Referência	Comentário
Água total	0,0129	M^3	Water, cooling, unspecified natural origin, RoW	Resfriamento
Dolomita	0,00275	kg	Dolimite {GLO} | market for | Alloc Def, U	Minério
Ferro	0,022	kg	Iron ore, beneficiated, 65% Fe {GLO} | market for | Alloc Def, U	Minério puro
Óxido de cálcio (cal virgem)	0,0425	kg	Quicklime, in pieces, loose {GLO} | market for | Alloc Def, U	Produzir escória para remover enxofre e impurezas
Oxigênio líquido	0,07145	kg	Oxygen, liquid {RoW} | market for | Alloc Def, U	Forma aço fundido de baixo carbono

Quadro 7: Dados de entrada da etapa de conversor a explosão do metal ER-90. (Continua).

Material	Quantidade	Massa	Referência	Comentário
Ferro Níquel	0,045	kg	Ferronickel {GLO} | market for | Alloc Def, U	Materia-prima
Ferro manganês	0,015278	kg	Ferromanganese, high-coal {GLO} | market for | Alloc Def, U	Materia-prima
Ferro Cromo	0,032853	kg	Ferrochromium, high-carbon {GLO} | market for | Alloc Def, U	Materia-prima
Ferro gusa	0,9	kg	Pig Iron {GLO} | market for | Alloc Def, U	Materia-prima
Forno de oxigênio a explosão	-	Peça	Blast oxygen furnace converter {GLO} | market for | Alloc Def, U	Forno de derretimento geral de metais
Sucata	0,12501	kg	Iron scrap, sorted, presses {GLO} | market for | Alloc Def, U	Materia-prima
Molibdênio	0,00059649	kg	Molydenite {GLO} | market for | Alloc Def, U	Minério
Gás natural de alta pressão total	0,000962	M^3	Natural gas, high pressure {RoW} | market for | Alloc Def, U	Gás natural utilizado para combustível de conversão do metal.

Quadro 7: Dados de entrada da etapa de conversor a explosão do metal ER-90. (Conclusão).
Fonte: Adaptado da ECOINVENT, 2024.

A utilização de ambos os fornos de Arco Elétrico (EAF) e de Explosão a Oxigênio (BOF), se justificam pelo BOF utilizar seu processo para fundir principalmente minérios metálicos, enquanto o EAF se especializa em metais reciclados e sucata (ODABASI, 2009). Para o programa, foi considerado metade da produção para cada forno, ou seja, para 1,0 kg de ER-90 produzido cada forno ficou responsável com 0,5 kg de produção. No Anexo B é possível observar o caminho do metal pelos fornos citados.

A energia consumida por quilograma encontrada pelo SIMAPRO foi de aproximadamente 17,6 MJ/kg. Nesta etapa por se tratar da extração do material, não houve perdas do mesmo uma vez que o metal bruto extraído foi totalmente transportado para a próxima etapa. As emissões atmosféricas geradas foram calculadas pelo programa considerando o peso inicial do material.

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) consideradas neste estudo foram baseadas nas informações apresentadas no Relatório de Indicadores de Sustentabilidade de Desempenho da Indústria do Aço de 2023 (*World Steel Association – WSA*). Tal relatório adotou para o ano de 2024 o valor médio de 1,91 toneladas de CO_2 por tonelada de fundição de aço bruto gerados pelas indústrias. Convertendo o valor para quilogramas, obtém-se uma proporção de 1:1 de 1,91 kg CO_2-eq/kg de aço bruto.

O cálculo médio global realizado pelo WSA se baseia no somatório das intensidades das emissões de CO_2, ao considerar a intensidade de produção do gás ao processar o metal nos fornos de oxigênio, da sucata e do metal reciclado nos fornos elétricos, com suas respectivas porcentagens na produção global. A Equação 1 explica como foi efetuado o cálculo para encontrar as emissões nos três processos.

$$EM_{CO2} = \left(BF_{CO2}^{BOF} \times P_{Bof}\right) + \left(Sp_{CO2}^{EAF} \times P_{SP}\right) + \left(DRI_{CO2}^{EAF} \times P_{DRI}\right) \qquad (1)$$

Onde:

EM_{CO2} = Intensidade das emissões globais de CO_2 (kg CO_2-eq);

BF_{CO2} = Intensidade de CO_2 de ferro no BOF (CO_2-eq);

P_{BOF} = Participação do aço na produção global de BOF (%);

Sp_{CO2} = Intensidade de CO_2 de sucata no EAF (CO_2-eq);

P_{SP} = Participação da sucata de aço EAF na produção global (%);

DRI_{CO2} = Intensidade de CO_2 de metal reciclado no EAF (CO_2-eq);

P_{DRI} = Participação de metal reciclado no aço EAF na produção global (%);

Os valores encontrados pelo próprio instituto são referentes a coleta de dados da equipe do WSA, instituídos pelo relatório de sustentabilidade e performance da indústria do aço de 2023, referentes ao ano de 2022. Estes valores se encontram na Tabela 4 abaixo.

Parâmetros da equação	Valores
Intensidade de CO_2 de ferro no BOF (CO_2-eq);	2,33
Participação do aço na produção global de BOF (%);	72
Intensidade de CO_2 de sucata no EAF (CO_2-eq);	0,68
Participação da sucata de aço EAF na produção global (%);	21
Intensidade de CO_2 de metal reciclado no EAF (CO_2-eq);	1,37
Participação de metal reciclado no aço EAF na produção global (%);	7

Tabela 4: Valores das emissões globais de CO_2 segundo o WSA.
Fonte: *Word Steel Association*, 2023.

Mesmo utilizando o relatório do WSA, os cálculos das emissões foram realizados pelo SIMAPRO da etapa 1. O WSA serviu como referência para confirmar que as bibliotecas do programa estavam atualizadas e o método de cálculo realizado estava calibrado para esta e demais etapas que utilizaram o software, posteriormente a laminação a quente e a trefilação.

4.3.2 – Laminação a quente (Etapa 2)

Uma vez extraído e configurado quimicamente no metal de baixa liga ER-90, a segunda etapa inicia a formação de placas e barras, com dimensões específicas para seguirem para a forja e trefilação respectivamente. O processamento do material utiliza o método de laminação a quente (*Hot Rolling*), onde o metal é aquecido para facilitar sua deformação térmica, passando em seguida por pares de rolos, rotacionados em sentidos opostos em torno do próprio eixo, reduzindo seu volume para se adaptar as medidas aproximadas demandadas pelas manufaturas.

A referência "*Hot rolling, steel | hot rolling, steel | Cutoff, Unit – RoW"* foi utilizada pela biblioteca ECOINVENT 3.11 para realizar os cálculos dessa etapa. Os valores das referências citadas foram mantidos, adaptando-se apenas ao metal comum pelo do estudo. O Quadro 8 apresenta os *inputs* que foram considerados pelo programa, contendo a adaptação do metal citado.

Material	Quantidade	Massa	Referência	Comentário
Água	0,01704	m^3	Water, cooling, unspecified natural origin, RoW	Usada para resfriamento
Água	0,003408	m^3	Water, unspecified natural origin, RoW	Laminação e condicionamento
Óleo	0,00404	kg	Lubricating oil {GLO} | market for | Alloc	Lubrificante
Laminadora	-	Piece	Rolling mill {GLO} | market for | Alloc	Equipamento de moldagem
Lima	4,97 E-5	kg	Lime, hydrated, loose weight {GLO} | market for | Alloc	Acabamentos e desbaste
Embalagem	1,89 E-11	kg	Packaging film, low density polyethylene {GLO} | market for | Alloc	Empacotamento do produto
Folhas de rolamento	2,36 E-11	kg	Sheet rolling, steel {GLO} | market for | Alloc	Transporte pelas esteiras
Caixas de papelão ondulado	4,72 E-12	kg	Corrugated board box {GLO} | market for corrugated board box | Alloc	Empacotamento do produto
Oxigênio líquido	0,00714	kg	Oxygen, liquid {RoW} | market for | Alloc	Enriquecimento de ar, processo de aquecimento
Químicos inorgânicos	1,45 E-8	kg	Chemical, inorganic {GLO} |market for chemicals, inorganic | Alloc	Processo de aquecimento
Metal ER-90	0,05	kg	Metal ER – 90 de baixa liga	Metal

Quadro 8: Dados de entrada da etapa de laminação a quente do ER-90.
Fonte: Adaptado da ECOINVENT, 2024.

A energia calculada pelo software foi de aproximadamente 25,5 MJ/kg. Vale ressaltar que PRIARONE (2009) encontrou um valor próximo de 20,7 MJ/kg utilizando a biblioteca própria (CES *Selector* v.17.2.0) de outro software conhecido como GRANTA Design. KHALID (2021) realizou estudos acerca da etapa de laminação, encontrando aproximadamente 25,3 MJ/kg, confirmando sua confiabilidade. Estes valores se reafirmam também para a etapa anterior de extração.

Considerando a unidade funcional de 227,0 kg utilizada nas etapas de manufatura subsequentes, é importante destacar que o programa identificou resíduo em seus cálculos. Assim, o valor inicial sofreu uma redução de massa antes de avançar para as etapas seguintes. Para quantificar essa perda, foi realizada uma simulação no SIMAPRO utilizando 1,0 kg de metal, resultando em uma perda estimada de 0,149 kg.

Com essa perda encontrada, considerou-se que para restar 227,0 kg, uma regra básica de três utilizando o peso restante de 1,0 kg produzido (0,851 kg), encontrou-se o valor inicial de 266,74 kg. Aplicando a mesma linha de raciocínio, mas agora considerando o valor de 0,149 kg perdidos encima do valor inicial, obteve-se o resíduo desta etapa de 39,74 kg. O valor pode ser facilmente confirmado, reduzindo o valor inicial da perda, obtendo-se 227,0 kg. Utilizando a massa inicial no software para confirmação, o mesmo encontrou o mesmo resultado.

4.3.3 – Dados da Manufatura Convencional (Etapa 3)

O objetivo do forjamento da etapa 3 é alterar o formato da placa produzida na etapa 2 para a forma bruta do produto final, aplicando pressão em sua superfície sob uma determinada temperatura. Dois métodos que podem ser adotados sendo eles o forjamento à frio utilizando a temperatura ambiente, e a quente utilizando a temperatura acima da recristalização do material. Para o estudo optou-se pelo método de forja quente, não apenas por se tratar das propriedades físicas de um metal de baixa liga, mas pela utilização em massa das manufaturas em geral.

O forjamento se caracteriza pela aplicação sob pressão de uma prensa com um molde sobre o lingote, visando o formato desejado. Para tal existem duas matrizes de modelagem que podem ser utilizadas a depender da complexidade da peça, sendo estas aberta ou fechada. A aberta ocorre por conformação de formato simples ou plano, enquanto a fechada apresenta um molde complexo, onde as chapas tendem a se tocar.

Devido a peça do estudo apresentar uma estrutura de corpo de cone com base cilíndrica, sua complexidade demanda uma matriz fechada.

O impacto na produção de um molde de matriz fechada possui um grau de relevância considerável no meio ambiente. É necessário entender a extração do material do molde, seus possíveis processos de laminação e usinagem CNC para definir sua forma, categorizando uma nova ACV. Seu impacto é aplicado para a primeira peça fabricada, uma vez que não haveria necessidade de se confeccionar outros moldes para as demais, salvo quando a peça demandar uma geometria diferente ou adaptada.

Por estes motivos não haveria necessidade de realizar cálculos, a respeito dos impactos gerados deste. O molde utilizado para o estudo não foi avaliado nas questões de sua fabricação, uma vez que não foi customizado para a produção da peça em questão. Outro fator seria a inviabilidade de adquirir os parâmetros de fabricação dos moldes, por parte de certas empresas de manufatura. Possivelmente por questões jurídicas ou de patentes tais dados se encontram privados, dificultado uma avaliação mais aprofundada.

É importante frisar que em alguns trabalhos, como os de SWORD (2023), no qual o impacto ambiental gerado pelo molde se traduz em um novo ciclo, o autor utiliza referências de moldes de outras bibliografias, porém de uma forja aberta. Logo, não se descarta os possíveis impactos ambientais gerados pelo molde, onde estes alavancariam os gastos energéticos, de emissões e principalmente de resíduos gerados pela MC.

4.3.3.1 – Cálculos dos indicadores ambientais da Manufatura Convencional

Os dados e métodos utilizados para efetuar os cálculos energéticos da MC foram retirados de experimentos realizados por YUSUF (2019). Os dados de forja coletados obtiveram-se as variações de temperatura, tempo e forças aplicadas durante o processo de manufatura. O procedimento considerou o aquecimento do lingote em 430º C, seguindo para 480º C e se mantendo em 530º C, com intervalos de 60, 90 e 120 minutos respectivos.

A utilização da energia dos reagentes químicos para processos de secagem, desengordurantes e reciclagem convencional foram utilizados da base de dados da ECOINVENT 3.11, confirmados pelo programa neste estudo. As demais medidas encontradas são referentes a cinco processos energéticos: fornalha (operando a 240 volts); forja (operando a 415 volts); aquecimento (5,337 kWh); prensagem a quente (6,683 kWh) e modo de espera do equipamento (0,592 kWh).

Baseando-se nesses dados, a energia de consumo para cada unidade de massa produzida foi de 45,01 kWh/kg. A massa do material após a geração de resíduo no processo de laminação anterior, ficou na base dos 227,0 kg. Com a energia consumida produzida, basta realizar a multiplicação do valor pelo peso base, posteriormente convertendo o resultado de quilowatts/hora (kW/h) para mega joules (MJ).

O cálculo de resíduos gerados considerou a quantidade em kg de resíduo produzido durante os processos da forja convencional. A fórmula de resíduo gerado no final do processo será definida como quantidade inicial de matéria produzida da etapa 2, reduzida da massa final após os processos de manufatura. A fórmula e metodologia para o cálculo dos resíduos será o mesmo para os blocos da MC, MA e pós-processamento de ambas as manufaturas. Tal fórmula se encontra na Equação 2 representada a seguir.

$$R = M_F - M_I \qquad (2)$$

Onde:

R = Resíduo gerado (kg)

M_F = Massa final (kg);

M_I = Material inicial (kg);

O valor das emissões de gases do efeito estufa foram utilizadas das referências de YUSUF (2019). O processo consistiu em medir o potencial de efeito estufa (GWP) da MC, seguindo as temperaturas e tempo de operação. Posteriormente, o uso do software estatístico *Design-Expert* serviu para simular as emissões com os dados de operação e temperatura, a fim de confirmar o valor de emissões em $kgCO_2$-eq/kg.

Utilizando o modelo de análise de variância (ANOVA), foi realizado uma comparação das emissões previstas da MC, relacionando valores específicos de GWP medidos com previsões do software estatístico. A ideia do experimento visa uma otimização das emissões dos GEE, onde os valores dos experimentos devem ser próximos do valor otimizado do programa. Com os valores chegando muito próximo da média estipulada de 35,21 $kgCO_2$-eq/kg. Neste trabalho foi utilizado a média entre os resultados em $kgCO_2$-eq/kg. Para o cálculo das emissões da MC, multiplicando a massa de 227,0 kg pela média entre os resultados, conforme apresentado na Equação 3 e os valores coletados apresentados na Tabela 5.

$$EM_{MC} = \left(\frac{X1+X2+\cdots+Xn}{n}\right) \times M \qquad (3)$$

Onde:

EM_{MC} = Emissões GEE da manufatura convencional ($kgCO_2$-eq);

X = Valor do experimento GWP ($kgCO_2$-eq/kg);

N = Número de experimentos;

M = Massa do metal a ser manufaturado (kg).

Parâmetros	Valores
Resultado do experimento 1 ($kgCO_2$-eq/kg)	34,97
Resultado do experimento 2 ($kgCO_2$-eq/kg)	36,21
Média dos experimentos ($kgCO_2$-eq/kg)	35,59
Massa do material na etapa de MC (kg)	227,0

Tabela 5: Parâmetros de emissões da etapa de forjamento.
Fonte: O Autor, 2025.

4.3.4 – Dados da etapa de Trefilação (Etapa 5)

Com a obtenção das barras do metal ER-90 proveniente da etapa 2 de laminação, a etapa 5 da MA de trefilação reduz o diâmetro das barras para o tamanho ideal de encaixe do setup escolhido. O processo de impressão 3D é iniciado com a soldagem do arco voltaico e do gás de proteção, derretendo o metal e o depositando camada a camada, conforme as especificações do programa. A composição do gás de proteção influencia na qualidade do metal fundido, protegendo-o dos efeitos negativos das condições ambiente. Na etapa final, ocorre um pós-processamento de usinagem CNC para remover imperfeições na estrutura da peça e aplicado um polimento para a produção da peça final.

Os rolos arredondados foram utilizados na etapa anterior de laminação a quente, a fim de gerar o arame para a deposição camada a camada. O arame ER-90 antes de ser abastecido na máquina de solda, passa pelo processo de trefilação, reduzindo seu diâmetro para 1,2 mm. Sua classificação A5-2B pela AWS, características, empresa de fornecimento e formato são apresentadas na Figura 21.



Figura 21: Molde tubular do ER-90 para o estudo de caso.
Fonte: O Autor, 2025.

Os dados dos impactos na trefilação foram realizados pelo software SIMAPRO, com a respectiva biblioteca de base "*Wire drawing, steel {RoW} | processing | Alloc Def, Unit"*. A referência utilizada leva em consideração a substituição do metal padrão pelos valores do ER-90 calculados anteriormente, sendo baseados na avaliação das categorias de massa correspondente, energia utilizada e emissões. Os *inputs* referentes ao seu processo se encontram no Quadro 9.

Material	Quantidade	Unid.	Referência	Comentário
Água	0,035	kg	Water, cooling, unspecified natural origin, RoW	Utilizada em resfriamento de equipamentos
Chumbo	0,0012845	kg	Lead {GLO} | market for | Alloc	Componente do equipamento para modelagem do fio
Ácido sulfúrico	0,0088388	kg	Sulfuric acid {GLO} | market for | Alloc	Fio submergido no elemento para limpar óxidos que se formam
ER-90	0,0427620	kg	Z- Metal ER-90	Metal utilizado
Caixa de papelão	4,7181 E-12	kg	Corrugated board box {GLO} | market for corrugated board box | Alloc	Embalagem
Compostos químicos inorgânicos	3,1623 E-5	kg	Chemical, organic {GLO} |market for chemicals, inorganic |Alloc	Lubrificantes do processo
Compostos químicos orgânicos	1,8407 E-8	kg	Chemical, inorganic {GLO} |market for chemicals, inorganic |Alloc	Componente do pó de trefilação
Lima	6,3233 E-5	kg	Lime, hydrated, loose weight {GLO} | market for | Alloc	Desbaste e acabamento do produto

Quadro 9: Dados de entrada da etapa de trefilação. (Continua).

Material	Quantidade	Unid.	Referência	Comentário
Laminadora	1,8407 E-8	Piece	Rolling mill {GLO} | market for | Alloc	Equipamento de molde
Sabão	0,0025811	kg	Soap {GLO} | market for | Alloc	Lubrificante (Orgânico)
Filme de embalagem	1,8872 E-11	kg	Packaging film, low density polyethylene {GLO} | market for |Alloc	Reforço e vedação de embalagem
Rolamento	2,359 E-11	kg	Sheet rolling, steel {GLO} |market for | Alloc	Peça de modelagem do equipamento
Óleo lubrificante	0,0025811	kg	Lubricating oil {GLO} market for | Alloc	Lubrificante para o equipamento
Ácido clorídrico	0,020009	kg	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RoW} | market for | Alloc	Componente do pó de trefilação

Quadro 9: Dados de entrada da etapa de trefilação. (Conclusão).
Fonte: Adaptado da ECOINVENT, 2024.

4.3.5 – Dados da Manufatura Aditiva de Arame e Arco (Etapa 6)

Após a etapa 5 o metal é enviado para a MAAA. Antes de depositado no equipamento de impressão, é feita a configuração no programa *Solid Works 3D*, definindo as dimensões da peça em formato CAD. O arquivo é enviado ao robô articulado modelo KUKA KR 210 R2700 para iniciar a impressão, operando com potências de 3,5 kW em funcionamento, e 42,6 W ocioso. O robô utilizado se encontra na Figura 22.

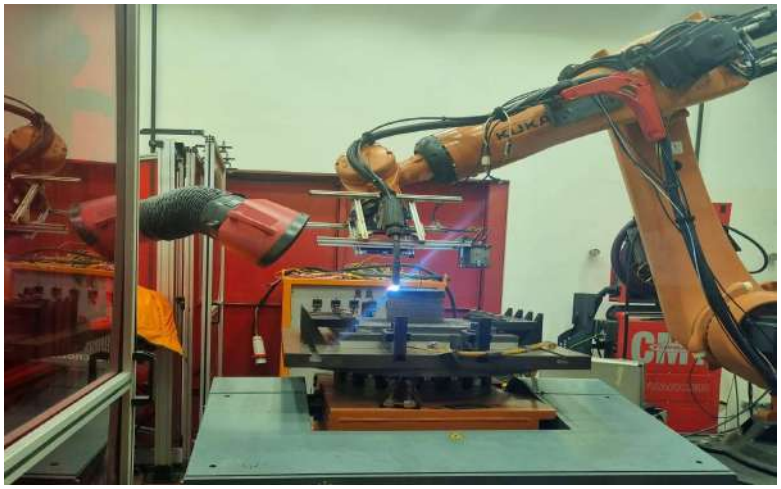


Figura 22: Célula de impressão de soldagem MAAA utilizado, modelo KR10.
Fonte: O Autor, 2025.

O robô é abastecido com o arame ER-90 e com cilindros de gás de proteção, com concentrações de 92% de argônio e 8% de CO_2. Foram utilizados 6 cilindros de $10m^3$ cada, estes com pressões de 190 bar, com pressão de saída de 10 bar, com temperatura do tanque de 21ºC. O fator de emissão do gás carbônico é considerado segundo dados do

ECOINVENT 3.11. O argônio por outro lado, embora seja um gás inerte não considerado um GEE, sua produção acarreta um fator de emissão.

A metodologia para a contabilização do gasto energético e das emissões atmosféricas serão utilizadas formulas de autoria de PRIARONE (2019). A questão dos resíduos será efetuada a mesma metodologia apresentada na Equação 2, sendo pesado o material antes e após o processo de manufatura.

4.3.5.1 – Cálculos dos indicadores ambientais da MAAA.

Visando encontrar o valor da energia primária do processo, é requerido que o equipamento forneça a energia gasta durante o tempo ocioso (*standby*), de deposição e de operação, assim como a energia dos consumíveis, referidos como o gás de proteção. Um ponto a ser destacado é pela massa do material total a ser depositada ser dívida na produção do substrato (30,9 kg) e da massa depositada na MAAA (95,8 kg).

A equação do cálculo energético considera uma constante do grid energético da rede de distribuição, assim como a energia gasta pelo equipamento, sistema de aquecimento da tocha, gás de proteção e pelo tempo de uso e inativo (*standby*). A Equação 4 de PRIARONE mostra os componentes para se obter a energia primária consumida.

$$E_MAAA = \frac{3,6}{N} \times (P_{stb} \times t_{stb} + SEC_m \times M_{wire} + P_{arc} \times t_{arc}) + E_{gas} \times q_{gas} \times t_{gas} \quad (4)$$

Onde:

E_MAAA = energia primária do processo de MAAA (MJ);

N = Coeficiente de conversão de energia elétrica primária;

P_{stb} = Energia de Standby do processo de MAAA da célula energética (braço robótico e da fonte de energia de solda.) (kW);

t_{stb} = Tempo de Standby e desligamento do equipamento no processo de MAAA (h);

SEC_m = Energia específica consumida durante a deposição da manufatura (kWh/kg);

M_{wire} = Massa do arame e seu material a ser depositado (kg);

P_{arc} = Energia do processo de arame e arco (kW);

t_{arc} = Tempo de operação do equipamento do processo de MAAA(h);

E_{gas} = Energia primária do gás de proteção (MJ/l);

t_{gas} = Tempo de fluxo do gás de proteção (h);

q_{gas} = Vazão do fluxo do gás de proteção (l/h).

Os parâmetros são dados primários do experimento, referente ao equipamento citado anteriormente. Os valores encontrados pelo software disponibilizados pelo equipamento para serem aplicados na fórmula do calculo energético, se encontram na Tabela 6 abaixo. Para a Tabela 7 seguinte, foi realizado o tempo calculado do período ocioso do equipamento.

Parâmetros considerados para o cálculo energético	Valores	Unidade
N = O grid de eficiência energética (JESWIET, 2008)	0,34	-
P_{stb} = Energia de Standby MAAA	0,0426	kW
t_{stb} = Tempo de Standby MAAA	13,07	Horas (h)
SEC = Energia específica consumida	1,3	kWh/kg
M_{wire} = Massa do fio e seu material a ser depositado	126,7	kg
P_{arc} = Energia do processo de arame e arco	3,5	kW
t_{arc} = Tempo de operação do componente MAAA	61,1	Horas (h)
E_{gas} = Energia primária do gás de proteção	0,0285	MJ/L
t_{gas} = Tempo de fluxo do gás de proteção	61,1	Horas (h)
q_{gas} = Vazão do fluxo do gás de proteção (15 L/min)	900	L/h
Volume utilizado durante a deposição	55.000	L

Tabela 6: Parâmetros considerados para o cálculo energético da MAAA.
Fonte: O Autor, 2025.

Lacuna de camada no espessamento do flange	Cabos por camada	Tempo de espera por cabo (min)	Tempo total de espera entre cabos (min)
1-5	9	2	80
6-7	8		28
8-9	7		24
10-11	6		20
12-13	5		16
14-41	4		168
Tempo total de espera entre cabos			**336**
Tempo de espera entre camadas			4.5
Número de camadas:			41
Tempo total gasto esperando entre camadas			**180**
Número de camadas na deposição do cilindro central (1 camada = 1 cabo)			120
Tempo de espera entre camadas			2
Tempo total gasto na espera entre camadas no cilindro central			**238**
Tempo total gasto na inicialização e ajuste do MAAA			30
Tempo total gasto com MAAA em stand-by			784 min → **13.07 h**

Tabela 7: Parâmetros dos períodos ociosos considerados para a MAAA.
Fonte: O Autor, 2025.

Para obter a energia primária do gás de proteção, utiliza-se uma substituição dos fatores da formula da energia interna (U = 3/2 x N x R x T) na formula da lei dos gases ideais (P x V = N x R x T), utilizando a nova fórmula para o cálculo (U = 3/2 x P x V). Com essas considerações, realizamos 1,5 (3/2) multiplicados pela pressão (em pascal) e volume (metros cúbicos). Com pressão de 190 bar, converte-se para 19.000.000 Pa e o volume do tanque sendo de 10 m^3, obtém-se 258 MJ, convertendo para litro, 0,0285 MJ/L.

A equação da liberação de CO_2 pelo sistema é quantificada pela multiplicação do consumo energético encontrado pela Equação 4, convertendo o valor de MJ para kWh, depois multiplicado pelo valor do padrão de energia limpa (*Carbon Emitted Signature* – CES) do grid elétrico, somando com o fator da pegada de carbono total produzido pelo gás de proteção. A Equação 5 a seguir representa o cálculo realizado para as emissões GEE geradas na etapa de MAAA.

$$EM_{MAAA} = E^{MAAA} \times CES + CF_{CO} \qquad (5)$$

Onde:

EM_{MAAA} = Energia consumida (MJ);

E^{MAAA} = Energia primaria do processo de MAAA (kWh);

CES = Fator de emissão da pegada de carbono ($kgCO_2$-eq/kWh);

CF_{CO2} = Fator de emissão de GEE do gás de proteção (kg CO_2-eq/kg).

Para realizar o cálculo da pegada de carbono, utilizou-se do relatório síntese brasileiro de mudança do clima (IPCC, 2023), instituído pelo Ministério de Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI), considerando a média dos fatores de emissões anuais de 2018 até 2022. Com os termos das fórmulas apresentados, e considerando que foram utilizados 5,5 cilindros de 10 m^3, é possível realizar o impacto das emissões atmosféricas da MAAA. Os valores referentes à Equação 5 se encontram na Tabela 8.

Gás	**Total de material usado (L)**	**Total de material usado (kg)**	**Fator de emissão de GEE da produção (kg CO_2-eq/kg)**	**Emissão de GEE (kg CO_2-eq)**
Argônio	253	78,56	0,88425	69,5
CO_2	22	7,53	1,811	13,6*
Total de emissão de CO_2 no gás de proteção (CF_{CO2})				**90,6**
Emissão média anual da pegada de carbono ($kgCO_2$-eq/kWh) (MCTI, 2022)				0,0759

* Valor considera emissões de CO_2 quando produzindo esta massa de CO_2

Tabela 8: Parâmetros considerados para o cálculo de emissões GEE da MAAA.
Fonte: O Autor, 2025.

4.3.6 – Dados do pós-processamento de ambas manufaturas (Etapas 4 e 7)

O acabamento superficial da etapa 4 (MC) e 7 (MA) garante a qualidade das propriedades mecânicas e fácil instalação da peça para seu uso final. Processos como polimento eletrônico, tamboreamento, jateamento de areia, usinagem CNC, etc. são utilizados, a depender do material, para garantir a qualidade superficial da peça. A etapa de pós-processamento visa eliminar imperfeições que possam vir a interferir nas propriedades durante seu uso e em possíveis desgastes em sua geometria.

Neste trabalho, o laboratório optou por realizar a usinagem CNC de torneamento para o acabamento superficial do flange metálico. O torneamento consiste no deslocamento linear e rotacional da peça, torneando-a até o diâmetro escolhido e faceando-a até o comprimento desejado. Na Figura 23 são apresentados o flange a peça na deposição (a) e o flange após usinagem (b).

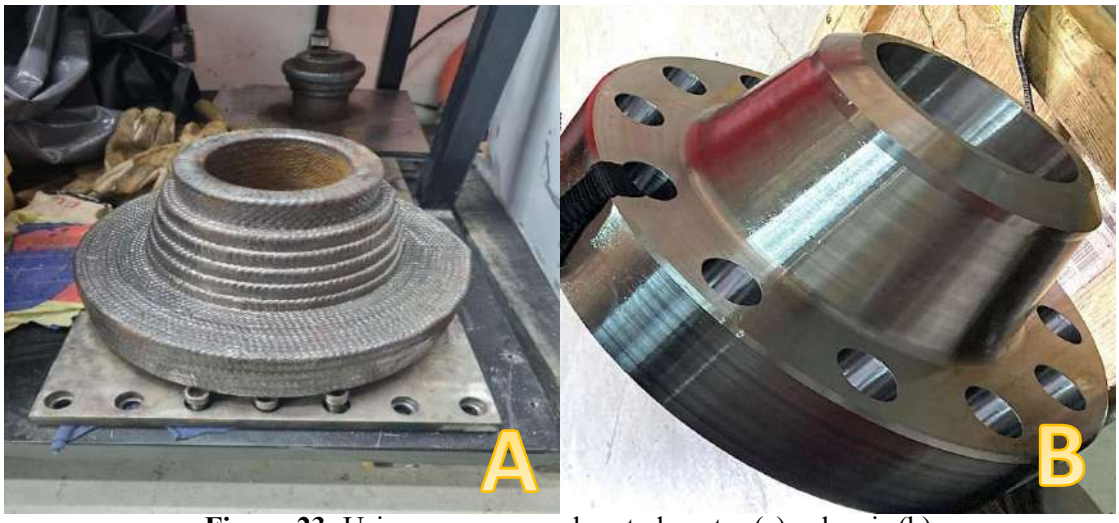


Figura 23: Usinagem na peça do estudo antes (a) e depois (b).
Fonte: O Autor, 2025.

Dois equipamentos foram utilizados para a finalização da peça, sendo eles o CENTUR 50 para o torneamento e o D-1250 para a confecção dos furos de encaixe, ambos da empresa ROMI S.A. O equipamento de torneamento CNC CENTUR 50 é utilizado para peças cilíndricas de 70 cm de diâmetro e até 5 metros de comprimento, operando no pós-processamento para ambas manufaturas (ROMI, 2024). Seu modelo se encontra na Figura 24 a seguir.



Figura 24: Torneadora CNC CENTUR 50 utilizada para o pós-processamento.
Fonte: ROMI, 2024.

Algumas características para os cálculos incluem sua tensão de 380 V e corrente de 61 A e do motor de 33 A rotacionando em uma velocidade de até 1000 RPM. Uma vez que a peça saia da etapa de forja ou de deposição, é apoiada em uma placa com 4 castanhas (travas), onde o cabeçote rotaciona, torneando a peça (ROMI, 2024).

A outra etapa da furação dos encaixes foi realizado pelo D-1250, apresentado na Figura 25, também utilizado nas duas manufaturas, posteriormente ao CENTUR 50. Suas características relevantes incluem a tensão de 220 V com corrente de 78,8 A e do motor 47,2 A. Para a realização dos furos a mesma rotaciona a 6000 RPM peça (ROMI, 2024).



Figura 25: Furadeira D-1250 CENTUR 50 utilizada para o pós-processamento.
Fonte: ROMI, 2024.

4.3.6.1 – Cálculos dos indicadores ambientais do Pós-Processamento

Os cálculos dos tópicos propostos serão utilizados a metodologia do modelo de PRIARONE (2019). Para a etapa de substrato e unidade de pós-processamento, três equações serão utilizadas, dentre elas: a energia elétrica demandada para o equipamento nas fases de *standby* (modo de espera), corte e troca de modo operacional; da energia requirida pelo processo; e da geração de CO_2-eq do equipamento durante seu uso.

Para calcular a energia consumida foi necessário o conhecimento da energia específica consumida (SEC) e da energia de demanda. O SEC foi obtido pelo equipamento e para calcular a energia de demanda foi utilizada a metodologia proposta por PRIARONE (2019), conforme a Equação 6.

$$E_{MT} = P_{stb} \times T_s + \sum_{i=1}^{n}(SEC_i^M \times M_{Ci} + P_{stb} \times t_{tci} \times \frac{t_{ci}}{T_i}) \quad (6)$$

Onde:

P_{stb}: Gasto energético do equipamento em *standby* (kW);

T_s: Tempo de preparação, fixação, e descarga da peça (h);

SEC: Consumo específico de Energia durante o corte (kWh/kg);

M_{Ci}: Massa do material a ser removido (kg);

t_{tci}: Tempo de mudança de ferramentas (h);

tc_i: Tempo de corte (h)

t_i: Tempo de vida útil da ferramenta (h).

A fração t_c/T_i quantifica o número de trocas que devem ser executadas enquanto o equipamento estiver em *standby*, ou seja, o tempo deve ser calculado em relação a cada troca realizada no equipamento. Com a energia de demanda calculada, foi aplicado à equação de demanda energética, a fim de encontrar o valor final da energia gasta em todas as etapas do pós-processamento. A Equação 7 representa a demanda energética do processo em MJ.

$$E^M = \frac{3,6}{N} \times E_{MT} + \sum_{i=1}^{n}(E_{tool} \times \frac{t_{ci}}{T_i}) + E_{lub} \times q_L \times t_c \quad (7)$$

Onde:

E_{MT}: Energia de demanda (kWh);

N: Coeficiente de conversão de energia elétrica em primaria;

E_{tool}: Energia incorporada da ferramenta de corte (MJ);

E_{lub}: Energia incorporada do fluido de corte (MJ/kg);

q_L: Taxa de consumo do fluido de corte (kg/h);

A Equação 7 tem um fator de 3,6 / N que foi utilizado para corrigir a demanda de energia do equipamento em quilowatts por hora (kW/h) para a energia primária em mega joules (MJ). Com a energia de demanda calculada na Equação 6 (E_{MT}), foi possível calcular a emissão de CO_2 (ou pegada de carbono), descrita na Equação 8.

$$CO_2^{Machining} = CES \times E_{MT} + \sum_{i=1}^{n}(CO_{2tool} \times \frac{t_{ci}}{T_i}) + CO_{2lub} \times q_L \times t_c \qquad (8)$$

Onde:

CES: Assinatura de Emissão de Carbono do sistema de rede elétrico ($kgCO_2/kWh$) (definido como 74 por referência do autor);

CO_{2tool}: Pegada de carbono da ferramenta de corte ($kgCO_2$);

CO_{2lub}: Pegada de carbono do fluido de corte ($kgCO_2/kg$).

Os valores para os processos de torneamento e furação foram fornecidos pelo laboratório LNTSOLD. Entretanto, embora o cálculo tenha sido realizado utilizando as equações desta etapa, seus valores energéticos e de emissões não puderam ser disponibilizados, uma vez que tais diretrizes foram utilizadas pelos mesmos em um projeto para uma empresa de combustíveis privada. É possível dizer que o tempo de funcionamento da torneadora foi de 4 horas e o de furação de 10 horas para ambas as peças.

Para o cálculo de resíduos, será necessário realizar uma operação matemática básica, considerando a massa inicial antes do processo de torneamento, reduzindo-a da peça após o torneamento e furação, em quilogramas. Considerando o peso da peça desde o início da ACV até esta etapa, é possível se obter o valor total do quanto foi perdido durante todas as etapas de produção e manufatura.

5 – Resultados e discussões

Neste capítulo serão comparados e analisados os resultados obtidos das etapas das manufaturas do berço ao portão. Uma divisão em quatro tópicos abordará os temas e cálculos do consumo energético (item 5.1), das cargas de emissões atmosféricas (item 5.2), resíduos gerados (item 5.3), discussões e possíveis mitigações a serem adotadas para reduzir os impactos ambientais negativos (item 5.4).

A justificativa dos valores encontrados segue suas metodologias utilizadas, comparados com os valores obtidos nas fontes bibliográficas, experimentos, normas nacionais e internacionais, a fim de confirmar os cálculos realizados. É importante ressaltar que tais justificativas para a escolha dos modelos de manufatura mais otimizada, foram baseadas no grau de impacto e condições de cada etapa.

5.1 – Aspectos energéticos

O gasto energético da etapa 1 (extração do material) das duas manufaturas foi o mesmo, pois o processo de extração do metal é comum as duas, tendo suas diferenças na produção na etapa seguinte. Para o cálculo foram considerados os componentes da biblioteca ECOINVENT 3.11, considerando a metade da massa produzida pelo Forno de Explosão à Oxigênio (BOF) e a outra metade pelo Forno de Arco Elétrico (EAF). O valor final encontrado foi de 4.694,62 MJ.

Como descrito na metodologia, o material AWS ER90S-B3 é um aço de baixa liga com presença de carbono em sua composição, sendo necessária a adição de minérios de ferro. Dessa forma, o EAF consegue produzir parte da porcentagem de minério presente no metal atuando na queima das sucatas e reciclados, enquanto o BOF lida com o minério em seu estado bruto. O *World Steel Association* (WSA) em seu relatório de 2023, utiliza o cálculo energético de emissões com ambos os fornos como contribuintes dos impactos.

Entretanto, a energia consumida não é exclusivamente dos fornos, necessitando de energia de média voltagem para o funcionamento dos equipamentos e maquinário de extração e baixa voltagem para operações auxiliares, tais como consumo geral da planta, iluminação das instalações, bombeamento, aquecimento, compressores, engenharia geral e manutenção. O uso elétrico de baixa tensão segundo a biblioteca varia em uma tensão de 60V e 120V, levando em conta o valor relatado nas instalações das regiões adotadas.

Para a etapa 2 (laminação a quente), a demanda de energia utilizada para fabricar as placas da manufatura convencional e as barras da manufatura aditiva foram diferentes. Devido a geometria e volume das barras serem menores, estas não precisam passar por mais processos de reaquecimento em relação as placas, reduzindo a demanda energética para reaquecer o metal. Na a produção das placas, durante a manufatura convencional, foi utilizado o software SIMAPRO e obtido o valor de 6.801,87 MJ.

Para a MA foram considerados os fornos que requerem um consumo de energia para reaquecimento entre 15 - 20%, e 70% do consumo de energia para laminação a quente (KE, 2014). Considerando neste trabalho a redução de 30% de energia para reaquecimento na laminação a quente, é necessária para encontrar a porcentagem acima do valor energético das placas (6.801,87 MJ), o consumo de energia das barras é encontrado reduzindo a porcentagem citada, encontrando o valor de 4.761,31 MJ.

Este estudo determinou o total de 11.496,494 MJ de energia requerida nos estágios do "berço". Para fins de comparação, SWORD (2023) encontrou a energia requerida total de aproximadamente 15.400,00 MJ das fazes de extração e laminação. A diferença se encontra no metal utilizado sendo o titânio, o qual requer mais processos de tratamento em comparação ao metal de baixa liga ER-90, consequentemente requerendo mais energia. Os valores atualizados da biblioteca ECOINVENT 3.11 demonstram a comparação com as referências anteriores e dos cálculos realizados no software confirmam os valores encontrados.

Na etapa 3 (forjamento) da MC, foi utilizado o modelo de YUSUF (2019) e o valor gasto para a produção energética foi de 45,01 kWh/kg, conforme apresentado na metodologia para o cálculo dos indicadores ambientais. Somando a energia para o aquecimento das etapas (430º C, 480º C e 530º C), da aplicação de pressão em cada fase da forja (350 KN), além do modo ocioso do maquinário, foi obtido um consumo de 36.782,17 MJ para os 227,0 kg de material produzidos na etapa anterior.

Este valor elevado em relação as etapas anteriores são derivadas da demanda superior de aquecimento, e pela pressão exercida pelo equipamento para moldar a peça em molde fechado, ambos por um período de 6 horas. A fim de confirmar tal valor, foi realizado um processo semelhante no SIMAPRO, utilizando a biblioteca de fundição. Essa foi utilizada devido as suas condições de aquecimento serem semelhantes às de forja, encontrou-se o valor demonstrando um gasto energético próximo de 38.601,0 MJ.

As etapas 4 (MC) e 7 (MA) de pós-processamento, a demanda de energia foi calculada a partir do modelo de PRIARONE (2019), onde as peças foram colocadas nos equipamentos de torneamento e furação, com diferentes dimensões, devido a quantidade de perda de material das respectivas manufaturas. Tal justificativa foi apresentada nos cálculos da geração de resíduos. O consumo encontrado na MC foi de 3.832,0 MJ, enquanto na MA 957,1 MJ. Pode ser observado que o pós-processamento da MC (etapa 4) foi superior, uma vez que necessitou de quantidade de energia para realização da usinagem CNC de torneamento e furação devido as inconsistências da geometria apresentada nas peças finais. Esta demanda transformou, no mesmo volume, na peça final desejada, para serem utilizadas de acordo com suas especificações.

Na etapa 5 (trefilação) ocorreu somente uma deformação física do metal, estreitando seu diâmetro da barra para os 1,2 mm necessários para o encaixe no equipamento de MAAA. Geralmente tendo o aquecimento na etapa muito baixo ou inexistente, naturalmente demanda-se menos energia dentre os demais processos. Utilizando o SIMAPRO e a mesma quantidade de metal na etapa 3, foi obtido 3.541,2 MJ de demanda de energia.

A etapa 6 (manufatura aditiva) obteve-se os cálculos realizados a partir da equação de PRIARONE (2019), conforme apresentado na metodologia e os dados fornecidos pelo equipamento robótico KUKA e do Solid Works 3D do laboratório de soldagem LNTSOLD da Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. O consumo total de energia utilizado na MC e MA são apresentados na Tabela 9 e visualmente no Gráfico 1 a seguir, demonstrando o valor do consumo energético total da MC de 52.110,67 MJ, enquanto na MA foi de 18.846,61 MJ.

Manufatura Convencional (MC)	**Energia (MJ)**	**Manufatura Aditiva (MA)**	**Energia (MJ)**
Etapa 1 MC	4.694,6240	Etapa 1 MAAA	4.694,6240
Etapa 2 MC	6.801,8700	Etapa 2 MAAA	4.761,3090
Etapa 3 MC	36.782,1720	Etapa 5 MAAA	3.541,2000
		Etapa 6 MAAA	4.892,3800
Etapa 4 MC	3.832,0000	Etapa 7 MAAA	957,1000
TOTAL	**52.110,6660**	**TOTAL**	**18.846,6130**

Tabela 9: Valores energéticos das manufaturas convencional e aditiva.
Fonte: O Autor, 2025.

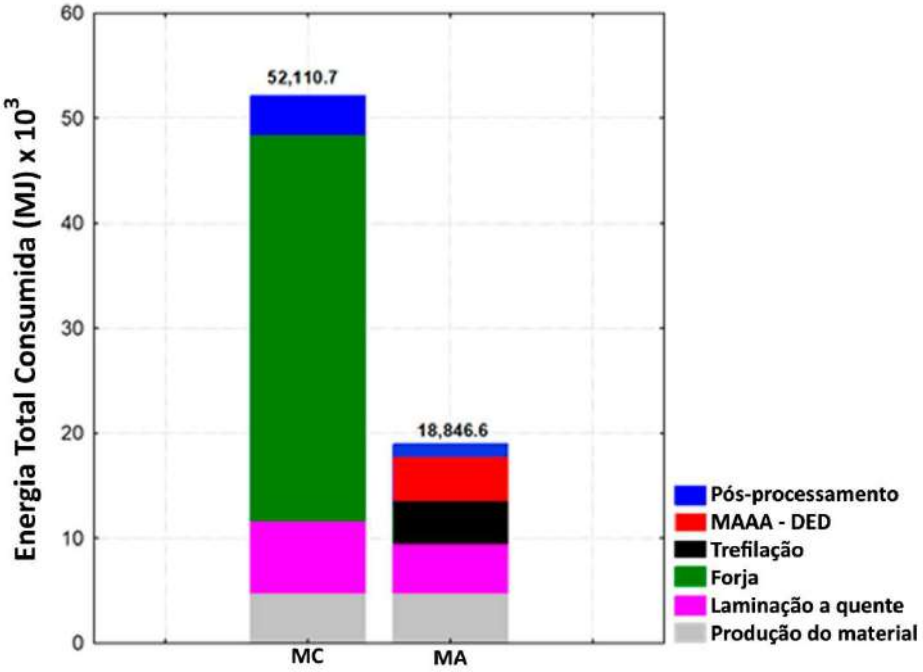


Gráfico 1: Consumo energético total das manufaturas convencional e aditiva.
Fonte: O Autor, 2025.

Observa-se na ACV que o maior consumo de energia na produção convencional está no processo do portão ao portão, responsável por aproximadamente 78% do consumo total de energia, sendo que o forjamento apresenta o maior consumo de energia. Esse valor elevado em relação aos estágios anteriores, novamente, se deve à maior necessidade de aquecimento e à pressão exercida pelo equipamento para formar a peça em um molde fechado. O segundo estágio que consome mais energia (laminação a quente) envolve o aquecimento e a formação do material a ser moldado na forma desejada, que é então reaquecido e prensado, mas sem o mesmo nível de força e temperatura prolongada.

Na MA o consumo de energia do portão ao portão foi de 50% do total das etapas. Ao comparar a MC com a MA na produção em si, a forja consumiu mais energia do que seu comparativo (MAAA). Esse resultado se deu principalmente à necessidade de mais processos de aquecimento e força cinética aplicada à peça em uma ampla área, já que a manufatura aditiva visa a economia de mais energia usando a precisão da deposição camada por camada na ponta de sua tocha, em vez do uso de fornos e prensas, reduzindo em grande escala a área de aquecimento.

Durante o estágio principal de manufatura de ambas quando comparadas, observou-se que a forja (estagio 3) consumiu 86,7% mais energia que a MAAA (estágio 6). A ACV justificou este resultado referenciando a maior energia demandada e força

cinética aplicada na forja, em comparação com a MAAA, demonstrando que a mesma conserva mais energia utilizando a precisão da deposição camada-por-camada em comparação com o uso de fornos e prensas. O arame é depositado na máquina de impressão utilizando uma fonte de calor focada na ponta de sua tocha, onde não existe a necessidade de aquecer toda a superfície do fio.

Adicionalmente, desde que a MC requer maior número de cortes do bloco inicial do metal, e a MA apenas imprimiu com mínimo de cortes necessários (gerando menos resíduo de material), utilizando um menor acervo de equipamentos e etapas, e necessitando de um polimento quando necessário, resultou em uma redução ainda maior no consumo de energia nos estágios de pós-produção.

Tais resultados implicam que a MC obteria uma energia suficiente para gerar o equivalente a três peças produzidas na MA. Embora o tempo de fabricação da forja seja 55 horas mais rápido, considerando que a forja necessite de 36.782,17 MJ enquanto na MAAA apenas 4.892,38 MJ, é possível se obter sete robôs da MAAA operando ao mesmo tempo, para se obter um número maior de peças com quase a mesma energia demandada na forja.

A ACV no quesito de impactos ambientais revelou que a energia consumida da manufatura aditiva foi reduzida em 63,8% comparada com a convencional, confirmando a escolha da MA. Em outras palavras, quanto maior a energia consumida, maior o combustível utilizado e consequentemente maior o custo para suprir tal energia para os processos de manufatura. Outro impacto seria a geração dos gases do efeito estufa que são emitidos na atmosfera pelos equipamentos, onde os mesmos impactos serão descritos no tópico a seguir e suas respectivas medidas mitigadoras.

5.2 – Aspectos das emissões atmosféricas

Para validar os resultados foram utilizadas duas metodologias para as emissões atmosféricas no estágio 1 (extração de material), sendo a primeira o ECOINVENT 3.11 e a segunda o relatório dos Indicadores de Sustentabilidade da Produção de Metais (WSA, 2023). Usando a mesma massa de material para ambos os métodos, o valor encontrado foi o mesmo de 509,47 $kgCO_2$-eq, confirmando o valor encontrado pelo cálculo do software.

Essa etapa envolveu o uso de equipamentos que requerem combustíveis fósseis, como escavadeiras, tratores, perfuratrizes, caminhões de transporte de minério e outros. O minério era então transportado para as usinas de processamento, onde passava pelos fornos BOF e EAF e pelos processos de flotação, britagem e peneiramento, entre outros. Nessa etapa, também foi considerado que as usinas necessitavam de energia para iluminação e funcionamento dos galpões e equipamentos auxiliares e, de acordo com a biblioteca consultada, era utilizado gás natural.

Alguns dos principais compostos químicos liberados durante a totalidade dessa etapa foram: Óxidos de nitrogênio, material particulado (MP) 2,5 μm e > 10 μm, benzeno, chumbo, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e hidrocarbonetos aromáticos (PAH). O software também considera uma boa quantia liberada de mercúrio em seu estado gasoso, embora não tenha informado a origem. É suposto que seja derivado dos processos de peneiração que utilizam tal metal.

No estágio 2 (laminação a quente), foi utilizada a biblioteca do software SIMAPRO e foram encontrados 82,1 kgCO_2-eq para a MC e, considerando a redução de 20% da energia para reaquecimento na MA, o valor de emissão foi de 65,68 kgCO_2-eq para a MA. Esse estágio requer mais energia porque o equipamento usado no laminador consome muita energia para aquecimento até a temperatura de deformação do metal.

A metodologia de YUSUF (2019) foi usada para calcular as emissões no estágio 3 (forjamento). Em seus dados coletados de experimentos de forjamento, foi usada uma média de emissões de CO_2 por quilograma. Na realização dos experimentos, o autor utilizou um programa estatístico com o método ANOVA, que é usado para testar as diferenças entre duas ou mais médias, para garantir a proximidade dos resultados encontrados na forja. Usando sua média, o valor encontrado foi de 35,59 kgCO_2-eq/kg.

Considerando que a massa do material nesse estágio era de 227,0 kg, a carga de emissão foi de 8.078,93 kgCO_2-eq. Inicialmente, esse valor teria sido considerado um outlier em relação às outras emissões encontradas, mas ao executar simulações no SIMAPRO com valores próximos aos das bibliotecas disponíveis, observou-se que a taxa de emissão era de fato alta. Na etapa 4 da MC (pós-processamento), foram utilizados os cálculos propostos por PRIARONE (2019) e o valor obtido foi de 383,2 kgCO_2-eq.

A partir dos resultados do CO_2-eq da MC, pode-se observar que o estágio de forjamento emite a maior pegada de carbono, cerca de 89,2% do total emitido durante a

produção da peça. Isso pode ser explicado pela quantidade de resíduos gerados nas etapas de fabricação e sua consequência da necessidade de maior remoção de cavacos na etapa de pós-produção. Os resultados obtidos para as emissões de CO_2-eq das manufaturas são apresentados na Tabela 10 e visualmente no Gráfico 2.

Manufatura Convencional (MC)	Energia (MJ)	Manufatura Aditiva (MA)	Energia (MJ)
Etapa 1 MC	509,47	Etapa 1 MAAA	509,47
Etapa 2 MC	82,10	Etapa 2 MAAA	65,68
Etapa 3 MC	8.078,93	Etapa 5 MAAA	75,40
		Etapa 6 MAAA	193,75
Etapa 4 MC	383,20	Etapa 7 MAAA	20,19
TOTAL	**9.053,70**	**TOTAL**	**864,49**

Tabela 10: Valores de emissões das manufaturas convencional e aditiva.
Fonte: O Autor, 2025.

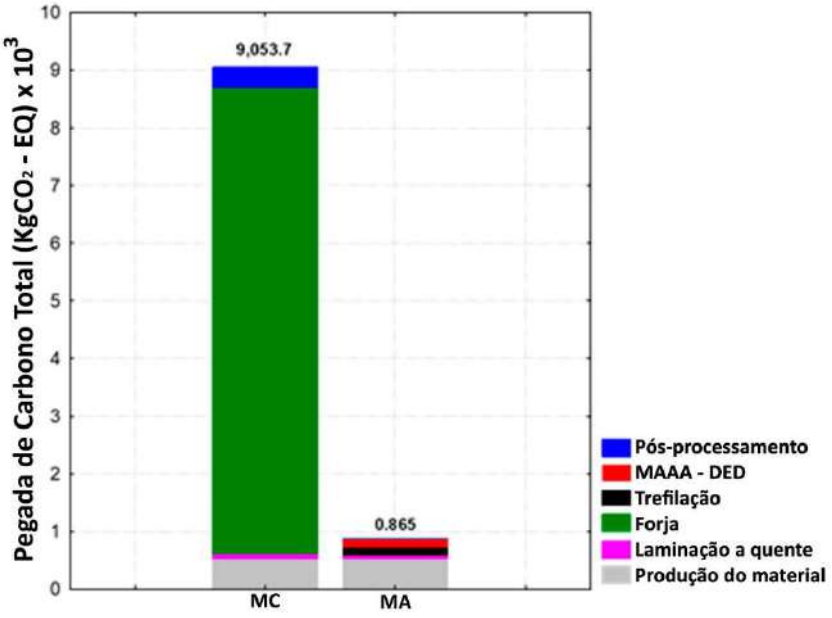


Gráfico 2: Emissões atmosféricas totais da manufatura convencional e aditiva.
Fonte: O Autor, 2024.

Na etapa 5 (trefilação), o cálculo encontrado no software para os 227,0 kg resultou em uma emissão de 75,4 kgCO_2-eq. O equipamento e as instalações utilizaram gás natural para operar e esse valor também foi adicionado à produção da barra. Para o estágio 6 (MAAA) e 7 (pós-processamento) da MA, foi utilizada a equação de PRIARONE (2019), que resultou em 383,2 kg (estágio 4), 193,75 kgCO_2-eq (estágio 6) e 20,19 kgCO_2-eq (estágio 7). A justificativa da comparação dos estágios de pós-processamento (Etapa 4 e 7) serem tão discrepantes, se dá ao fato de que a geometria da peça na MC necessita de

mais tempo de torneamento para chegar à geometria desejada, devido as suas inconsistências durante o forjamento.

A forja (estágio 3) foi o maior responsável pelas emissões de CO_2-eq em torno de 89,23% do total de emissões durante a produção. Os processos de aquecimento foram mais intensos nesta etapa em relação ao aos estágios do berço-ao-portão. Comparado com a MAAA, as emissões foram 97,60% maiores, demonstrando a viabilidade da MA sem o uso direto de combustíveis fósseis.

Os resultados obtidos na MA mostraram que a maior pegada de carbono durante a produção da peça foi do berço ao portão, com a produção da matéria-prima (estágio 1) sendo responsável por 58,93% de todas as emissões de CO_2-eq no processo. Quando avaliado do portão ao portão, a MAAA (estágio 6) foi apresentada como o maior contribuidor das emissões de CO_2-eq na MA, principalmente pelos cilindros de gás de proteção. Foram usados seis cilindros, cada um contendo uma mistura de argônio e dióxido de carbono, 92% e 8% v/v, respectivamente. Embora o argônio não seja um gás de efeito estufa (GEE), o valor encontrado não se refere apenas ao processamento do argônio, mas ao processo de produção do gás de proteção.

É importante ter em mente que quando foi calculado os valores de emissões utilizando a biblioteca do software como referência, não apenas os materiais e metodologia foram considerados, mas também as constantes da rede mundial de energia, em especial o uso de usinas termelétricas. O estudo considerou a média global, mas caso os cálculos fossem realizados em um país com uma energia predominantemente renovável (Brasil por exemplo) as emissões GEE de ambas as manufaturas seriam inferiores aos resultados apresentados.

5.3 – Aspectos residuais

No estágio 1 (extração de material), a geração de resíduos não foi considerada para os dois fabricantes, pois o software considera apenas as emissões e a energia da peça que serão utilizadas, e o material excedente será usado em outros processos. Mesmo que o software presuma que há geração de resíduos, eles seriam reciclados ou reutilizados em uma nova extração, pois o material extraído não é perdido para reutilização. Usando SWORD (2023) e PRIARONE (2019) como exemplos, eles afirmam que mesmo que emissões e/ou resíduos sejam gerados no estágio inicial da produção de matéria-prima,

eles não são perdidos. Para esta ACV, é considerado resíduo qualquer massa de material que seja descartada ao longo dos processos.

Durante a coleta de dados, a quantidade de material usado pelos fabricantes foi de 227,0 kg. Para entender a quantidade de metal antes desses estágios, o SIMAPRO foi usado para calcular o desperdício de 1,0 kg de metal ER-90. Para cada 1,0 kg de metal produzido no laminador a quente, houve uma perda de 0,149 kg. Portanto, o metal remanescente para produzir os 227,0 kg restantes no final desse estágio, conforme calculado pelo programa, foi de 266,74 kg. A aplicação desse valor à perda de 0,149 kg por quilo resulta em uma perda de 39,74 kg nesse estágio.

De acordo com estudos de RAJ (2020) e ASM (1996), a perda média de metal no processo de forjamento (estágio 3) está entre 10 e 15%. Considerando que a massa nesse estágio é de 227,0 kg e que a porcentagem média de perda assumida pela ASM é de 12,5%, a porcentagem foi aplicada à massa inicial e obteve-se 28,375 kg restantes, restando 198,63 kg. Como se trata de uma estimativa, é possível que a perda tenda a ser maior ou menor pelo percentual considerando o valor encontrado, mas durante essa e outras etapas, o metal sempre pode ser facilmente reutilizado ou reciclado.

No pós-processamento da MC (estágio 4), a peça forjada foi usada para fresamento e a soma dos processos de usinagem CNC foi levada em conta para determinar o resíduo gerado. Com um valor inicial de 198,63 kg nesse estágio, 140,03 kg de cavacos foram removidos pelo torneamento e pela perfuração da peça, resultando em um valor final para a peça de 58,6 kg; o total de material perdido durante o processo de CM de porta a porta foi de 168,405 kg.

No estágio 5 (trefilação) da MA, a massa foi de 227,0 kg. Conforme explicado acima, a massa foi considerada a mesma no início de ambos os processos, o que facilitou a visualização da geração de resíduos do portão ao portão na MC e na MA. O software usando a mesma biblioteca encontrou uma perda de 34,0 kg, restando 193,0 kg de fio disponível para o próximo estágio.

Na etapa 6 (MAAA) os valores de substrato de 30,9 kg e a massa de arame de 95,8 kg foram usados para impressão, resultando em um total de 126,7 kg. Foi observada a ausência de 66,3 kg dos 193,0 kg restantes da trefilação. O equipamento calculou que apenas 126,7 kg eram necessários para montar a peça, portanto, esse material “faltante” foi considerado excedente e não resíduo.

A diferença entre o excedente e o resíduo se deve ao fato de que o resíduo deve ser reciclado ou reutilizado e precisa passar por novos processos de aquecimento e conformação para ser reintroduzido na produção de metal, enquanto o primeiro pode ser reutilizado nesse estágio sem precisar passar pelos processos anteriores. A deposição da MAAA teve uma perda minúscula em comparação com todos os outros processos, onde apenas 2,6 kg de material residual foram gerados. Essa perda levou em conta tanto o substrato quanto a massa do fio usado.

O estágio 7 (pós-produção) da MA, segundo dados do laboratório, apresentou uma perda de 66,0 kg, com uma massa final pesada de 58,1 kg. Esse valor foi menor do que o do estágio 4 da MC, justificando a quantidade de resíduos gerados em comparação com a MC e a soma dos valores de perda para desenho e fabricação. A Tabela 11 e o Gráfico 3 mostram os resíduos gerados pelas duas operações de fabricação do berço ao portão.

Manufatura Convencional (MC)	Energia (MJ)	Manufatura Aditiva (MA)	Energia (MJ)
Etapa 1 MC	0,000	Etapa 1 MAAA	0,000
Etapa 2 MC	39,740	Etapa 2 MAAA	39,740
Etapa 3 MC	28,375	Etapa 5 MAAA	34,000
		Etapa 6 MAAA	2,600
Etapa 4 MC	140,030	Etapa 7 MAAA	66,000
TOTAL	**208,145**	**TOTAL**	**142,340**

Tabela Z: Valores residuais das manufaturas convencional e aditiva.
Fonte: O Autor, 2025.

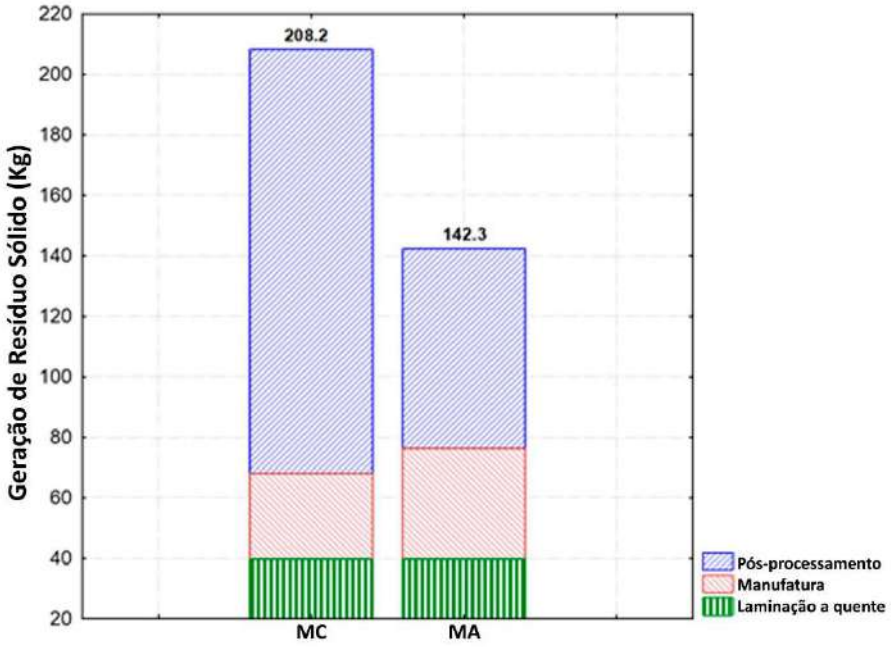


Gráfico 3: Resíduos totais da manufatura convencional e aditiva.
Fonte: O Autor, 2024.

A quantidade de resíduos gerados durante a laminação foi a mesma em ambos os fabricantes, pois não houve perdas significativas ao formar a mesma massa de barras e placas. Nos processos de fabricação, a MA produziu 22,74% a mais na MC. O estudo de ACV identificou um valor de 34 kg para a trefilação, excedendo os valores da forja (28,375 kg) e MAAA (2,6 kg). A perda de material durante a trefilação foi causada pelo atrito gerado no processo e pela correção de áreas oxidadas durante a impressão na MAAA, observado na Figura 26 a seguir.



Figura 26: Região de impressão afetada por oxidação antes (a) e depois de lixado (b).
Fonte: O Autor, 2024.

Entretanto, a diferença na geração de resíduos entre o estágio 4 da MC e o estágio 7 da MA é de 52,86%, o que consolidou o uso da MA. Isso ocorreu devido a formação da superfície da peça após o forjamento (estágio 3) exigiu processos adicionais de remoção por torneamento, gerando ainda mais resíduos. A redução do tamanho impresso e forjado para o tamanho original determinado do flange contribuiu para uma geração maior de ambas manufaturas.

Desconsiderando a quantidade de resíduos gerados na etapa de laminação dos dois fabricantes, obtivemos uma maior geração de resíduos na MC, ou seja, 66,2 kg a mais de material do que na MA. Todos os metais podem ser reciclados e reutilizados nos outros estágios para processos futuros. Se eles se enquadrarem na categoria de metal reciclado, serão enviados para o reator EAF para serem reintroduzidos no ciclo de vida. Um estudo da produção da peça mostra que a possibilidade de usar menos metal inicial nos estágios de produção poderia reduzir a geração de resíduos e, consequentemente, os requisitos de energia e as emissões dos processos estudados.

Os fatores a serem considerados no consumo de materiais usados na AM incluem o fato de que nem todos os materiais são encontrados no estágio final do processo e que parte da impressão da peça é o suporte para ela, onde é removido ou dissolvido manualmente, levando a uma perda de recursos.

No entanto, o metal residual obtido dos dois processos de fabricação poderia ser usado em dois modelos de reutilização de materiais, a saber, a Economia Circular (EC) e a Simbiose Ambiental (ES). A EC se baseia nas fases de extração, produção, uso e descarte, com o objetivo de reutilizar os resíduos do estágio 1, os fornos BOF e EAF, após o metal ter sido limpo e triturado.

O outro modelo seria o ES, que buscaria a cooperação entre empresas para que os resíduos produzidos por uma pudessem servir de matéria-prima para outra. O objetivo dessas medidas seria reduzir quase completamente os resíduos gerados em cada estágio e economizar energia e custos reutilizando a maior quantidade possível de metal.

5.4 – Discussões gerais

Após compreender os impactos e necessidades das manufaturas, é possível mitigar os efeitos negativos gerados pelas mesmas, considerando novas propostas em suas etapas. A ideia da ACV vai além das tomadas de decisões de quais etapas devem ser alteradas, também possuindo grande influência na abordagem dos processos que fazem parte do todo. Questões como a composição da malha energética utilizada, uso de combustíveis fósseis nos equipamentos e instalações, destino dos resíduos gerados, programas de reaproveitamento de matéria-prima, etc. devem ser analisados a fim de propor medidas mitigatórias para a redução da demanda energética, das emissões e resíduos segundo um modelo mais sustentável.

5.4.1 – Malha energética

A malha energética global utilizada pela biblioteca do software levou em conta o tipo de usinas elétricas de países como Estados Unidos, China, Índia, alguns membros da União Europeia, etc. Estes possuem a malha energética baseada principalmente em carvão, às natural e petróleo, sendo utilizados de seus dados energéticos para o estudo de caso. Devido a esses combustíveis fósseis representarem uma grande parcela da energia total demandada, consequentemente as emissões são mais impactantes na atmosfera, em comparação com países de geração majoritariamente limpa (IPCC, 2023).

O Brasil possui uma matriz energética renovável de 49,1% em 2021, e elétrica de 84,8% no mesmo ano. A matriz elétrica representa a geração de eletricidade por usinas em geral, enquanto a energética é voltada para o abastecimento de residências e veículos (EPE, 2023). O uso da energia renovável gerada pelo cenário brasileiro, em comparação com o cenário global apresentado, as emissões atmosféricas caso utilizasse apenas a matriz elétrica nacional, obter-se-ia uma redução significativa.

O SIMAPRO se baseia no uso geral dos combustíveis totais utilizados pelos países dentro do grupo da biblioteca "restante do mundo" (RoW). Tais combustíveis fósseis consequentemente adentram a equação e elevam os valores de CO_2-eq. Mesmo que os países citados possuam projetos para a adoção de energias verdes, apresentem tecnologias limpas e alternativas de combustíveis menos impactantes, se encontram na lista dos maiores poluidores da atualidade (IEA, 2025).

Visando projetos propostos pela Conferência das Partes em Dubai (COP-28, 2023), os países se comprometeram a adotar medidas para otimizar o desenvolvimento sustentável das indústrias e manufaturas, juntamente com novos sistemas que utilizem energias limpas. Investimentos na sustentabilidade distanciam os países das dependências dos recursos fósseis, alavancando a economia e reduzindo os poluentes dentro dos prazos acordados pela agenda da COP-28.

Infelizmente políticas adotadas na COP-29, indicaram que países industrializados responsáveis pelas maiores emissões até o momento, não estão desejando se comprometer a auxiliar países subdesenvolvidos, os quais utilizam derivados de petróleo e não possuem muitos investimentos em energias renováveis. Com a saída de alguns países do Acordo de Paris e a falha para a manutenção de um fundo de desenvolvimento sustentável, tais políticas podem vir a demorar para serem efetivadas no futuro.

5.4.2 – Combustíveis dos equipamentos

Na etapa 1 os veículos pesados como escavadeiras, britadores, caminhões basculantes, retroescavadeiras, etc. utilizam combustíveis fosseis como o diesel e gasolina. Segundo a Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis da EPE (2024), a adoção de combustíveis menos poluentes, como o biodiesel, etanol, biogás e misturas no diesel e gasolina são alternativas viáveis pelos projetos emergentes no Brasil e no mundo.

Deve-se considerar que caso a mudança de combustíveis seja realizada nos veículos, o nível das emissões de GEE iriam reduzir a depender do combustível utilizado. Entretanto algumas empresas não possuiriam condições de substituir seus maquinários para adotar esta via sustentável, por isso a escolha de combustíveis sintéticos (*e-fuels*), sendo uma solução ainda em análise. Estes são provenientes de hidrocarbonetos sintetizados por hidrogênio, produzido por eletrólise da água, e CO_2 capturado de fontes fosseis ou atmosféricas (UECKERDT, 2021).

Segundo UECKERDT (2021) mesmo que haja uma redução considerável pelo uso dos *e-fuels* sua estimativa de redução das emissões ainda é frágil e incerta, além do custo elevado de fabricação devido a conjuntura da tecnologia no momento ser recente. A garantia do custo benefício ainda se mostra incerta. Mesmo que o autor cite que a eletrificação veicular seja uma alternativa viável a curto prazo, o estudo é voltado para veículos rodoviários e não de maquinário pesado.

Ao se converter o maquinário de extração em elétrico, a necessidade de grandes quantidades de lítio e de adaptações para este modelo são desafios a serem considerados (HARPER, 2019). A carga energética e o elevado número de baterias que um veículo pesado de mineração necessitaria, em teoria, para seu funcionamento poderia vir a elevar a magnitude dos impactos ambientais negativos, pois a necessidade da extração do lítio, o planejamento do descarte e/ou reutilização das mesmas e a logística do descarte em massa na troca de baterias, são consideradas ideias complexas. Logo tal alternativa se torna inviável para o cenário de mineração proposto.

No processo de forno de oxigênio para iniciar seu aquecimento geralmente se utiliza uma concentração de carvão coque, sendo um subproduto do carvão mineral, derivado da queima do mesmo sem oxigênio. Suas concentrações variam a depender da carga de metal a ser transformada para as etapas seguintes, porém existem processos que podem dosar o uso do coque a fim de reduzir a carga de CO_2 emitida (ZHANG, 2021).

Segundo GUIMARÃES (2017) o uso de filtros nas industrias são um dos meios mais antigos e efetivos para coletar partículas poluentes de 0,1 μm e substancialmente de 0,01 μm. Para sua instalação deve-se considerar o tamanho e capacidade do equipamento, tipo de tecido em relação ao poluente (fibra de vidro, carvão ativado, arame de aço, tecido, etc.) mecanismos de limpeza do filtro e vida útil. Para fornos e forjas que operam a altas

temperaturas, o filtro recomendado para filtrar CO_2 e materiais particulados seria o de fibra de vidro ou sílica de alta pureza revestida.

Comentando acerca das manufaturas e indústrias, existem alguns ramos que necessitam aquecimento em seus processos, como por exemplo o gás natural ou gás liquefeito de petróleo (GLP), biomassa, eletricidade, indução etc. É importante mencionar que em alguns casos, a escolha da forja e de seu respectivo combustível tende a variar a depender do tipo de material e de sua quantidade a ser processado. Na etapa 2 (laminação) o aquecimento das indústrias geralmente é utilizado indução, sendo uma alternativa menos poluente que o GLP ou biomassa por exemplo.

Na etapa 3 (forjamento) existem forjas que utilizam carvão, óleo diesel, gás natural, biomassa, GLP e algumas com fornos elétricos. O uso do GLP é uma alternativa menos poluente e mais econômico que o óleo diesel e o carvão (DE LIMA NUNES, 2006). Em forjas mais antigas o GLP seria recomendado caso não fosse possível realizar uma transição para o modelo elétrico, mas é encorajado a aplicar tal meio pois o modelo elétrico, como apresentado no estudo, possui uma magnitude de impacto muito inferior.

Para as demais etapas de trefilação, arame e arco e ambos os pós-processamentos, devido aos seus modelos utilizarem eletricidade ou indução, consequentemente sua taxa de poluição é bem menor, justificado pelos valores calculados no Gráfico 2 apresentado no tópico 5.2. Novamente, a rede de abastecimento energético é recomendável ser proveniente de energias limpas, a fim de manter a taxa de baixas emissões.

De acordo com os resultados apresentados nos tópicos do estudo da ACV, embora essas medidas mitigatórias sejam eficazes na redução das emissões, a implementação da manufatura aditiva pela convencional é a opção mais viável, pois utiliza energia direta e indução para todos os processos portão ao portão sem queimar combustíveis fósseis. Isso se reflete na redução de 90,5% nas emissões geradas pela MA no contexto da ACV. Adicionar essas medidas de filtragem e troca de combustível às etapas “berço” da MA (extração e laminação a quente) reduziria ainda mais as emissões, mas mudar a fonte de abastecimento da rede elétrica do país de origem seria ainda mais eficaz.

5.4.3 – Reciclagem e reutilização residual

Uma vez que o metal de baixa liga ER-90 contém metais pesados na sua composição, se os respetivos resíduos forem eliminados de forma inadequada, poderão reduzir a porosidade e contaminar o solo e a água, o que representa um risco para a biodiversidade da região afetada. Os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida mostraram que o foco da mitigação estava nas etapas de pós-processamento, onde é produzida a maior parte dos resíduos, devido aos cortes feitos na peça. As três medidas de mitigação mais eficazes foram a reciclagem, a reintrodução do material no processo de produção e a utilização dos resíduos noutro processo (BELLO, 2025).

O metal pode ser reciclado e reutilizado noutras etapas do processo. Se se enquadrarem na categoria de metal reciclado, serão enviados para o reator EAF, onde serão reintroduzidos no ciclo de vida. O estudo da ACV da peça mostra que a utilização de menos metal nas etapas de produção inicial poderia reduzir a geração de resíduos e, consequentemente, as necessidades energéticas e as emissões dos processos estudados. No que se refere ao consumo de materiais utilizados na AM, é necessário ter em conta o facto de nem todos os materiais estarem presentes na fase final do processo e de parte da impressão da peça ser o suporte para a mesma, o qual é removido ou dissolvido manualmente, o que leva a uma perda de recursos.

Como foi apresentado no item 5.3, após o processo da manufatura aditiva obteve-se uma sobra de metal ER-90 de 66,3 kg. Tal sobra pode ser reaplicada na etapa 6, sem a necessidade de passar novamente pelas etapas 1, 2 e 5 para se obter o fio do equipamento de MAAA. Entretanto ainda foi utilizado uma massa acima do necessário, podendo ser aplicado medidas mitigadoras para reaproveitar o metal residual.

No entanto, o metal residual obtido das duas fabricas poderia ser utilizado em dois modelos de reutilização de materiais: a Economia Circular (EC) e a Simbiose Ambiental (SA). O CE baseia-se nas fases de extração, produção, utilização e eliminação, com vista a reutilizar os resíduos de um processo de produção, reintroduzindo-os no sistema e reciclando-os, de modo a evitar a produção de mais resíduos. Todo o metal residual gerado até ao momento pode ser reintroduzido nos fornos BOF e EAF na primeira fase, antes de ser triturado e limpo.

O outro modelo seria o ES, que procuraria estabelecer uma cooperação entre empresas para que os resíduos produzidos por uma pudessem servir de matérias-primas para outra. Estas medidas visam reduzir quase completamente os resíduos gerados em cada etapa e poupar energia e custos, reutilizando o máximo de metal possível (FERREIRA, 2020). Estes modelos poderiam gerar parcerias com empresas que necessitem desse metal para seus processos, ou da reintrodução do material no ciclo de vida do ER-90. Com essas medidas, visa-se uma redução quase total dos resíduos gerados pelas etapas, possível economia de energia e custos, reaproveitando o máximo do metal.

6 – Conclusão

Este estudo providenciou os resultados acerca da viabilidade do uso da manufatura aditiva sobre a convencional, em relação aos tópicos energéticos, poluentes atmosféricos e de resíduos. A Avaliação do Ciclo de Vida comparou ambos os processos de manufatura, desde a extração do material até a sua produção (berço-ao-portão), demonstrando o impacto dos indicadores ambientais calculados em cada etapa, podendo ser atenuado ou mitigado através da consideração de novas propostas.

As novas indústrias vêm automatizando seus processos com equipamentos robóticos que promovem rapidez, custo benefício e apresentam um melhor desempenho na geração de peças de geometria complexa. As metodologias do ciclo de vida auxiliam na escolha dos equipamentos e processos a serem empregados, visando essas propostas de melhorias da MC para a MA. O uso de uma ACV é encorajado, uma vez que a medição da magnitude dos impactos de curto a longo prazo, a visualização de um fluxograma com todas as etapas e seus respectivos *inputs* e *outputs*, serão determinantes para as melhores tomadas de decisões, e de garantir que o produto final é viável para ser utilizado e comercializado.

Os dados primários informados pelo LNTSOLD utilizaram esses equipamentos robóticos de controle numérico computadorizado, aderindo à visão de avanço tecnológico das indústrias manufatureiras. Os dados de referências bibliográficas de YUSUF e PRIARONE foram escolhidos seguindo o uso de equipamentos modernos, e cálculos que consideram todas as etapas dos equipamentos de impressão 3D, respectivamente. Para as bibliotecas do ECOINVENT 3.11 e com o software de ciclo de vida SIMAPRO, as simulações dos tópicos estudados são possíveis serem realizados com garantia de qualidade das questões referentes aos mesmos tópicos.

Nas questões do consumo energético e emissões atmosféricas, a justificativa da MC apresentar valores maiores do que na MA são devidas as etapas que utilizam combustíveis fósseis utilizados para abastecer as máquinas e equipamentos de operação, a demanda de altas temperaturas e força cinética para moldar o material na peça desejada. A substituição desses combustíveis por biocombustíveis, medidas de controle dos poluentes atmosféricos, substituição da rede energética e a adesão da metodologia aditiva seriam medidas mitigadoras tanto para a redução do consumo energético, quanto para as emissões.

Para os resíduos, por se tratar de metais de baixa liga, o ER-90 que resta nas fases das manufaturas pode totalmente ser reintroduzido na linha de produção, sendo adicionado seu resíduo e cavaco (da etapa de pós-processamento) em um alto forno na etapa inicial. Esse conceito incentiva o uso da Economia Circular e da Simbiose ambiental comentado nas discussões, apresentando uma alternativa sustentável e de cooperação entre as empresas de ramos diferentes, que convenham a utilizar o mesmo material.

O estudo demonstrou o impacto da MA no avanço de processos complexos de fabrico de diferentes produtos, especialmente os realizados neste trabalho. A MA tem várias vantagens, nomeadamente a flexibilidade do material utilizado, uma maior acessibilidade e a otimização do tempo de produção, além de ocupar um espaço reduzido com um robô articulado, especialmente quando comparada com a MC. No entanto, um aspeto negativo importante está relacionado com a quantidade de produção, uma vez que uma elevada produção de peças pode tornar a MC preferível devido ao tempo de resposta.

Este estudo de caso mostra como uma avaliação do ciclo de vida pode ser utilizada para determinar que partes de um processo, desde a concessão até à produção, podem ser otimizadas para melhorar o desempenho e reduzir o impacto ambiental. Esta avaliação analisa cada entrada e saída das etapas de fabricação convencional e aditiva. O campo da fabricação aditiva requer mais estudos para continuar a otimizar os processos industriais de acordo com os atuais conceitos de sustentabilidade.

Além de apresentar bons resultados em termos de propriedades mecânicas e resistência à corrosão em comparação com os métodos de fabrico convencionais, devido ao maior refinamento microestrutural obtido através da produção camada por camada com taxas de arrefecimento controladas durante a deposição, a manufatura aditiva permitiu obter componentes com uma geometria mais próxima do projeto do formato final, reduzindo as etapas de pós-processamento, a geração de resíduos sólidos, o consumo de energia elétrica e as emissões de GEE em toda a cadeia produtiva, revelando-se uma alternativa promissora para o desenvolvimento sustentável.

7 – Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados promissores apresentados pelo estudo, demonstram um potencial para expandir as análises de novos tópicos para trabalhos futuros. Uma dessas áreas seria a questão da avaliação da produtividade e escalabilidade das manufaturas, em relação à unidade de peça por tempo. Uma forja leva aproximadamente 6 (seis) horas para fabricar um flange, enquanto a manufatura aditiva de arame e arco leva aproximadamente 60 horas. Se for considerado por exemplo dez robôs da MAAA operando ao mesmo tempo, fabricaria 10 peças no mesmo tempo que uma forja levaria, com uma redução significativa da MA em relação a MC.

Outra sugestão seria o calculo de custos de operação e energia. Uma ideia seria utilizar o Anexo 2 das métricas e metodologias do IPCC a fim de calcular os custos de operação dos equipamentos, e também os custos possíveis de mitigação das emissões geradas por ambas manufaturas. PRIARONE também apresenta fórmulas para o cálculo do custo das manufaturas, obtendo-se uma variedade de fontes a serem consideradas para este tópico.

Embora o estudo do túmulo não tenha sido considerado, devido as propriedades da peça e das questões citadas no estudo, uma representação total do ciclo de vida dos tópicos energéticos e das emissões é de mais valia para complementar o ciclo completo do produto, onde na etapa de resíduos uma explicação sobre como a peça em questão pode vir a se tornar metal de sucata é transportada para o forno de arco elétrico e reaplicada no processo, enfatizando o conceito de economia circular.

O estudo também pode se aprofundar nos testes específicos realizados na peça durante a MAAA, a fim de demonstrar a igualdade total da peça em ambas manufaturas, visando sua resistência e resiliência por exemplo. O estudo das outras categorias de impacto dentro da metodologia *midpoint* também podem vir a serem considerados, embora em algumas categorias os valores não sejam muito significativos.

8 – Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações. Brasil, 2009.

AHN, Hyunchul et al. Numerical modeling of mechanical properties of UAM reinforced aluminum hat sections for automotive applications. International Journal of Material Forming, p. 1-12, 2021.

Agência Internacional de Energia (IEA), 2025. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024/regional-dashboards. Acesso em 13/02/2025

ALBERTIN, Marcos Ronaldo et al. Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura. 2017.

ALMEIDA, Julia Fornaziero de et al. Comparação e ordenação de preferência entre os processos de manufatura aditiva (MA) e usinagem convencional para a fabricação de peças aeronáuticas usando método fuzzy topsis. 2021.

ALVES, André AN; RIBEIRO, Maurício F.; RICCI, Vitor Salvucci. O uso de sacolas plásticas pelos clientes de supermercados e seu impacto sobre a natureza. Revista Ciências do Ambiente On-Line, v. 7, n. 1, 2011.

ASTM International. ISO/ASTM 52900:2015(E) Standard terminology for additive manufacturing technologies - general principles - terminology; 2015.

ASTM International.: Committee F42 on additive manufacturing Technologies, 2021. Disponível em: https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm. Acesso em 05/04/2025.

AYOADE, J. O. Classificações climáticas e climas regionais. Introdução a climatologia para os trópicos. Trad: Maria Juraci Zanni dos Santos. Ed DIFEL, São Paulo. 1996.

B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani e G. Oriolo, Robotics: Modelling, Planning and Control, Londres: Springer Publishing Company, Incorporated, 2010.

BARRETO, Thalia de Souza Menna. Estudo das características de usinagem de peças metálicas obtidas por manufatura aditiva a arco. 2022.

BARROS, K. D. S. Identification of the environmental impact's contributors related to the use of Additive Manufacturing technologies, 2017.

Bello, K.A; Maladzhi, R. W. Innovative and Best Practices in Sustainable Strategies for Waste Reduction in Additive Manufacturing. Hybrid Advances, 2025, v. 11, p. 100527.

BESPOKE, Bespoke innovations, printed prosthetic limb, 2023. Disponível em: <https://www.3dsystems.com/>. Acesso em 11/04/2023.

BRASIL., CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986.

BRASIL. Resolução CONAMA 491, 2018. Brasília. Publicado em:21/11/2018|Edição:223|Seção: 1|Página:155. Órgão: Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente

BRESCIANI FILHO, Ettore et al. Conformação plástica dos metais. Ed da Unicamp, 1997.

Buchanan C., Gardner, L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges, v.180, p. 332-348, 2019.

CANO, Wilson. (Des) industrialização e (sub) desenvolvimento. Cadernos do Desenvolvimento, v. 9, n. 15, p. 139-174, 2018.

CARDOSO, F.N; da Nobrega, J.S.W; Guimarães, M.P. Adequação de uma unidade da instituição federal de ensino superior ao código de combate a incêndio (COSCIP) do Rio de Janeiro de 2018. SPOSHO, v.1. p. 186 – 198, 2022.

CARRO SUÁREZ, Jorge; SARMIENTO PAREDES, Susana. El factor humano y su rol en la transición a Industria 5.0: una revisión sistemática y perspectivas futuras. Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento, v. 10, n. 24, 2022.

CASOTTI, Bruna Pretti; BEL FILHO, Egmar Del; CASTRO, Paulo Castor de. Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. BNDES Setorial, n. 33, p. 121-162, 2011.

CAVALCANTE[1], Zedequias Vieira; DA SILVA, Mauro Luis Siqueira. A importância da revolução industrial no mundo da tecnologia. 2011.

CETESB 2020 – Ficha de informação toxicológica / Acrilonitrila. Fevereiro de 2020/. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploadas/sites/24/2020/02/Acrilonitrila.pdf.> Acesso em 09/01/2025.

CETESB 2025 – Ficha de informação toxicológica / Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. Agosto de 2010/ atualizado em fevereiro de 2017. Disponível em: < https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/servicos/informacoes-toxicologicas/> Acesso em 12/01/2025.

De Eiker, M. O et.al. Using non-local databases for the environmental assessment of industrial activities: The case of Latin America. Environ. Impact Assess. Rev, 2010, v. 30, p.145-157.

DE LIMA NUNES, Fabiano; TREIN, Fabiano André. Vantagens do Uso do GLP como Combustível Em Fornos de Aquecimento para a Conformação à Quente de Metais: uma Contribuição ao Desenvolvimento Regional. GESTÃO E DESENVOLVIMENTO, v. 3, n. 1, p. 111-118, 2006.

GUANGJUN, Chen. The problem and energy-saving of reheating furnace. Energy Metall. Indust, v. 27, p. 32-35, 2008.

COLTRO, Leda et al. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. Campinas: Cetea/Ital, v. 1, 2007.

CÓNSUL, Julia María Díaz et al. Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio. Química nova. São Paulo. Vol. 27, n. 3, (2004), 2004.

CUNNINGHAM, C. R. et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. Additive Manufacturing, v. 22, p. 672-686, 2018.

DASS, Adrita; MORIDI, Atieh. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. Coatings, v. 9, n. 7, p. 418, 2019.

ENERDATA. *World Energy & Climate Statistics – Yearbook*. Disponível em: https://yearbook.enerdata.net/. Acesso em: 10 ago. 2025.

FERIOTTI, Marco Aurélio; FORMIGONI, Alexandre. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE A TENDÊNCIA DA APLICAÇÃO DA MANUFATURA HÍBRIDA. South American Development Society Journal, v. 8, n. 24, p. 64, 2022.

Ferreira, I. A.; Godina, R; Carvalho, H. Waste valorisation through additive manufacturing in an industrial symbiosis setting. Sustainability, 2020, v. 13, n. 1, p. 234.

Frazier, W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. J. Mater. Eng. Perform. 2014, 23, 1917–1928.

GAO, Wei et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-aided design, v. 69, p. 65-89, 2015.

GIBSON, Ian et al. Design for additive manufacturing. Additive manufacturing technologies, p. 555-607, 2021.

GIBSON, Ian et al. Binder jetting. Additive manufacturing technologies, p. 237-252, 2021.

GUIMARÃES, Claudinei. Controle e monitoramento de poluentes atmosféricos. Elsevier Brasil, 2017. P 83 pdf e 68 do livro.

GODEC, Damir et al. A Guide to Additive Manufacturing. Springer Nature, 2022.

GOH, Guo Dong et al. Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, v. 45, n. 2, p. 113-133, 2020.

GOULART, Adriano Ávila e FOGAÇA, Thiago Kich / Introdução à climatologia: conceitos, pesquisas e ensino. Curitiba, Primeira edição 2018: Editora Inter Saberes. ISBN: 978-85-5972-797-5

GOUNET, Thomas. Fordismo e toyotismo na civilização do automóvel. Boitempo, 1999.

GÜLCAN, Orhan; GÜNAYDIN, Kadir; TAMER, Aykut. The state of the art of material jetting—a critical review. Polymers, v. 13, n. 16, p. 2829, 2021.

HARE, F.K. Atmospheric Sciences, In: HENRY, J.G. e HEINKE, G.W. (Ed.). Environmental Science and Engineering. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1996. p. 216.

HARPER, Gavin et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. nature, v. 575, n. 7781, p. 75-86, 2019.

HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irvin. Life cycle assessment. Springer International Publishing, Cham. https://doi. org/10.1007/978-3-319-56475-3 Book, 2018.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review. In: ANNUAL HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 49., 2016, Estados Unidos. Proceedings... Washington, DC: IEEE Computer Society, 2016. p. 3928–3937.

Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. Additive manufacturing of metals. Acta Materialia, v. 117, p. 371–392, 2016. doi:10.1016/j.actamat.2016.07.019.

HUIJBREGTS, Mark AJ et al. ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization. 2016.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

ISO- International Organization Standardization. Environmental labels and declarations: type III – Environmental declarations, principles and procedures. ISO 14025:2006-en. Geneve: ISO, 2006. Disponível em: http://goo.gl/Xw8FWo. Acesso em 10/02/2025.

JESWIET, J.; KARA, S. Carbon emissions and CES™ in manufacturing. CIRP annals, v. 57, n. 1, p. 17-20, 2008.

JIN, Wanwan et al. Wire arc additive manufacturing of stainless steels: a review. Applied sciences, v. 10, n. 5, p. 1563, 2020.

KHAN, A.; TUROWSKI, K. A. Perspective on industry 4.0: from challenges to opportunities in production systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERNET OF THINGS AND BIG DATA, 2016a, Roma. Proceedings... IOTBD: Science and Technology Publications, [s.d.], p. 441–448.

KIEBACK, B.; NEUBRAND, A.; RIEDEL, H. Processing techniques for functionally graded materials. Materials Science and Engineering: A, v. 362, n. 1-2, p. 81-106, 2003.

Korzhyk, V.; Khaskin, V.; Voitenko, O.; Sydorets, V.; Dolianovskaia, O. Welding Technology in Additive Manufacturing Processes of 3D Objects. Mater. Sci. Forum 2017, 906, 121–130.

LI, Ming et al. Metal binder jetting additive manufacturing: a literature review. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 142, n. 9, 2020.

LIANG, Steven et al. Intelligent manufacturing systems: a review. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, v. 7, n. 3, p. 324-330, 2018.

Lincolnelectric.com. Disponível online: https://www.lincolnelectric.com/en/Products/er90sb3_gmaw. Acesso em 10/06, 2024.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 2023 https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/. Acessado em 26/05/2023.

MACHADO, Álisson Rocha et al. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher, 2015.

MACHADO, P. L. O. A.; Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Quim. Nova,* Vol. 28, No. 2, 329-334, 2005.

MALSHE, H.; NAGARAJAN, H.; PAN, Y.; HAAPALA, K. Profile of Sustainability in Additive Manufacturing and Environmental Assessment of a Novel Stereolithography Process. International Manufacturing Science and Engineering Conference. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineers. 2015. V002T05A012. DOI: HYPERLINK https://doi.org/10.1115/MSEC2015-9371. Acesso em 25/08/2024.

MEDEIROS, Diego L. et al. Ciclo de vida de compósitos com fibras vegetais: uma análise qualitativa das emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) do compósito de polipropileno com fibra de sisal. Revista Virtual de Química, v. 8, n. 4, p. 1166-1180, 2016.

MEDELLIN, Anthony et al. Vat photopolymerization 3d printing of nanocomposites: a literature review. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, v. 7, n. 3, 2019.

MENDES, Natália Crespo. Métodos e modelos de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MENDONÇA, Francisco, OLIVEIRA, Inês Moresco Danni / Climatologia – noções básicas e climas do brasil. São Paulo, 2007: Editora Oficina de Textos. ISBN 978-85-86238-54-3.

Ministério do Trabalho e Emprego. NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2004.

Ministério do Trabalho e Emprego. NR 12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2015.

MX3D, 2022. MX3D bridge [WWW Document]. URL. Disponível em: https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/. Acesso em 09/01/2023.

NETTO, Fabiola & Daemme, Luiz & PENTEADO, Renato & Correa, Sergio & Beltrão, Victor & SILVA, Vinicius. (2017). FORMAÇÃO DE OZÔNIO TROPOSFÉRICO: UMA REVISÃO DA LITERATURA. 411-428. 10.5151 / engpro-simea2017-31.

NUNES, Raul A. Metalurgia do pó. Rio de Janeiro: Pontifica Universidade Católica, 2003.

ODABASI, Mustafa et al. Electric arc furnaces for steel-making: hot spots for persistent organic pollutants. Environmental Science & Technology, v. 43, n. 14, p. 5205-5211, 2009.

PRETTO, Angélica. O Estudo do comportamento dos gases traço O IND. 3, NOx IND. CO, SOx IND. 2'e de COVS na atmosfera da cidade de São Paulo. 2005. Tese de Doutorado.

PRO-JET, 3510 CPX 3D Printer a Gem to Uptown Diamond & Jewelry, 3D Systems Inc., 2015. Disponível em: http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/uptown_diamond_case_study.pdf. Acesso em 06/05/2023

PRIARONE, Paolo C. et al. A modelling framework for comparing the environmental and economic performance of WAAM-based integrated manufacturing and machining. CIRP Annals, v. 68, n. 1, p. 37-40, 2019.

QUINTANILHA, Lilian. Universo das emissões atmosféricas e a atuação do setor industrial. Revista Meio Ambiente Industrial, São Paulo. Julho/agosto 2009.

RAJ, Mathala Prithvi; KUMAR, Manoj; PRAMANICK, Ajit Kumar. Yield improvement in hot forging of differential spider. Materials Today: Proceedings, v. 26, p. 3107-3115, 2020.

REJESKI, D.; ZHAO, F.; HUANG. Research Needs and Recommendations on Environmental Implications of Additive Manufacturing. Additive Manufacturing, v.19, 2018. p. 21-28. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.019.

ROMI. Available online: https://www.romi.com/produtos/linha-romi-d-nova-geracao/ (accessed on 28 Jan 2025).

SAKURAI, Ruudi; ZUCHI, Jederson Donizete. As revoluções industriais até a indústria 4.0. Revista Interface Tecnológica, v. 15, n. 2, p. 480-491, 2018.

SANTOS, Beatrice Paiva et al. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. Revista Produção e Desenvolvimento, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.

SELLITTO, Miguel Afonso; BORCHARDT, Miriam; PEREIRA, Giancarlo Medeiros. Modelagem para avaliação de desempenho ambiental em operações de manufatura. Gestão & Produção, v. 17, p. 95-109, 2010.

SILVA, D. et al. How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto. In: Proceedings of the VII Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica, Medellin, Colombia. 2017. p. 10-15.

SILVA, DB da; SILVA, Ricardo Moreira da; GOMES, Maria de Lourdes Barreto. O reflexo da terceira revolução industrial na sociedade. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, v. 22, p. 1-8, 2002.

SOLID CONCEPTS, DMLS: The exciting maturity of 3d printed metal. Disponível em: https://designandmotion.net/design-2/manufacturing-design/dmls-maturity-3d-printed-metal/. Accesso em: 11/05/2023.

SONG, Lebao et al. Application of machine learning to predict and diagnose for hot-rolled strip crown. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 120, n. 1, p. 881-890, 2022.

SOUZA, Ana Kely Rufino et al. Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. Acta Biomedica Brasiliensia, v. 9, n. 3, p. 95-106, 2018.

SUN, Q. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. Rapid prototyping journal, 2008.

SWORD, J. Iain; GALLOWAY, Alexander; TOUMPIS, Athanasios. An environmental impact comparison between wire+ arc additive manufacture and forging for the production of a titanium component. Sustainable Materials and Technologies, v. 36, p. e00600, 2023.

SWORD, J; Galloway, A; Toumpis, A. Analysis of Environmental Impact and Mechanical Properties of Inconel 625 Produced Using Wire Arc Additive Manufacturing. Sustainability 2024, v. 16, n.10, p. 4178.

Syed, W. U. H., Pinkerton, A. J. and Li, L., Combining wire and coaxial powder feeding in laser direct metal deposition for rapid prototyping, Applied Surface Science, v. 252, n.13, p. 4803-4808, 2006.

THOMAS, Douglas S.; GILBERT, Stanley W. Costs and cost effectiveness of additive manufacturing. NIST special publication, v. 1176, p. 12, 2014.

UECKERDT, Falko et al. Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. Nature Climate Change, v. 11, n. 5, p. 384-393, 2021.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. The National Ambient Air Quality Standards for Particle Pollution, Revised Air Quality Standards for Particle Pollution and Updates to the Air Quality Index (AQI). 2012.

VALLERO, Daniel A. Fundamentals of air pollution. Academic press, 2014.

VILLALBA, Felipe Zenin et al. Industry 4.0: technical qualifications for the fourth industrial revolution in Brazil. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 17, n. 4, p. 32, 2022.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo: Blucher, 2015.

WILTGEN, Filipe; LOPES, Marcelo. MANUFATURA ADITIVA E SUBTRATIVA NA CONSTRUÇÃO DE MOLDES MECÂNICOS HÍBRIDOS PARA APLICAÇÃO EM MANUFATURA FORMATIVA. RETEC-Revista de Tecnologias, v. 15, n. 1, p. 45-63, 2022.

WONG, Kaufui V.; HERNANDEZ, Aldo. A review of additive manufacturing. International scholarly research notices, v. 2012, 2012.

YAP, Yee Ling et al. Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. Precision engineering, v. 50, p. 275-285, 2017.

Yusuf, Nur Kamilah; Lajis, Mohd Amri; Ahmad, Azlan. Multi response optimization and environmental analysis in direct recycling hot press forging of aluminium AA6061. Materials, 2019, v. 12, n. 12, p. 1918.

Wang, P; et.al. Nonlinear Ultrasonic Characterization of Processing Defects in Arc Additive Manufacturing 316L Stainless Steel. Materials 2025, v. 18, n. 4, p. 805.

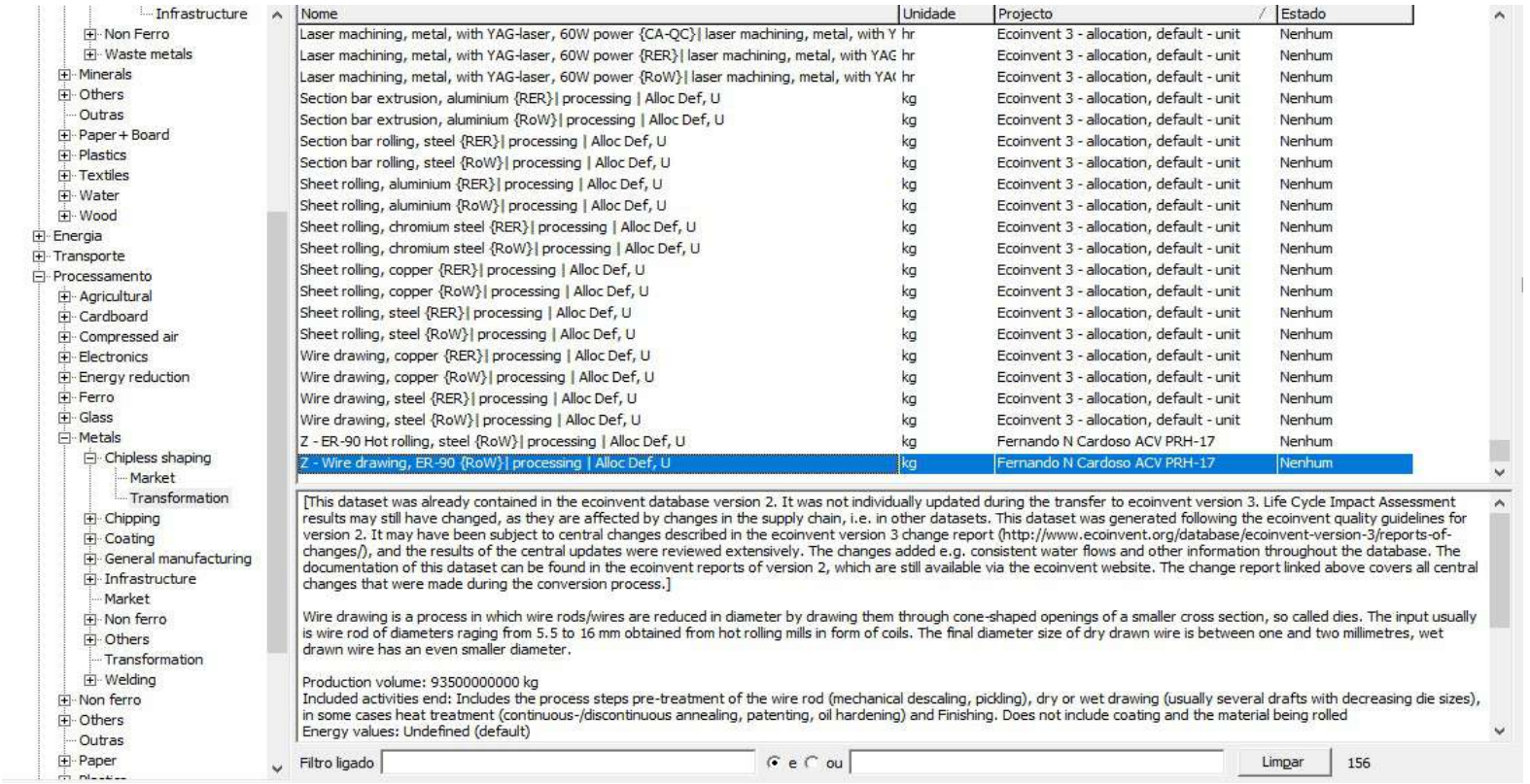
ZHANG, Wei et al. A review on explorations of the oxygen blast furnace process. steel research international, v. 92, n. 1, p. 2000326, 2021.

ZHANG, Yi et al. Additive manufacturing of metallic materials: a review. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 27, p. 1-13, 2018.

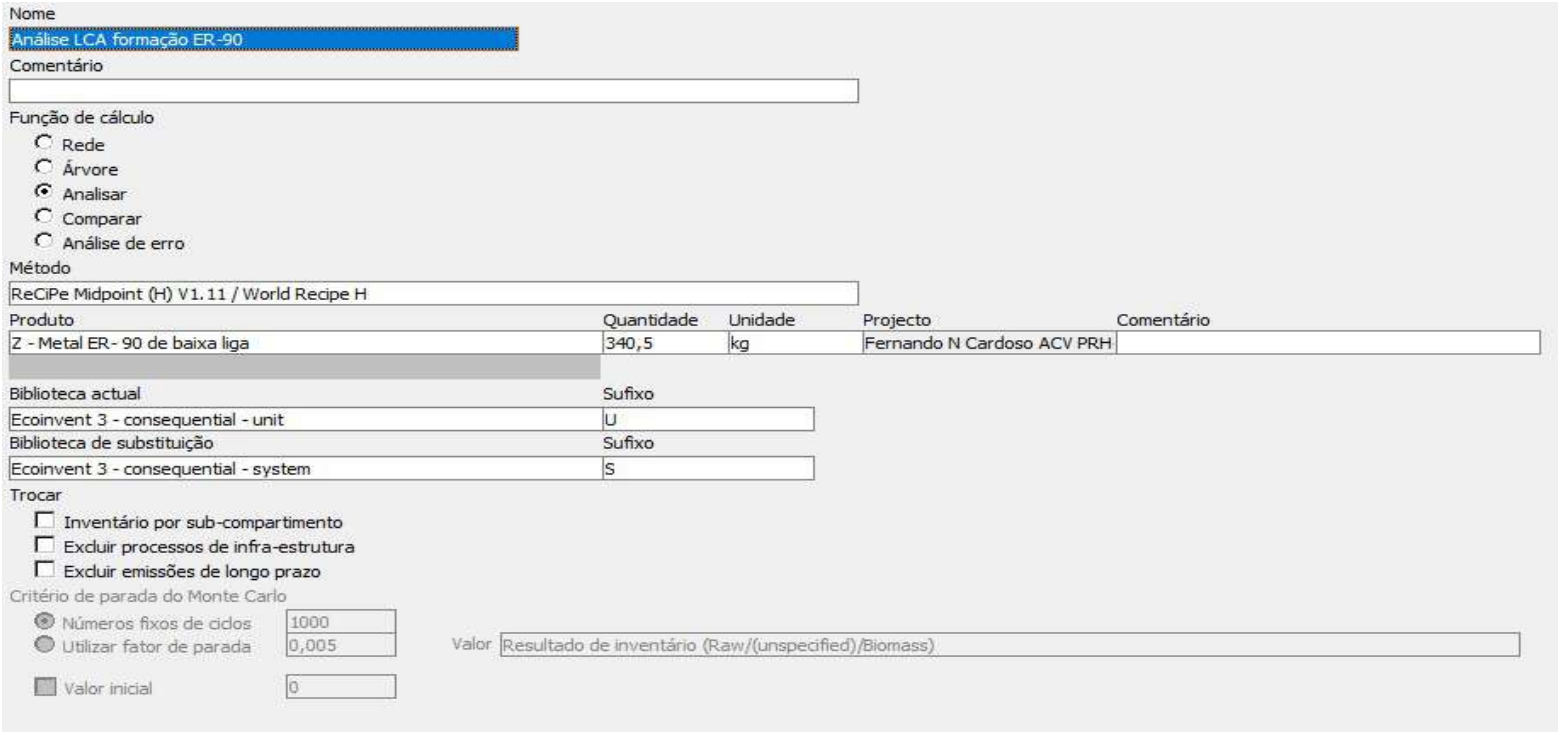
ZHAO, Jun-Ren; HUNG, Fei-Yi; LUI, Truan-Sheng. Particle erosion induced phase transformation of different matrix microstructures of powder bed fusion Ti-6Al-4V alloy flakes. Metals, v. 9, n. 7, p. 730, 2019.

ANEXOS

Anexo A: Interface do programa SIMAPRO com a biblioteca ECOINVENT 3.11.

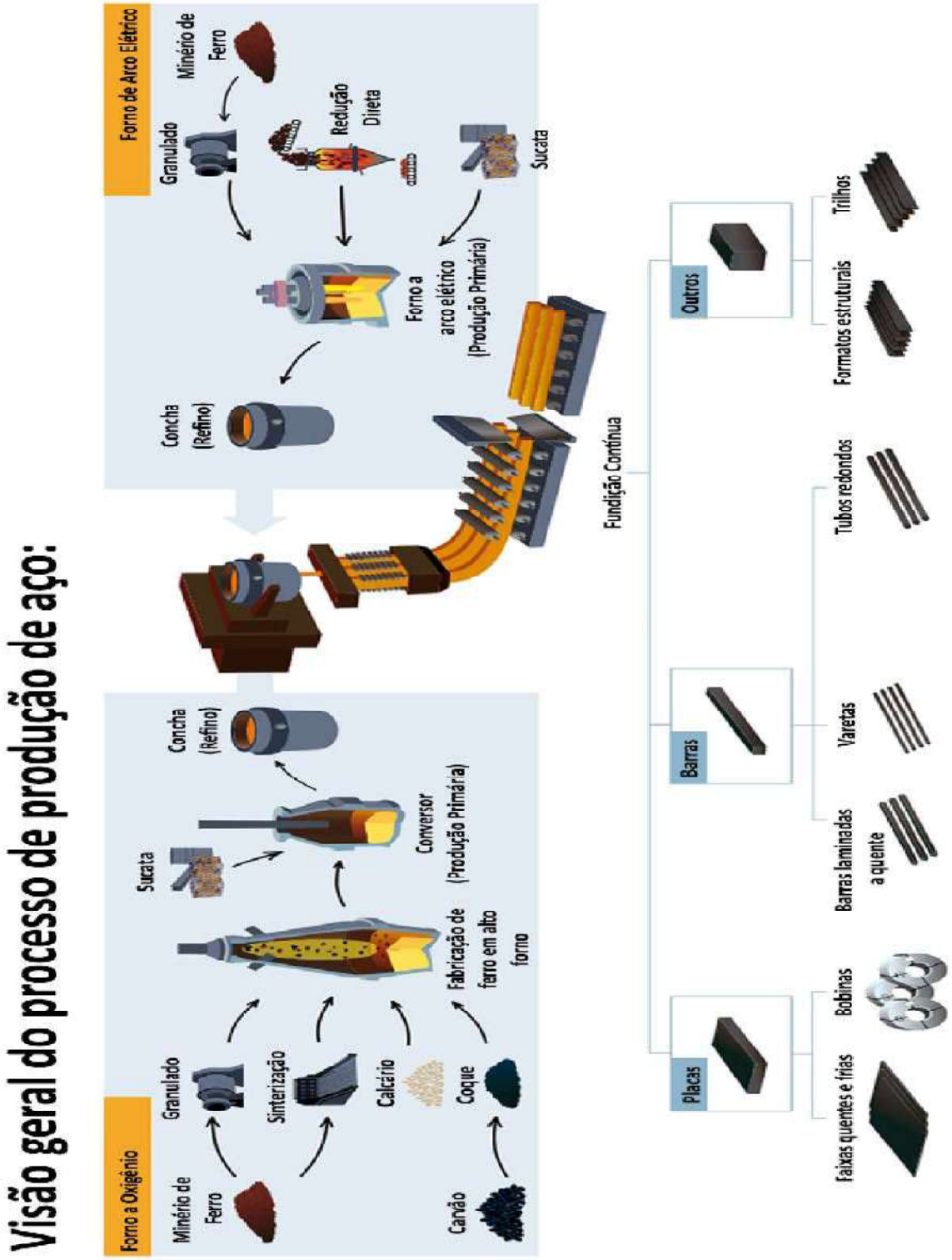


Fonte: O Autor, 2025.



Fonte: O Autor, 2025.

Anexo B: Caminho de produção do metal pelos fornos de explosão a oxigênio (BOF) e arco elétrico (EAF).



Fonte: Adaptado de WSA, 2025.