

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
CAMPUS TAQUARAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROPOSTA DE UM MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE
MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA

DANIEL RENÉ TASÉ VELÁZQUEZ
ORIENTADOR: PROF. DR. ALEXANDRE TADEU SIMON
COORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELLENO

PIRACICABA

2022

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
CAMPUS TAQUARAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**PROPOSTA DE UM MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE
MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA**

DANIEL RENÉ TASÉ VELÁZQUEZ
ORIENTADOR: PROF. DR. ALEXANDRE TADEU SIMON
COORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELLENO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção.

PIRACICABA

2022

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP
Bibliotecário: Fábio Henrique dos Santos Corrêa – CRB: 8/10150

V434p Velázquez, Daniel René Tasé
Proposta de um modelo de planejamento do processo de
manufatura híbrida com abordagem preditiva / Daniel René Tasé
Velázquez– 2022.
152 fls.; il.; 30 cm.

Orientador (a): Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon.
Tese (Doutorado) – Universidade Metodista de Piracicaba,
Engenharia de Produção, Piracicaba, 2022.

1. Manufatura Híbrida. 2. Planejamento do Processo. 3.
Simulação multiparamétrica. I. Velázquez, Daniel René Tasé. II.
Título.

CDD – 620.1

PROPOSTA DE UM MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA

DANIEL RENÉ TASÉ VELÁZQUEZ

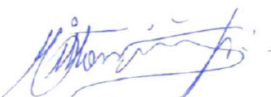
Tese de Doutorado defendida e aprovada em 31 de agosto de 2022,
pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:



Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon - PPGEP/UNIMEP
Presidente e Orientador



Prof. Dr. André Luís Helleno - Mackenzie
Co-Orientador



Prof. Dr. Milton Vieira Júnior - PPGEP/UNIMEP



Prof. Dr. Fernando Celso de Campos – PPGEP/UNIMEP



Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues – EESC/USP



Prof. Dr. Raphael Galdino dos Santos - INSPER

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, pelo apoio incondicional.

A minha esposa, meu braço direito, por ser meu alicerce, pelo apoio e parceria na profissão e na vida, sempre me oferecendo muito de si e pedindo nada em troca.

Ao Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon pela orientação, ensinamentos, ajuda infinita e incondicional em todo momento, que permitiram que eu conseguisse concluir esta pesquisa. Pela sua amizade e deferência com a minha pessoa e os meus, sempre serei grato.

Ao Prof. Dr. André Luís Helleno, pela orientação e pela parceria para que eu pudesse iniciar e concluir esta fase profissional.

A todos os professores, funcionários e colegas do PPGEP da UNIMEP, que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até este momento.

À CAPES e a UNIMEP, pela bolsa de estudo concedida.

À ROMI S.A por permitir o uso de suas instalações e equipamento para o desenvolvimento deste trabalho.

TASÉ VELÁZQUEZ, D.R. **Proposta de um Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva**. 2022. 152f. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção - Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, SP.

RESUMO

A manufatura híbrida tem atraído o interesse da comunidade industrial pela capacidade de produzir peças funcionais com variadas geometrias, usando diferentes tipos de materiais em inúmeras aplicações. Como ocorre com outros processos, antes da execução do processo híbrido, é importante executar um planejamento assertivo que considere as atividades essenciais para garantir uma operação adequada e estável e permitir uma visão integral e proativa do processo. Adicionalmente, deve integrar uma etapa de simulação que permita prever se as condições experimentais do processo estão adequadas para garantir a manufatura da geometria modelada, além de permitir reduzir a quantidade de experimentação, os desvios geométricos, o consumo de material e o tempo de manufatura, garantindo uma estratégia de deposição eficiente. Observa-se, no entanto, que os modelos de planejamento do processo de manufatura híbrida (PPMH) encontrados na literatura não contemplam de forma abrangente as atividades necessárias para garantir uma operação adequada e estável e apresentam limitações quanto à inclusão de uma etapa de simulação que garanta uma abordagem preditiva sobre o desempenho da operação. O objetivo deste trabalho é propor um Modelo de PPMH com Abordagem Preditiva que integre as atividades que devem ser atendidas pela operação, assim como uma etapa de simulação que permita avaliar o desempenho de múltiplos parâmetros do processo e seu efeito nas características geométricas para garantia da estabilidade do processo. O desenvolvimento do modelo apoia-se na metodologia *Design Science Research* e na combinação de um método de apoio à tomada de decisão baseado na configuração de um Sistema de Inferência *Fuzzy* para simulação multiparamétrica do processo. O modelo proposto considera as sete atividades principais do PPMH e contempla as etapas de Modelagem CAD, Planejamento, Simulação, Execução e Controle, interconectadas por um fluxo de transferência de dados. Na condução de dois experimentos foi possível verificar a aplicabilidade e viabilidade do modelo que forneceu uma previsão precisa das variáveis de saída avaliadas, obtendo em cada experimento um erro menor do que 8 %, garantindo confiabilidade e estabilidade adequadas. Esta pesquisa contribui para o avanço da teoria sobre PPMH ao identificar e sistematizar as principais etapas, atividades, requisitos e critérios para sua adequada condução. Contribui para a prática ao apresentar um modelo de PPMH que contempla as atividades essenciais e etapa de simulação para análise prévia dos parâmetros tecnológicos do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Híbrida; Planejamento do Processo; Simulação multiparamétrica; Deposição de Metal a Laser (LMD); Usinagem.

TASÉ VELÁZQUEZ, D.R. **Proposal of Hybrid Manufacturing Process Planning Model with Predictive Approach.** 2022. 152p. Doctoral Thesis in Production Engineering - Methodist University of Piracicaba, Piracicaba, SP.

ABSTRACT

Hybrid manufacturing has attracted the interest of the industrial community because of its ability to produce functional parts with varied geometries, using different types of materials in numerous applications. As with other processes, before executing the hybrid process, it is important to carry out an assertive planning that considers the essential activities to ensure an adequate and stable operation and allow an integral and proactive process understanding. Additionally, it must integrate a simulation step that allows predicting whether the process experimental conditions are adequate to guarantee the manufacture of the modeled geometry, in addition for allowing to reduce the amount of experimentation, geometric deviations, material consumption and manufacturing time, ensuring an efficient fabrication strategy. It is observed, however, that hybrid manufacturing process planning models (HMPP) found in the literature do not comprehensively contemplate the activities necessary to guarantee an adequate and stable operation and present limitations regarding the inclusion of a simulation step that ensure a predictive approach to operation performance. The objective of this work is to propose a HMPP Model with a Predictive Approach that integrates the activities that must be met by the operation, as well as a simulation stage that allows evaluating the performance of multiple process parameters and their effect on the geometric characteristics to guarantee stability. of the process. The model's development is supported by the Design Science Research methodology and the combination of a support decision-making method based on the configuration of a Fuzzy Inference System for multiparametric process simulation. The proposed model considers the seven main activities of the HMPP and includes the steps of CAD Modeling, Planning, Simulation, Execution and Control, interconnected by a data transfer flow. After conducting two experiments, it was possible to verify the applicability and feasibility of the model that provided an accurate prediction of the evaluated output variables, obtaining in each experiment an error smaller than 8 %, ensuring adequate reliability and stability. This research contributes to the advancement of the theory on HMPP by identifying and systematizing the main stages, activities, requirements and criteria for its proper execution. It contributes to the practice by presenting a HMPP Model that includes the essential activities and simulation stage for prior analysis of the process technological parameters.

KEYWORDS: Hybrid Manufacturing; Process Planning; Multiparametric simulation; Laser Metal Deposition (LMD); Machining.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS	8
1.2	ESTRUTURA DA TESE.....	8
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MANUFATURA	11
2.2	DEFINIÇÕES DE PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA.....	12
2.2.1	INTEGRAÇÃO DA USINAGEM E A LMD NA MANUFATURA HÍBRIDA	15
2.2.2	PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA	19
2.3	PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA (PPMH)	24
2.4	MODELOS DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA	29
2.5	TÉCNICAS E FERRAMENTAS PARA A SIMULAÇÃO DE PROCESSOS NO PPMH	38
2.6	<i>DESIGN SCIENCE RESEARCH</i>	45
3.	MÉTODO DE PESQUISA	50
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	50
3.2	ABORDAGEM METODOLÓGICA	51
3.2.1	ETAPA 1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	53
3.2.2	ETAPA 2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	58
3.2.3	ETAPA 3. APLICAÇÃO DO MODELO DE PPMH	60
4	MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA.....	61
4.1	CICLO DE RELEVÂNCIA	61
4.1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	61
4.1.2	DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA PESQUISA.....	61
4.1.3	DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DO MODELO DE PLANEJAMENTO	62
4.1.4	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DO MODELO DE PLANEJAMENTO	62
4.2	CICLO DE RIGOR	63
4.2.1	SELEÇÃO DO CONCEITO DE PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA.....	63
4.2.2	SELEÇÃO DO CONCEITO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA.....	64
4.3	CICLO DE PROJETO.....	64
4.3.1	ETAPA DE CONSCIENTIZAÇÃO	65
4.3.2	ETAPA DE SUGESTÃO.....	66
4.3.3	ETAPA DE DESENVOLVIMENTO.....	76
4.3.4	ETAPA DE AVALIAÇÃO	76
4.3.5	ETAPA DE FINALIZAÇÃO.....	77
5	APLICAÇÕES DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA	80
	APLICAÇÃO 1. SIMULAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE CORDÕES ÚNICOS GERADOS POR MEIO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA VIA LMD E USINAGEM	80
	ETAPA 1. PLANEJAMENTO DO PROCESSO.....	80
	ATIVIDADE 1.1 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	80
	ATIVIDADE 1.2 - SISTEMA HÍBRIDO E CARATERÍSTICAS DAS AMOSTRAS	81
	ATIVIDADE 1.3 - ANÁLISE DA GEOMETRIA DA DEPOSIÇÃO.....	83
	ATIVIDADE 1.4 - SIMULAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS POR MEIO DA CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY (FIS)	83
	ATIVIDADE 1.4.1 - CONFIGURAÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA CARATERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	84
	ATIVIDADE 1.4.2 - EXECUÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA CARATERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	91
	SIMULAÇÃO DA ALTURA DO CORDÃO (AC)	91

SIMULAÇÃO DA LARGURA DO CORDÃO (LC)	93
SIMULAÇÃO DA PENETRAÇÃO DO CORDÃO (PC).....	95
ETAPA 2. EXECUÇÃO DO PROCESSO	97
ATIVIDADE 2.1 - DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS	97
ETAPA 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	99
ATIVIDADE 3.1 – ANÁLISE DO EFEITO DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO NA GEOMETRIA DE DEPOSIÇÃO	99
INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS COM MAIOR SIGNIFICÂNCIA NAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS	101
ATIVIDADE 3.2. - AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E DA SIMULAÇÃO	104
APLICAÇÃO 2. SIMULAÇÃO DA DENSIDADE VOLUMÉTRICA DE ENERGIA DE CORDÕES ÚNICOS GERADOS POR MEIO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA VIA LMD E USINAGEM	107
ETAPA1. PLANEJAMENTO DO PROCESSO.....	107
ATIVIDADE 1.1 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	107
ATIVIDADE 1.2 - SIMULAÇÃO DA DENSIDADE DE ENERGIA VOLUMÉTRICA POR MEIO DA CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY (FIS)	108
ATIVIDADE 1.2.1 - CONFIGURAÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA DENSIDADE VOLUMÉTRICA DE ENERGIA (EV).....	109
ATIVIDADE 1.2.2 - EXECUÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA EV (J/MM ³)	112
ETAPA 2. EXECUÇÃO DO PROCESSO	114
ATIVIDADE 2.1 - DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS	114
ETAPA 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	115
ATIVIDADE 3.1 - AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E A SIMULAÇÃO	115
6 CONCLUSÕES	119
6.1 TRABALHOS FUTUROS	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
ANEXO	138
ANEXO 1. MÁQUINA HÍBRIDA ROMI DCM 620-5X HYBRID	138

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PRINCIPAIS FASES DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	10
FIGURA 2. CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE LMD.....	17
FIGURA 3. VISTA TRANSVERSAL DE UM CORDÃO DEPOSITADO SOBRE UM SUBSTRATO E AS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS.....	22
FIGURA 4. CICLO DO PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA. TRADUZIDO DE KULKARNI <i>ET AL.</i> (2000).....	25
FIGURA 5. CICLOS DO DESIGN SCIENCE RESEARCH. TRADUZIDA DE HEVNER (2007).....	46
FIGURA 6. METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DO CICLO DE PROJETO. TRADUZIDA DE MANSON (2006).....	48
FIGURA 7. ABORDAGEM METODOLÓGICA DA PESQUISA.....	52
FIGURA 8. MÉTODO PRISMA PARA O DESENVOLVIMENTO DAS RSLs. ADAPTADO E TRADUZIDO DE MOHER <i>ET AL.</i> (2009)	53
FIGURA 9. REQUISITOS E CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DO MODELO.....	63
FIGURA 10. VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA	66
FIGURA 11. ETAPAS DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA	67
FIGURA 12. ETAPA 1 DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA. ATIVIDADES DA ETAPA 1 MODELAGEM CAD/CAM	68
FIGURA 13. ETAPA 2 DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA. ATIVIDADES DA ETAPA 2 PLANEJAMENTO DO PROCESSO	73
FIGURA 14. ETAPA 3 DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA. ATIVIDADES DA ETAPA 3 SIMULAÇÃO MULTIPARAMÉTRICA DO PROCESSO COM BASE NUM FIS.....	75
FIGURA 15. MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA.....	79
FIGURA 16. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO E PRINCÍPIO OPERACIONAL DO LASER. ADAPTADO DE ROMI (2017)	82
FIGURA 17. CONFIGURAÇÃO DO FIS 1	84
FIGURA 18. MOTOR DE INFERÊNCIA MAMDANI DO PROCESSO HÍBRIDO PARA A VARIÁVEL SIMULADA ALTURA DO CORDÃO (Ac)	85
FIGURA 19. MOTOR DE INFERÊNCIA MAMDANI DO PROCESSO HÍBRIDO PARA A VARIÁVEL SIMULADA LARGURA DO CORDÃO (Lc).....	85
FIGURA 20. MOTOR DE INFERÊNCIA MAMDANI DO PROCESSO HÍBRIDO PARA A VARIÁVEL SIMULADA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DO CORDÃO (Pc).....	86
FIGURA 21. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E CONJUNTOS FUZZY PARA CADA PARÂMETRO DE ENTRADA DO PROCESSO HÍBRIDO, (A) POTÊNCIA DO LASER, (B) DISTÂNCIA FOCAL, (C) FLUXO DE PÓ, (D) VELOCIDADE DE CORTE, (E) ROTAÇÃO DA FERRAMENTA, (F) PROFUNDIDADE DE CORTE, (G) PERCURSO DA FERRAMENTA	88
FIGURA 22. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E CONJUNTOS FUZZY PARA CADA VARIÁVEL SIMULADA, (A) ALTURA DO CORDÃO, (B) LARGURA DO CORDÃO, (C) PENETRAÇÃO DO CORDÃO	89
FIGURA 23. BASE DE REGRAS PARA CADA VARIÁVEL DE SAÍDA SIMULADA, (A) ALTURA DO CORDÃO, (B) LARGURA DO CORDÃO, (C) PENETRAÇÃO DO CORDÃO.....	90
ATIVIDADE 1.4.2 - EXECUÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	91
FIGURA 24. VISUALIZADOR DE REGRAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA PARA A VARIÁVEL SIMULADA Ac.....	92
FIGURA 25. MAPAS 3D DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA COM FAIXAS OPERACIONAIS VARIÁVEIS E A VARIÁVEL SIMULADA Ac	93
FIGURA 26. VISUALIZADOR DE REGRAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA PARA A VARIÁVEL SIMULADA Lc	94
FIGURA 27. MAPAS 3D DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA COM FAIXAS OPERACIONAIS VARIÁVEIS E A VARIÁVEL SIMULADA Lc	95

FIGURA 28. VISUALIZADOR DE REGRAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA PARA A VARIÁVEL SIMULADA PC.....	96
FIGURA 29. MAPAS 3D DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA COM FAIXAS OPERACIONAIS VARIÁVEIS E A VARIÁVEL SIMULADA PC	97
FIGURA 30. (A) DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA, (B) EXEMPLO DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA AMOSTRA	98
FIGURA 31. SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM CORDÃO DE UMA AMOSTRA EXEMPLIFICANDO A ALTURA DO CORDÃO (AC), LARGURA DO CORDÃO (LC), PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO (PC), ÂNGULO DE MOLHADO (WA) E ZONA DE DILUIÇÃO	98
FIGURA 12. SEÇÃO TRANSVERSAL DE 8 CORDÕES DE UMA AMOSTRA.....	102
FIGURA 33. VALORES MÉDIOS ALTURA DO CORDÃO (AC), LARGURA DO CORDÃO (LC) E PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO (PC) PARA OS DIFERENTES NÍVEIS DE OPERAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO.....	103
FIGURA 34. VALORES MÉDIOS DE RAZÃO AC/LC, DILUIÇÃO (D) E ÂNGULO DE MOLHADO (WA) PARA OS DIFERENTES NÍVEIS DE OPERAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO.....	103
FIGURA 35. CORRELAÇÃO ENTRE VALORES SIMULADOS E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA AC, LC E PC	105
FIGURA 36. CORRELAÇÃO ENTRE VALORES SIMULADOS E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA RAZÃO AC/LC, D E WA	106
FIGURA 37. CONFIGURAÇÃO DO FIS 2	109
ATIVIDADE 1.2.1 - CONFIGURAÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA DENSIDADE VOLUMÉTRICA DE ENERGIA (Ev).....	109
FIGURA 38. MOTOR DE INFERÊNCIA MAMDANI PARA A VARIÁVEL SIMULADA DENSIDADE DE ENERGIA EV (J/MM ³).....	109
FIGURA 39. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E CONJUNTOS FUZZY PARA CADA PARÂMETRO DE ENTRADA (A-D), E DE SAÍDA PARA A VARIÁVEL SIMULADA EV (J/MM ³) (E)	111
FIGURA 40. BASE DE REGRAS PARA A VARIÁVEL DE SAÍDA SIMULADA EV (J/MM ³).....	112
FIGURA 41. VISUALIZADOR DE REGRAS PARA A VARIÁVEL DE SAÍDA SIMULADA EV (J/MM ³)	113
FIGURA 42. MAPAS 3D DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E A VARIÁVEL SIMULADA EV (J/MM ³)	114
FIGURA 43. VALORES MÉDIOS DA EV (J/MM ³) PARA CADA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PL (W) E FP (G/S).....	115
FIGURA 44. CORRELAÇÃO ENTRE VALORES SIMULADOS PARA A DENSIDADE DE ENERGIA EV (J/MM ³) E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	118
FIGURA 45. VISTA FRONTAL E LATERAL DO SISTEMA HÍBRIDO USADO NOS EXPERIMENTOS	138
FIGURA 46. CABEÇOTE DE USINAGEM E MESA ROTATIVA (EZQ.) E CABEÇOTE DO LASER E AMOSTRA ANTES DE EXECUTAR A DEPOSIÇÃO DE METAL (DIR.)	139
FIGURA 47. MÓDULO DO CABEÇOTE LASER E O CABEÇOTE DE USINAGEM.....	139
FIGURA 48. MÓDULO DE FORNECIMENTO DO PÓ	140

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. PARÂMETROS DO PROCESSO HÍBRIDO E NÍVEIS OPERACIONAIS	81
TABELA 2. VALORES MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA ANALISADAS PARA CADA CONDIÇÃO EXPERIMENTAL	100
TABELA 3. ANOVA PARA A VARIÁVEL AC	101
TABELA 4. ANOVA PARA A VARIÁVEL LC.....	101
TABELA 5. ANOVA PARA A VARIÁVEL PC	101
TABELA 6. ANOVA PARA AC/LC	101
TABELA 7. ANOVA PARA D	101
TABELA 8. ANOVA PARA WA.....	102
TABELA 9. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES EXPERIMENTAIS DE AC, LC E PC VS. ODM PREVISTO E ERRO (%)......	104
TABELA 10. PARÂMETROS DE ENTRADA DO FIS.....	110
TABELA 11. VALORES EXPERIMENTAIS VS. ODM PREVISTO E ERRO (%)......	117

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. MODELOS PARA PPMH	33
QUADRO 2. ETAPAS DA METODOLOGIA PROPOSTA POR MANSON (2006).....	48
QUADRO 3. PROTOCOLO DE PESQUISA E RESULTADOS DA BUSCA NAS BASE DE DADOS.....	54
QUADRO 4. PARÂMETROS DO PROCESSO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D – TRIDIMENSIONAL

AB – AGENT BASED

AC – ALTURA DO CORDÃO

AM – ADDITIVE MANUFACTURING

ANN – ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ANOVA – ANALYSIS OF VARIANCE

CAD – COMPUTER AIDED DESIGN

CAM – COMPUTER AIDED MANUFACTURING

CAPP – COMPUTER AIDED PROCESS PLANNING

CCD – CENTRAL COMPOSITE DESIGN

CNC – COMPUTER NUMERICAL CONTROL

CTD – CONTACT TIP DISTANCE

DC – DETECÇÃO DA COLISÃO

DED – DIRECTED ENERGY DEPOSITION

DF – DIREÇÃO DE FABRICAÇÃO

DFM – DESIGN FOR MANUFACTURING

DG – DECOMPOSIÇÃO GEOMÉTRICA

DMD – DIRECT METAL DEPOSITION

DSR – DESIGN SCIENCE RESEARCH

EDM – ELECTRIC DISCHARGE MACHINING

ES – ESTRUTURA DE SUPORTE

EV – VOLUME ENERGY DENSITY

FDM – FUSED DEPOSITION MODELING

FIS – FUZZY INFERENCE SYSTEM

FL – FUZZY LOGIC

FS – FUZZY SET

GRA – GRAY RELATIONAL ANALYSIS

HMT – HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES

KBS – KNOWLEDGE BASED SYSTEMS

LC – LARGURA DO CORDÃO

LENS – LASER ENGINEERED NET SHAPING

LMD – LASER METAL DEPOSITION

MA – MANUFATURA ADITIVA

MCDA – MÉTODOS DE ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

OP – ORIENTAÇÃO DA PEÇA

PBF – POWDER BED FUSION

PC – PENETRAÇÃO DO CORDÃO

PN – PETRI NETS

PPMH – PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA

PRISMA – PREFERRED REPORTING ITEMS FOR SYSTEMATIC REVIEWS AND META-ANALYSIS

PT – PLANEJAMENTO DA TRAJETÓRIA

RSLs – REVISÕES SISTEMÁTICAS DA LITERATURA

RSM – RESPONSE SURFACE METHOD

SM – SUBTRACTIVE MANUFACTURING

SO – SEQUENCIAMENTO DAS OPERAÇÕES

STEP – STANDARDS FOR EXCHANGE OF PRODUCT MODEL DATA

WA – WETTING ANGLE

1 INTRODUÇÃO

A utilização das tecnologias híbridas de manufatura (HMT - *Hybrid Manufacturing Technologies*) que combinam a manufatura aditiva (AM – *additive manufacturing*) e a subtrativa (SM – *subtractive manufacturing*), atrai crescente atenção por parte da indústria e da academia pela sua capacidade de combinar processos/máquinas com flexibilidade e melhor utilização de recursos, materiais e redução do *time-to-market* das peças e componentes produzidos (KARUNAKARAN *et al.*, 2010; FLYNN *et al.*, 2016; NEWMAN *et al.*, 2015; GUESSASMA *et al.*, 2015; FALUDI *et al.*, 2015).

A oportunidade de agrupar processos de manufatura aditiva e subtrativa em apenas um sistema de manufatura permite fabricar, reparar e remanufaturar peças e componentes tridimensionais (3D) e com superfícies complexas, que naturalmente não poderiam ser construídos pelos métodos tradicionais de manufatura (LASEMI *et al.*, 2010; XIAO *et al.*, 2018). A manufatura aditiva possibilita a construção de uma peça, ou de um detalhe de uma peça, pela deposição de camada por camada de material de forma flexível. Já a manufatura subtrativa, como por exemplo a usinagem, é usada para obter o acabamento das peças ou detalhes construídos devido à capacidade de processar o material de forma precisa e seletiva, aprimorando a qualidade das características superficiais (SINGH *et al.* 2017; ATTARAN, 2017; TOFAIL *et al.*, 2018).

A técnica de adição de material metálico que apresenta mais aderência para ser integrada em um sistema híbrido de manufatura, ou seja, uma única máquina onde é executado tanto o processo aditivo quanto o subtrativo, é a deposição de metal a laser (LDM – *Laser Metal Deposition*) (FLYNN *et al.*, 2016), que se deriva da tecnologia de deposição de energia direta (DED – *directed energy deposition*) (ISO/ASTM, 2015).

Cortina *et al.* (2018a, b) corroboram que a LMD é mais vantajosa devido à sua versatilidade para fabricar, remanufaturar e reparar geometrias complexas, com alto valor agregado e que pelo elevado custo, não justificam seu descarte (LIU *et al.*, 2017). A principal razão é que a tecnologia LMD gera

uma menor e bem localizada zona de calor durante o processo de deposição, com maior taxa de deposição quando comparada a outras técnicas e sem necessidade de passo intermediário de nivelamento do pó, já que a deposição de pó ocorre através do bocal coaxial junto ao feixe de laser.

Antes da execução do processo híbrido que integra a LMD e a usinagem (objeto de estudo desta tese) para a manufatura de uma determinada geometria é importante realizar um adequado planejamento do processo para se ter uma visão integral e proativa da operação para que o processo se mantenha estável durante a produção de um componente, objeto 3D ou parte destes (CORTINA *et al.*, 2018c).

Cortina *et al.* (2018c); Chong *et al.* (2018); Dávila *et al.* (2020); Zhang *et al.* (2020) e Rossi e Lanzetta (2020) destacam que a total implementação das tecnologias híbridas no cenário empresarial atual é afetada principalmente pelos modelos limitados e metodologias não padronizadas de planejamento do processo de manufatura híbrida.

Segundo Zheng *et al.* (2020), os trabalhos sobre planejamento do processo de manufatura híbrida, ainda se encontram em estágio inicial de estruturação. Para Cortina *et al.* (2018c), os desafios que as pesquisas sobre máquinas híbridas e suas tecnologias ainda precisam enfrentar vêm principalmente do processo aditivo que é uma tecnologia ainda em fase de estudos e desenvolvimento.

Os trabalhos já desenvolvidos sobre planejamento do processo estudam, na sua maioria, o processo aditivo e sua relação com a geometria fabricada por meio do uso de modelos estatísticos e matemáticos. Os modelos estatísticos se baseiam na combinação das abordagens: CCD (*Central Composite Design*), RSM (*Response Surface Method*) e ANOVA (*Analysis of Variance*) (SUN e HAO, 2012; FARAHMAND e KOVACEVIC, 2014; LIU e KOVACEVIC, 2014); RSM e ANOVA (ANSARI *et al.*, 2019); experimentos ortogonais (YU *et al.*, 2018) e análise fatorial (GRAF *et al.*, 2013). Arrizubieta *et al.* (2018), Wu *et al.* (2019) e Huang *et al.* (2019), por sua vez, desenvolvem suas pesquisas por meio do uso de modelos matemáticos e métodos numéricos.

Outros estudos sobre planejamento do processo focam especificamente na otimização da estratégia de deposição (SINGH e DUTTA., 2001; DING *et*

al., 2016; ZHANG *et al.*, 2016), e no planejamento da trajetória da ferramenta (EIAMSA-ARD *et al.*, 2005; RUAN *et al.*, 2005; REN *et al.*, 2006; REN *et al.*, 2008).

O estudo desenvolvido por Rossi e Lanzetta (2020) foca na determinação da sequência ótima das operações que garante a flexibilidade do processo em função da acessibilidade das ferramentas a certas regiões da peça fabricada para garantia da fusão do material. Por sua vez, os estudos de Chen-Li *et al.* (2018) e Chen-Li *et al.* (2020) têm sido voltados para determinação da sequência ótima das operações, com foco na operação subtrativa, para a prevenção da colisão entre a peça a ser fabricada e a ferramenta de corte e o bocal de deposição de material.

Abordagens para planejamento do processo híbrido visando a redução de custos, desperdícios, consumo de energia e extensão da vida útil dos produtos foram estudadas nos trabalhos de Le *et al.* (2015; 2017a, b, c; 2018a, b). Chen e Frank (2019) estudam a configuração ótima do processo de usinagem, a orientação da peça e da deposição (AM) e a estrutura de suporte (fixação) com foco na melhoria da capacidade de manufatura e eficiência econômica do processo. Abdulhameed *et al.* (2018) e Eldakrouy *et al.* (2018) estudam diferentes cenários de manufatura e otimização da seleção do substrato com base em modelos de análise de custos e redução do tempo de manufatura.

Behandish *et al.* (2018) propõem combinações da sequência das operações para integrar o processo aditivo e subtrativo com base no custo-benefício da integração. A maximização das capacidades do processo híbrido com foco no aumento da produtividade é estudada por Zhang *et al.* (2020). Já Zheng *et al.* (2020) estudam o planejamento do processo híbrido com base em modelos de minimização do custo com foco na remanufatura. Nos trabalhos de Ruan *et al.* (2005); Liou *et al.* (2001; 2007); Manogharan *et al.* (2015); Chen, N *et al.* (2018), o processo híbrido é estudado atendendo de forma separada cada atividade.

Os modelos de planejamento do processo de manufatura híbrida encontrados na literatura contemplam a inclusão de três etapas, que são comuns para o desenvolvimento do processo (autores citados nos tópicos i a vii), sendo, a etapa de modelagem CAD (*Computer Aided Design*); a etapa de

planejamento do processo; e, a etapa de execução do processo (CAM - *Computer Aided Manufacturing*). Estas etapas são a base do ciclo da manufatura aditiva, apresentadas por Kulkarni *et al.* (2000). Kulkarni *et al.* (2000), propuseram um modelo de planejamento do processo de manufatura aditiva, naquele momento identificada como “manufatura camada por camada”, com base numa revisão de literatura voltada para a identificação das principais etapas e atividades inerentes ao processo. Este modelo foi selecionado como referência pelo fato de a revisão da literatura apresentar uma comparação entre diferentes processos de manufatura aditiva (estereolitografia, modelagem por fusão da deposição, sinterização seletiva a laser, manufatura de objetos laminados e impressão 3-D), associando cada um deles às etapas de manufatura identificadas e possíveis problemas a serem resolvidos quando executada cada uma das etapas. Inclusive, orienta o planejamento do processo de manufatura híbrida uma vez que peças com geometrias complexas requerem acesso irrestrito da ferramenta de remoção de material para exigência de qualidade superficial superior à gerada apenas pelo processo aditivo.

Ainda segundo o Kulkarni *et al.* (2000), a etapa de planejamento do processo aditivo deve incluir a definição de cinco atividades a serem atendidas pelo processo para garantia de sua estabilidade, atividades estas apoiadas pelos autores que desenvolveram modelos de planejamento voltados para processo híbrido, conforme explanado a seguir:

- (i) A orientação da peça, que impacta o processo em função do custo e tempo de manufatura, qualidade superficial, estabilidade do volume depositado e do volume da estrutura de suporte (fixação) utilizada (LIOU *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2015; ABDULHAMEED *et al.*, 2018; ELDAKROURY *et al.*, 2018; ROSSI e LANZETTA, 2020);
- (ii) A direção de fabricação, que implica a determinação da melhor estratégia de deposição para atender às propriedades geométricas da peça (RUAN *et al.*, 2005; LIOU *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2015; JOSHI e ANAND, 2017; BEHANDISH *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020; BARRAGAN *et al.*, 2021);
- (iii) A estrutura de suporte (fixação), que quanto menor seja a estrutura necessária para fabricar a peça, menor o custo e tempo de manufatura,

pois a remoção estende o processo de manufatura e implica muitas vezes o descarte desta estrutura (JOSHI e ANAND, 2017; ELDAKROURY *et al.*, 2018);

- (iv) A decomposição geométrica da peça, que implica a decomposição da geometria em camadas de altura uniforme ou variável para realizar a deposição até finalizar o processo de manufatura (EIAMSA-ARD *et al.*, 2005; RUAN *et al.*, 2005; LIOU *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2015; CHEN-LI *et al.*, 2018; ELDAKROURY *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020; BARRAGAN *et al.*, 2021); e,
- (v) O planejamento da trajetória da ferramenta, que implica a determinação da trajetória geométrica da ferramenta de deposição de material em função dos parâmetros dos processos e do modelo CAD a ser construído (EIAMSA-ARD *et al.*, 2005; RUAN *et al.*, 2005; REN *et al.*, 2006; LIOU *et al.*, 2007; JOSHI e ANAND, 2017; BEHANDISH *et al.*, 2018; ELDAKROURY *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020; BARRAGAN *et al.*, 2021).

Quando a etapa de planejamento do processo híbrido é estruturada, alguns autores sugerem que junto ao planejamento da trajetória da ferramenta de deposição deve-se considerar também o planejamento da trajetória da ferramenta de remoção de material (processo subtrativo) (CORTINA *et al.*, 2018c; BASSINGER *et al.*, 2018; ROSSI e LANZETTA, 2020). WANG *et al.* (2015), CHEN-LI *et al.* (2018) e CHEN-LI *et al.* (2020) sugerem ainda que o planejamento da trajetória da ferramenta subtrativa é de suma importância na execução do processo de manufatura híbrida seja para garantia da qualidade superficial do produto fabricado ou como processo alternativo ou intermediário.

Outros autores sugerem que sejam ainda definidas mais duas atividades no planejamento do processo de manufatura híbrida:

- (vi) O sequenciamento das operações, que visa determinar a sequência de execução das atividades aditivas e subtrativas com vistas à redução do tempo de operação, do custo e garantia das propriedades geométricas, físicas e mecânicas da peça (RUAN *et al.*, 2005; JOSHI e ANAND, 2017; ABDULHAMEED *et al.*, 2018; BEHANDISH *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020; ROSSI e LANZETTA, 2020; BARRAGAN *et al.*, 2021); e,

(vii) A detecção da colisão entre as ferramentas de manufatura e o substrato ou superfície a ser construída. Esta atividade do planejamento do processo híbrido surge pela necessidade de a ferramenta de subtração ou adição acessar a partes da peça que são ocas ou côncavas (RUAN *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2015; ELDAKROURY *et al.*, 2018; BEHANDISH *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020).

Outra questão de fundamental importância em um modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida é a integração de uma etapa de simulação que permita verificar de forma proativa se as condições experimentais do processo estão adequadas para garantir a manufatura da geometria modelada mesmo antes de executar o processo de manufatura híbrida, o que implica na redução de desvios geométricos e consequente melhoria da qualidade. Adicionalmente, reduz a necessidade de experimentação excessiva, que representa elevado consumo de material e tempo de manufatura, o que pode ser caro e resultar numa estratégia de deposição deficiente (CORTINA *et al.*, 2018c; ROSSI e LANZETTA, 2020; ZHANG *et al.*, 2020).

Manter as condições experimentais da operação estáveis para garantir um processo preciso depende de quão robusta seja a compreensão e avaliação da integração dos parâmetros do processo de forma holística, assim como a estimativa de seu efeito nas características geométricas da peça ou componente produzido (NEWMAN *et al.*, 2015). Alguns parâmetros do processo de manufatura híbrida, especificamente os relacionados ao processo aditivo, como por exemplo, potência do laser; fluxo de pó; distância de afastamento do bocal de deposição; velocidade de avanço do laser; fluxo de gás e diâmetro focal do feixe de laser, são os que mais se estudam, e os que mais incidem nas características geométricas, propriedades físicas e mecânicas dos componentes ou peças fabricadas (DEBROY *et al.*, 2018; MAHAMOOD, 2018; CORTINA *et al.*, 2018 a, b, c; SIBISI *et al.*, 2020). Já os parâmetros subtrativos: percurso da ferramenta de corte, orientação da ferramenta com relação ao substrato, velocidade da ferramenta de corte e profundidade do corte são os mais usados na configuração do processo de manufatura híbrida (Lasemi *et al.*, 2016; Abdulhameed *et al.*, 2018).

Foram identificados na literatura quatorze modelos de PPMH sendo que, apenas seis incluem uma atividade de simulação, porém de forma parcial, considerando apenas o processo aditivo. Estes modelos avaliam o desempenho de no máximo dois parâmetros do processo aditivo. Dos seis modelos, dois simulam a interação dos parâmetros do processo aditivo, potência do laser e fluxo de pó, e seu efeito no substrato (LIOU *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2015). O modelo de Eldakrouy *et al.* (2018) avalia a detecção da colisão entre a ferramenta de deposição e o substrato. Dois modelos simulam a experimentação do algoritmo computacional proposto pelos autores (CHEN-LI *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020), visando a determinação da sequência mínima entre as operações para acesso das ferramentas de deposição e subtração. Por último, o modelo proposto por Zhang *et al.* (2020), simula a interação de apenas um parâmetro do processo (espaçamento lateral entre os cordões de material depositado) (*hatch space*) na altura da camada.

Observa-se na literatura que o planejamento do processo para soluções híbridas apresenta questões pendentes, em que é necessário fazer progressos substanciais (CORTINA *et al.*, 2018c; DÁVILA *et al.*, 2020; SIBISI *et al.*, 2020). Esta é uma questão complexa, cujo resultado pode variar dependendo da geometria a ser fabricada, pois cada sistema híbrido é específico e diferente devido às tecnologias que integra, e configurando-se uma abordagem preditiva do modelo que implica uma etapa de simulação da variação de múltiplos parâmetros do processo em combinações diferentes sugere um método de planejamento diferenciado conforme o escopo de aplicação (CORTINA *et al.*, 2018c).

Portanto, até onde se pôde pesquisar, verifica-se que nenhum dos quatorze modelos de planejamento do processo de manufatura híbrida encontrados na literatura contempla, em simultâneo, as sete atividades a serem atendidas pelo processo. Adicionalmente, não consideram a etapa de simulação como uma atividade inerente ao planejamento e que permita simular o desempenho de múltiplos parâmetros do processo híbrido para avaliar o efeito de sua interação nas características geométricas da deposição, mesmo antes de que o processo seja executado. Essas questões se apresentam como uma oportunidade de estudo relevante tornando-se uma linha de pesquisa a ser explorada

Verifica-se pelas limitações dos modelos apresentados na literatura, que a configuração de um modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida com abordagem preditiva, ou seja, que integre uma etapa de simulação multiparamétrica do processo híbrido, e que na própria etapa de planejamento sejam integradas em um único modelo as sete atividades da operação para atendimento aos requisitos operacionais e de qualidade, num planejamento mais completo e abrangente do processo, permanece uma linha de pesquisa a ser explorada.

A partir dessa contextualização surge a seguinte questão de pesquisa: **É possível estruturar um modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida com abordagem preditiva, que integre de forma abrangente as sete atividades da operação, assim como uma etapa de simulação multiparamétrica para garantia da estabilidade do processo por meio da configuração de uma estratégia de manufatura adequada?**

1.1. OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é propor um modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida com abordagem preditiva que integre as sete atividades a serem atendidas pela operação, assim como uma etapa de simulação multiparamétrica que permita avaliar o desempenho de múltiplos parâmetros do processo híbrido e seu efeito nas características geométricas para garantia da estabilidade do processo.

Como objetivos específicos definem-se os seguintes:

1. Identificar as atividades necessárias à execução do processo híbrido de manufatura;
2. Identificar os parâmetros críticos do processo híbrido;
3. Definir a sequência adequada das operações do processo híbrido;
4. Selecionar a ferramenta para simulação do desempenho da integração de múltiplos parâmetros do processo e seu efeito nas variáveis de saída;
5. Estruturar os experimentos para simular e executar o processo híbrido.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

A presente pesquisa é composta por seis capítulos. O capítulo introdutório (Capítulo 1) aborda por meio da contextualização do tema a originalidade e relevância desta pesquisa, a definição do problema, a lacuna e a questão de pesquisa, e por fim, os objetivos geral e específicos. O Capítulo 2 apresenta o estado da arte sobre o processo de manufatura híbrida que integra a manufatura aditiva e subtrativa, classificação e definições, benefícios da integração dos processos de LMD (aditivo) e usinagem (subtrativo), os modelos e métodos existentes para planejamento e validação do processo de manufatura híbrida, assim como as técnicas e ferramentas de simulação de processos e apoio à tomada de decisão que contribuíram para o desenvolvimento da proposta desta pesquisa. O Capítulo 3 apresenta a classificação da pesquisa, a abordagem metodológica e os procedimentos aplicados para o seu desenvolvimento. O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva, apoiado na metodologia *Design Science Research* (DSR). O Capítulo 5 apresenta a aplicação do modelo a partir da condução de experimentos, assim como a discussão dos resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

A Figura 1 apresenta, em linhas gerais, as principais fases do desenvolvimento da tese.

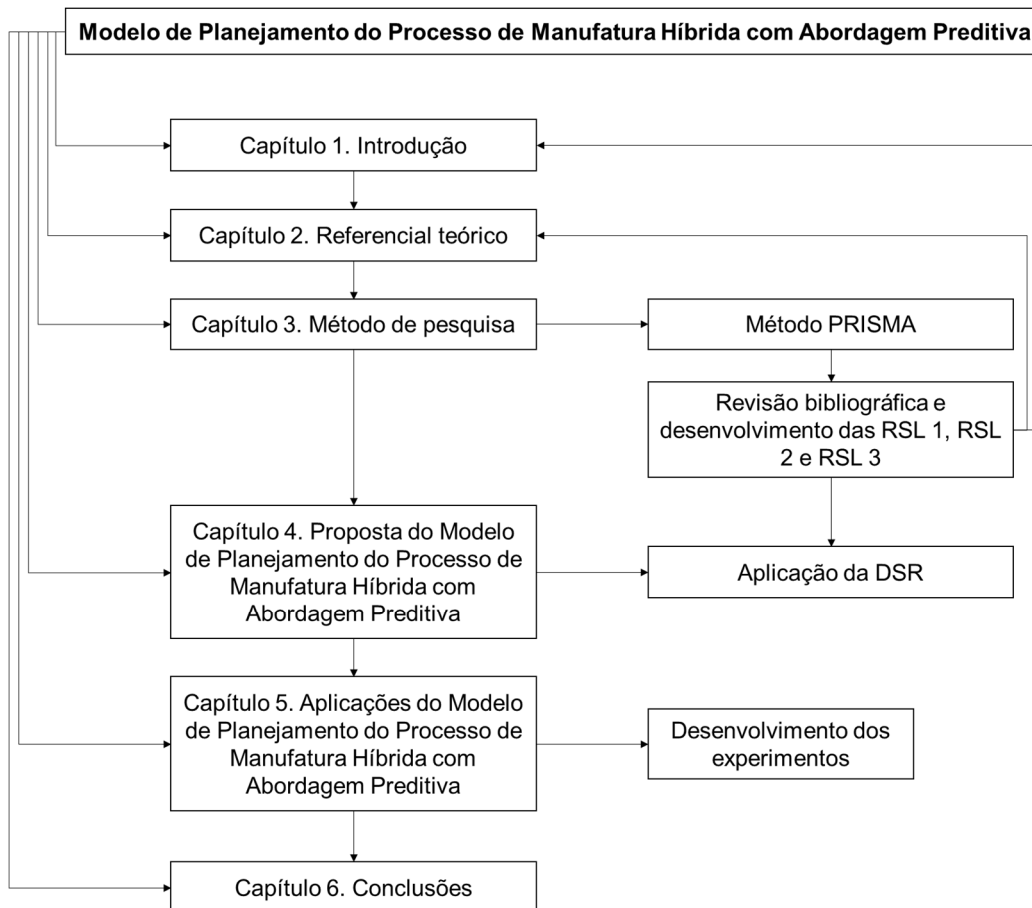


FIGURA 1. PRINCIPAIS FASES DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordadas as principais definições e as principais pesquisas utilizadas para o desenvolvimento desta tese, identificadas por meio de revisões narrativas e sistemáticas da literatura. Este referencial teórico está dividido em seis seções: (1) Classificação dos processos de manufatura; (2) Definições do processo híbrido de manufatura; (3) Planejamento do processo de manufatura híbrida; (4) Modelos de planejamento do processo de manufatura híbrida; (5) Técnicas de simulação de processos; e, (6) *Design Science Research*.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MANUFATURA

A manufatura híbrida é constantemente associada à integração de processos, atividades, materiais, recursos, técnicas e ferramentas, para a manufatura de produtos, peças e componentes com capacidade superior aos processos tradicionais de produção (XIAO *et al.*, 2018), qual sejam, fundição, corte, moldagem, usinagem, união, processos de deformação de metal (*bulk deformation*), laminado, entre outros (CREESE, 1999; SWIFT e BOOKER, 2003).

Nassehi *et al.* (2011) propuseram uma classificação, baseada na tecnologia, para os diferentes processos que poderiam ser integrados para manufatura híbrida, a saber:

- De união (*joining*), envolvem processos nos que duas ou mais peças são unidas para formar uma nova, por exemplo, soldagem e montagem;
- De divisão (*dividing*), envolvem processos com princípios opostos aos de união, por exemplo, serramento/seccionamento e desmontagem;
- Subtrativos (*subtractive*), envolvem processos de remoção/subtração de material de uma única peça para obter uma nova, como por exemplo, os processos de usinagem, tais como fresamento, torneamento, eletroerosão (EDM – *electric discharge machining*), corte por jato de água;

- Transformativos/transformadores (*transformative*), processos em que uma peça de trabalho é usada para criar outra não mudando a massa. Exemplos de processos transformativos são forjamento, conformação, extrusão, roleteamento, tratamento térmico e resfriamento criogênico, entre outros; e
- Aditivos (*additive*), envolve processos em que o material é adicionado a uma peça de trabalho existente ou substrato para criar uma peça onde a massa do componente final (peça acabada) é maior do que antes. Prototipagem rápida, fundição e moldagem por injeção são processos que se incluem nesta definição.

Pesquisas recentes discorrem sobre o uso do processo de polimento a laser (*laser polishing*) como um método de acabamento superficial, que inerentemente envolve a remoção de material, e que é considerado um método subtrativo (ANNAMARIA *et al.*, 2022). Já Zhang *et al.* (2022) usam nanopulsos de laser para limpeza superficial de metal como mecanismo de remoção.

2.2 DEFINIÇÕES DE PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA

As definições que aparecem na literatura sobre o processo híbrido de manufatura são diversas. Rajurkar *et al.* (1999) empregam o termo “processo híbrido” para definir a usinagem híbrida que integra dois ou mais processos de usinagem para remoção de material. Com a mesma abordagem, Aspinwall *et al.* (2001) afirmam que a execução de dois ou mais processos de usinagem de forma independente numa mesma máquina ou de forma simultânea também configura um processo de usinagem híbrida.

Menzies e Koshy (2008) usaram o termo “processo de usinagem híbrido” para definir a integração de dois processos de usinagem com mecanismos diferentes para remoção de material, a saber, abrasão e EDM. Por outro lado, Curtis *et al.* (2009) afirmam que um método pode ser denominado “híbrido” quando dois ou mais processos de remoção de material se executam de forma simultânea.

Observa-se até aqui que há uma concepção do processo híbrido voltada à integração de processos subtrativos com mecanismos de remoção

diferentes, e que podem ser integrados ou não numa mesma máquina e executados de forma simultânea ou independente.

Mognol *et al.* (2006) orientam a definição de manufatura híbrida como a manufatura de um protótipo produzido pela combinação de diferentes processos, sendo geralmente o de prototipagem rápida integrado a um dos processos convencionais. Observa-se nesta definição que, independentemente da forma de execução, duas tecnologias de processos, e inerentemente com diferentes princípios de operação, podem ser integradas para se constituírem um processo de manufatura híbrida. Orienta-se esta definição ao uso exclusivo da manufatura aditiva integrada a qualquer outro processo convencional de manufatura.

Nau *et al.* (2011) orientam sua definição levando em consideração o consumo de energia. Neste sentido, definem como processos híbridos de manufatura aqueles em que *“diferentes formas de energia ou formas de energia causadas de maneiras diferentes, respectivamente, sejam usadas ao mesmo tempo na mesma zona de impacto”*. Fica explícita nesta definição a necessidade de garantir a simultaneidade da operação numa mesma zona de trabalho, porém sem especificar se é uma única máquina ou diferentes.

Uma revisão da literatura desenvolvida por Zhu *et al.* (2013a) sugere que abordagens que combinam duas ou mais operações de manufatura também são consideradas como “processos híbridos”. Cada uma das operações implica uma tecnologia de manufatura diferente, e interage e influencia as demais.

Nassehi *et al.* (2011) e Zhu *et al.* (2013a) apresentam três definições de processo híbrido sugeridas pela CIRP (2011), sendo: (i) *“Aplicação integrada ou combinação de diferentes princípios físicos ativos”*; (ii) *“Combinação integrada de etapas do processo geralmente realizadas separadamente”*; e, (iii) *“Máquinas integradas, conhecidas como máquinas híbridas, que podem executar diferentes processos em um só ambiente”*.

A definição (i) diz a respeito da integração de duas técnicas diferentes para executar o mesmo processo, por exemplo, usinagem assistida por laser e a usinagem convencional (DANDEKAR *et al.*, 2010). Geralmente esta técnica se usa para preservar a durabilidade das ferramentas de corte evitando o desgaste excessivo. A definição (ii) implica a integração de sub-etapas de

um processo realizadas numa sequência determinada e que posteriormente possa ser combinada com um outro processo diferente, por exemplo, conformação incremental de chapas e conformação por estiramento combinadas com aquecimento a laser (ARAGHI *et al.*, 2009). Já a definição (iii) se apresenta mais geral quanto à delimitação dos tipos de processos a serem integrados, o princípio de funcionamento, tecnologias, zona de trabalho ou impacto da peça ou componente, e a sequência da execução das operações. Apenas delimita-se a oportunidade de executar o processo em um ambiente único.

Neste sentido, na pesquisa de Chen *et al.* (2022); Gao *et al.* (2022); Barragan *et al.* (2021); Cortina *et al.* (2018c); Dávila *et al.* (2020) e Flynn *et al.* (2016) pode-se aprofundar sobre esta abrangência na classificação do processo híbrido de manufatura, não só envolvendo a manufatura aditiva e subtrativa.

Lauwers *et al.* (2014) agrupam as abordagens apresentadas por Nassehi *et al.* (2011) e Zhu *et al.* (2013a) com foco apenas na integração de processos subtrativos. Segundo Lauwers *et al.* (2014) os processos híbridos de manufatura *“baseiam-se na interação simultânea e controlada dos mecanismos do processo, ferramentas e/ou fontes de energia que têm um efeito significativo no desempenho do processo”*. Estes autores indicam que a expressão *“interação simultânea e controlada”* significa que os processos/fontes de energia que se integram devem interagir mais ou menos na mesma zona de processamento e ao mesmo tempo.

No entanto, a partir da definição de Lauwers *et al.* (2014), são apresentadas duas subclassificações do processo híbrido: (i) orientada à combinação de fontes ou formas de energia, que vai ao encontro da definição de Nau *et al.* (2011); e, (ii) aplicação controlada de mecanismos do processo híbrido, ou seja, realizada em processos separados, de forma convencional. A segunda subclassificação sugere a execução das atividades de dois processos não necessariamente de forma simultânea, o que poderia ser de uma forma intercambiável, porém não se especifica se é feita na mesma máquina (máquina híbrida), como apresentado nos trabalhos de Nassehi *et al.* (2011) e Zhu *et al.* (2013a).

Observa-se na literatura, como fundamentado por Zhu *et al.* (2013a), que não há total consenso sobre a definição do termo, dada as diferentes abordagens empregadas.

A partir das diferentes definições apresentadas, e a orientação a diferentes processos e áreas de aplicação, neste trabalho opta-se por adotar a definição de processo de manufatura híbrida que vai ao encontro das classificações apresentadas por Nassehi *et al.* (2011) e Zhu *et al.* (2013a), que implica a interação de dois ou mais processos de manufatura diferentes (princípios de operação distintos), integrados em uma mesma máquina, e que podem ser executados de forma independente, sobre a mesma área de uma peça ou diferentes áreas seguindo uma sequência predeterminada para um determinado fim (adição/remoção de material, manufatura).

Especificamente, esta tese estuda o processo híbrido que combina a manufatura aditiva (LDM) e subtrativa (usinagem) num mesmo sistema de trabalho (máquina híbrida). Embora a manufatura subtrativa possibilite a produção de componentes com elevada precisão e qualidade superficial, ela tem limites para processar peças com geometrias complexas e em formato 3D dada a pouca acessibilidade das ferramentas de corte a regiões curvas e partes ocas de uma peça. A manufatura aditiva (AM), por outro lado, permite a produção de peças com superfícies complexas e tridimensionais, mas a qualidade e precisão da superfície final são relativamente inferiores. A partir deste contexto a manufatura híbrida se torna um caminho para garantia das superioridades e supressão das limitações de ambos os processos.

2.2.1 INTEGRAÇÃO DA USINAGEM E A LMD NA MANUFATURA HÍBRIDA

Os processos convencionais de manufatura, dentre eles, furação, torneamento, fresamento, usinagem, entre outros, quando automatizados são realizados por máquinas-ferramentas com controle numérico computadorizado (CNC – *Computer Numerical Control*). A função principal do CNC consiste em controlar o movimento relativo da ferramenta e/ou da peça de trabalho para garantir uma melhor qualidade no processamento. A usinagem CNC permite a produção de peças com a geometria desejada por meio de corte do material ou a retirada de excessos indesejados, o que por

sua vez, gera uma quantidade de material desperdiçado. Esses processos também são referidos como manufatura subtrativa (MÜLLER e WINGS, 2016).

Quando integrada com um processo aditivo, caracterizando a manufatura híbrida, a usinagem é eficientemente empregada para eliminar ou reduzir problemas como o efeito “degrau” (*stair-step effect*) (XIAO *et al.*, 2018), que é resultante da deposição “*layer upon layer*” (ISO/ASTM, 2015), e determina a qualidade da superfície final da peça, objeto ou componente fabricado via manufatura aditiva.

Esta estratégia de manufatura contribui para garantir a confiabilidade metrológica (dimensões) das peças e componentes produzidos (GUESSASMA *et al.*, 2015), reduzir os custos associados ao processo (FLYNN *et al.*, 2016), e subtrair material em regiões específicas de uma peça e de forma precisa e seletiva (SINGH *et al.*, 2017).

A combinação do processo de usinagem com o processo aditivo representa uma oportunidade para sua aplicação em setores que produzem baixo volume de peças de alta complexidade e com custo elevado, que estão sujeitas a desgaste e outros tipos de danos, permitindo assegurar o atendimento aos requisitos de qualidade exigidos, principalmente em aplicações críticas, como por exemplo, nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, esportiva, médica e de moldes e matrizes (FLYNN *et al.*, 2016; TOFAIL *et al.*, 2018).

Já a AM é completamente diferente dos processos tradicionais na medida em que a abordagem de manufatura empregada segue uma configuração “de baixo para cima”, por meio da qual se pode construir uma estrutura “camada por camada” (*layer by layer*) (FLYNN *et al.*, 2016). A deposição de material camada por camada permite uma liberdade de design sem precedentes na manufatura de qualquer tipo de estrutura geométrica (SCHMIDT *et al.*, 2017).

A norma conjunta ISO/ASTM 52900:2015 (ISO/ASTM, 2015) define a manufatura aditiva (AM) como “*um processo de união de materiais para criar objetos a partir de dados de um modelo 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição a metodologias de manufatura subtrativa e formativa*”. Alguns dos sinônimos definidos na norma são *manufatura aditiva, processos*

aditivos, técnicas aditivas, manufatura aditiva em camadas, manufatura em camadas, manufatura livre sólida e manufatura livre.

Dentre as técnicas de AM com metais mais versáteis se encontra a Deposição de Metal a Laser (LMD – *Laser Metal Deposition*) (GIBSON *et al.*, 2010; FLYNN *et al.*, 2016), que se deriva da tecnologia conhecida como Deposição por Energia Direcionada (DED - *Directed Energy Deposition*) (ISO/ASTM, 2015). A LMD é também conhecida como *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), *Direct Metal Deposition* (DMD), *Direct Laser Deposition*, recobrimento a laser (*laser cladding*) entre outros (DUTTA *et al.*, 2011).

Neste processo uma fonte de energia térmica focalizada funde o material durante a deposição, resultando em peças totalmente densas (TOFAIL *et al.*, 2018). O material, que pode ser um pó metálico ou arame, é fornecido localmente por um bocal de alimentação (coaxial) onde um fluxo de gás inerte, que pode ser hélio ou argônio protege e isola o processamento do material evitando sua oxidação (THOMPSON *et al.*, 2016; ARRIZUBIETA *et al.*, 2017). A fusão do material é feita por meio de um feixe de laser de alta potência direcionado para impactar em um substrato, e camadas consecutivas são depositadas para produzir o objeto 3D desejado (GASSER *et al.*, 2011; SCHMIDT *et al.*, 2017). A Figura 2 apresenta a configuração de um sistema de LMD.

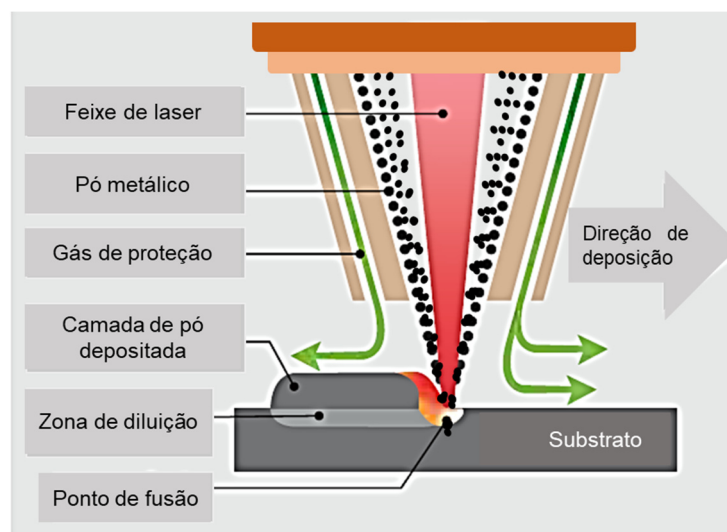


FIGURA 2. CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE LMD

A LMD é vantajosa pela sua capacidade de remanufaturar, fabricar e reparar geometrias complexas (RUIZ *et al.*, 2018; ABDULRAHMAN, 2018;

LEINO *et al.*, 2016), e peças de alto valor agregado, como componentes críticos de motores aeroespaciais (WILSON *et al.*, 2014; KUMAR, 2017), de moldes e matrizes (JHAVAR, 2013), e revestimentos (MAZUMDER, 1996), devido à pequena e localizada zona de calor gerada durante o processo com maior taxa de deposição, quando comparado com outras técnicas como a de Fusão em leito de pó (*Powder Bed Fusion* - PBF) (CORTINA *et al.*, 2018c).

Também são vantagens da LMD a alta velocidade de processamento do material, capacidade de reduzir o tempo de manufatura e o custo, e a possibilidade de manufatura com excelentes propriedades mecânicas e microestruturais (GIBSON *et al.*, 2015). Dentre as limitações, apresenta-se o elevado consumo de energia, a precisão relativamente baixa das peças fabricadas e o fato de que a rugosidade da superfície final do componente resultante geralmente não corresponde aos requisitos finais (baixa qualidade superficial) (FLYNN *et al.*, 2016), implicando numa variabilidade entre o modelo CAD e o fabricado.

Tofail *et al.* (2018) afirmaram que a integração dos processos de manufatura aditiva e subtrativa para a resolução dos desafios técnicos e científicos relacionados com os processos de manufatura, materiais e aspectos metrológicos dos produtos fabricados só pelo processo aditivo é o que determinará a aceitação e oportunidades de comercialização destas tecnologias.

Para melhor compreensão dos processos aditivos e subtrativos e sua integração na manufatura híbrida, Jiménez *et al.* (2021) em seu trabalho apresentam diversas classificações dos processos aditivos e sua integração aos processos subtrativos para configuração da manufatura híbrida. Os autores desenvolveram uma extensa revisão da literatura sobre as pesquisas atuais e os avanços tecnológicos associados às soluções híbridas que contemplam a AM e a subtrativa. O escopo do artigo recai em soluções de manufatura híbrida que combinam as tecnologias de AM baseadas na deposição de metal a laser com processos para pós-processamento, por exemplo, usinagem, tratamentos térmicos, para acabamento superficial, para produzir peças com a precisão, integridade superficial e propriedades do material exigidas. A revisão da literatura inclui a análise da integração de tecnologias de pós-processamento na mesma configuração com os processos

de AM baseados em laser, mas também sequencialmente em soluções híbridas de configuração múltipla, ou seja, processos aditivos e subtrativos executados em máquinas diferentes.

2.2.2 PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE SAÍDA DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA

Na configuração do processo de manufatura híbrida, os parâmetros do processo LMD comumente estudados e que mais incidem nas características geométricas (altura, largura, penetração), e nas propriedades físicas (acabamento superficial, taxa de resfriamento, temperatura, densidade de energia) e mecânicas (microdureza, resistência ao desgaste) da deposição, segundo Debroy *et al.* (2018); Mahamood (2018); Cortina *et al.* (2018c) e Sibisi *et al.* (2020) são:

- Potência do laser (W): é o fluxo de energia térmica emitida pelo feixe de laser, em um determinado intervalo de tempo, para processamento do material depositado;
- Fluxo de pó (g/s): é a quantidade de pó fornecido através do bocal de alimentação por unidade de tempo;
- Distância de afastamento do bocal de deposição (mm): é a distância em que a ponta do bocal de deposição de material se posiciona com relação à superfície do substrato onde se depositará o material;
- Velocidade de avanço/deslocamento/varredura do laser (mm/s): é a taxa de deslocamento do feixe de laser em um determinado tempo enquanto interatua com o material depositado no substrato;
- Fluxo de gás (L/min): é a taxa em que o gás transporta o pó desde o depósito até a zona de fusão no substrato, também tem a função de proteger o pó da oxidação e contaminação;
- Diâmetro focal do feixe de laser (*laser beam diameter*) (mm): é o diâmetro do feixe de laser quando focalizado no substrato medida a uma determinada distância focal;
- Espaçamento lateral da deposição (*hatch space*) (mm): é a distância que separa um cordão de material depositado de outro;

- Taxa de sobreposição (*overlapping rate*) do cordão (%): é o índice de deposição de um cordão sobre outro para gerar uma ou múltiplas camadas de material.
- Ângulo de posição do fluxo de pó (α°): é a orientação espacial do bocal que fornece o material em pó com relação ao substrato onde será depositado o material;
- Ângulo de posição do laser (β°): é a orientação espacial do feixe de laser com relação ao substrato onde será depositado o material.

A distância focal (mm) é a distância entre a posição da lente e a superfície de contacto no substrato (ALAM *et al.*, 2018), já a distância entre o bico do bocal coaxial de saída do laser, do pó e o gás e o substrato/peça de trabalho/ponto de deposição do material conhece-se como *contact tip distance* (CTD) (ALAM *et al.*, 2018), ou *stand-off distance* (ZEKOVIC *et al.*, 2007; LIU e KOVACEVIC, 2014).

Sobre o processo subtrativo por usinagem, as pesquisas de Jensen e Anderson (1996); Dragomatz e Mann (1997) e Hatna *et al.* (1998) abordam três parâmetros do processo, que segundo os autores estão dentre os mais importantes: percurso da ferramenta de corte (mm), a orientação da ferramenta com relação ao substrato ($^\circ$) e velocidade da ferramenta de corte (mm/mim). Abdulhameed *et al.* (2018) ainda sugere que a profundidade do corte (mm) da ferramenta de remoção é um parâmetro a ser considerado no cenário da manufatura híbrida.

Conforme Lasemi *et al.* (2016), o processo subtrativo por usinagem está amplamente estabelecido e aceito pelo mercado e a academia a partir das pesquisas já desenvolvidas. No entanto, Lasemi *et al.* (2016) sugere que, quando integrado ao processo aditivo para configurar a manufatura híbrida, junto com os parâmetros aditivos anteriormente mencionados, os parâmetros subtrativos indicados por Anderson (1996); Dragomatz e Mann (1997) e Hatna *et al.* (1998) são os mais usados. Isto porque, o processo subtrativo é comumente executado no final do processo híbrido para garantia da qualidade superficial do componente, peça ou objeto fabricado.

No planejamento do processo de manufatura híbrida também são consideradas algumas características da matéria prima e ferramentas usadas

no processo, como por exemplo, a granulometria do pó, tipo de material metálico incluindo o do substrato, e o material da ferramenta de usinagem.

As características geométricas (variáveis de saída) do processo de manufatura híbrida mais avaliadas na literatura são altura (A_c) (mm), largura (L_c) (mm) e profundidade de penetração do cordão (P_c) (mm) ou camada, porosidade, e rugosidade superficial (μm) (que pode ser medida após a deposição (processo aditivo) e depois do pós-processamento (usinagem)) (URBANIC *et al.*, 2018).

Outras variáveis são menos estudadas e são dependentes das três primeiras: a razão altura/largura do cordão, a diluição do cordão ou camada (d) (%), ângulo de molhado ou molhabilidade (w_a – *wetting angle*) (θ). Já o estudo da densidade de energia, que pode ser volumétrica (E) (J/mm^3) ou linear (W/mm), é mais comum nas pesquisas sobre a LMD.

A razão altura/largura do cordão representa a taxa de convexidade da deposição (Rao *et al.*, 2009). Nesta tese, espera-se um índice próximo de 0,5, pois contribui para evitar camadas com excesso de convexidade quando sobrepostas.

Conforme indicado por Caiazza (2018), a diluição (d) é uma medida da fusão do cordão com o substrato. Representa a porcentagem de penetração da deposição no substrato considerando toda a altura do cordão. Uma fusão maior contribui para a prevenção do aparecimento de poros entre a deposição e o substrato e inclusive a falta de fusão.

Calleja *et al.* (2014) afirmam que o ângulo de molhado (também conhecido como ângulo de contato) é um indicador da qualidade da deposição quando há sobreposição entre cordões depositados para formar uma camada de material. Os autores indicaram que para ângulos de molhado ou molhabilidade (*wetting angle*) fora da faixa de $0-80^\circ$, a sobreposição dos cordões ou camadas é considerada defeituosa. Este defeito pode estar condicionado ao aparecimento de vazios entre os cordões depositados e porosidade. Este ângulo representa a relação trigonométrica (arco seno) entre a largura e altura de um cordão de material quando é depositado num substrato, e recebe o nome pela sua forma geométrica semelhante a uma gota d'água em contato com uma superfície plana (CALLEJA *et al.*, 2014).

A diluição (d) e o ângulo de molhado (wa) são calculados seguindo a Eq. 1 e Eq. 2, respectivamente:

$$d (\%) = \left[\frac{P_c}{A_c + P_c} \right] * 100; \quad (1)$$

$$wa (\theta) = \arcsin \left[\frac{A_c}{\sqrt{L_c^2 + A_c^2}} \right]; \quad (2)$$

A Figura 3 apresenta esquematicamente a secção transversal de um cordão depositado sobre um substrato e as variáveis geométricas associadas.

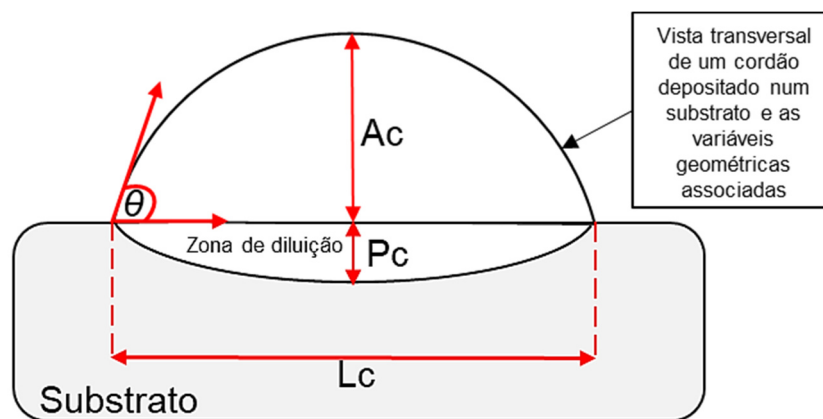


FIGURA 3. VISTA TRANSVERSAL DE UM CORDÃO DEPOSITADO SOBRE UM SUBSTRATO E AS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS

A interação entre alguns parâmetros e variáveis geométricas do processo aditivo tem grande influência na densidade de energia gerada por volume de material depositado. Por exemplo, a potência do laser tem uma relação diretamente proporcional à densidade volumétrica de energia (E_v - *volume energy density*), também conhecida como *volumetric heat input* (DEBROY *et al.*, 2018), e indiretamente proporcional à velocidade de avanço e o espaçamento lateral entre cordões (*hatch space*) (MAHAMOOD, 2018).

Quando não há sobreposição de um cordão de material depositado sobre outro, mas os cordões são depositados próximos para gerar uma camada única ou múltiplas, a E_v (J/mm^3) determina-se, segundo Debroy *et al.* (2018), como indicado na Eq. 3 a seguir:

$$E_v = \frac{P}{v * A_c * El} \quad (3)$$

em que: P é a potência do laser (W), v é a velocidade de avanço do laser (mm/s), A_c é a altura da camada ou cordão (mm) depositado e E_l (mm) é o espaçamento lateral entre um cordão depositado e o outro (CHERRY *et al.*, 2014). Da Equação 3 pode ser calculada a densidade de energia linear (*linear heat input*) (H), que é proporcional à relação $P(W)/v(\text{mm/s})$ (CHERRY *et al.*, 2014; DEBROY *et al.*, 2018).

Por outro lado, quando há sobreposição de cordões depositados para gerar uma ou várias camadas, a densidade de energia é incremental. Ma *et al.* (2015) em seu estudo geraram amostras por meio da deposição a laser de IN718 para investigar os efeitos da energia gerada durante a deposição na microestrutura das amostras. A deposição do material ocorreu com diferentes níveis de potência do laser, de velocidade de varredura a laser e de largura de um cordão simples, com diferentes taxas de sobreposição entre os cordões. Segundo a proposta dos autores, a densidade volumétrica de energia E_v (J/mm^3) pode ser calculada conforme a Eq. 4:

$$E_v = \sigma \frac{P (\eta + 1)}{V * L_c * A_c} = C \frac{P (\eta + 1)}{V * L_c} \quad (4)$$

em que: P é a potência do laser, σ é o coeficiente de absorção, η é a taxa de sobreposição entre dois cordões depositados contíguos, L_c é o valor medido da largura de cordão, V é a velocidade de varredura a laser, A_c é a espessura/altura da camada ou cordão (manteve-se em 0,5 mm no estudo de Ma *et al.* (2015)), de modo que C é uma constante relacionada ao material e à espessura da camada.

Os autores Ma *et al.* (2015) concluíram que a microdureza da amostra aumenta diminuindo E_v para uma taxa de sobreposição constante entre dois cordões depositados próximos. Da mesma forma, a microdureza também aumenta diminuindo E_v para uma velocidade de varredura a laser constante.

Uma adequada compreensão dos parâmetros do processo híbrido permite manter as condições experimentais da operação estáveis para garantir um processo preciso. Além disso, dependendo de quão robusta seja a configuração e avaliação da integração dos parâmetros do processo de forma

holística, será possível estimar seu efeito nas características geométricas da peça ou componente produzido (NEWMAN et al., 2015).

2.3 PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA (PPMH)

O planejamento do processo é uma etapa de preparação prévia à de manufatura, que determina a sequência de operações, atividades ou processos necessários para produzir uma peça ou um conjunto, sejam componentes, partes de uma peça ou objetos (SWAMIDASS, 2000).

Segundo Kulkarni *et al.* (2000), na manufatura aditiva, o planejamento do processo implica uma sequência de etapas necessárias para possibilitar uma manufatura eficiente e precisa de uma peça. Sobre a manufatura subtrativa, sugere que o planejamento de processos tradicionalmente envolve a determinação de processos e parâmetros de usinagem para transformar uma peça de trabalho de um estágio ou forma inicial para uma final. No entanto, com relação ao planejamento do processo híbrido Kulkarni *et al.* (2000), sugerem atenção à atividade de remoção de material e a garantia de acesso da ferramenta quando peças complexas são fabricadas.

Com relação à manufatura híbrida, Xu *et al.* (2011), definem que o planejamento do processo compreende a seleção e o sequenciamento de processos e operações para transformar uma matéria-prima escolhida em um componente acabado.

Conforme Rossi e Lanzetta (2020), o planejamento do processo de manufatura híbrida visa estabelecer os requisitos tecnológicos e sequências alternativas de operações para converter um bem que está em uma forma inicial para uma forma final diferente.

Kulkarni *et al.* (2000) propuseram um modelo de planejamento do processo de manufatura aditiva com base numa revisão de literatura sobre os principais processos aditivos existentes (na época, manufatura por camadas). Os autores identificaram as etapas a serem executadas no planejamento do processo: modelagem CAD (*Computer-Aided Design*); planejamento do processo; execução do processo (CAM) - (*Computer-Aided Manufacturing*).

A Figura 4 apresenta o ciclo genérico que compõe o modelo de planejamento e as etapas para manufatura de um objeto por meio da

manufatura aditiva, traduzido de Kulkarni *et al.* (2000). É importante indicar que quando configurado o processo de manufatura híbrida, às etapas propostas por Kulkarni *et al.* (2000) são integradas as atividades inerentes ao processo subtrativo conforme apoiado pelos autores que desenvolveram modelos de planejamento do processo de manufatura híbrida (autores citados nos tópicos i a vii, p. 4-6, Capítulo 1).

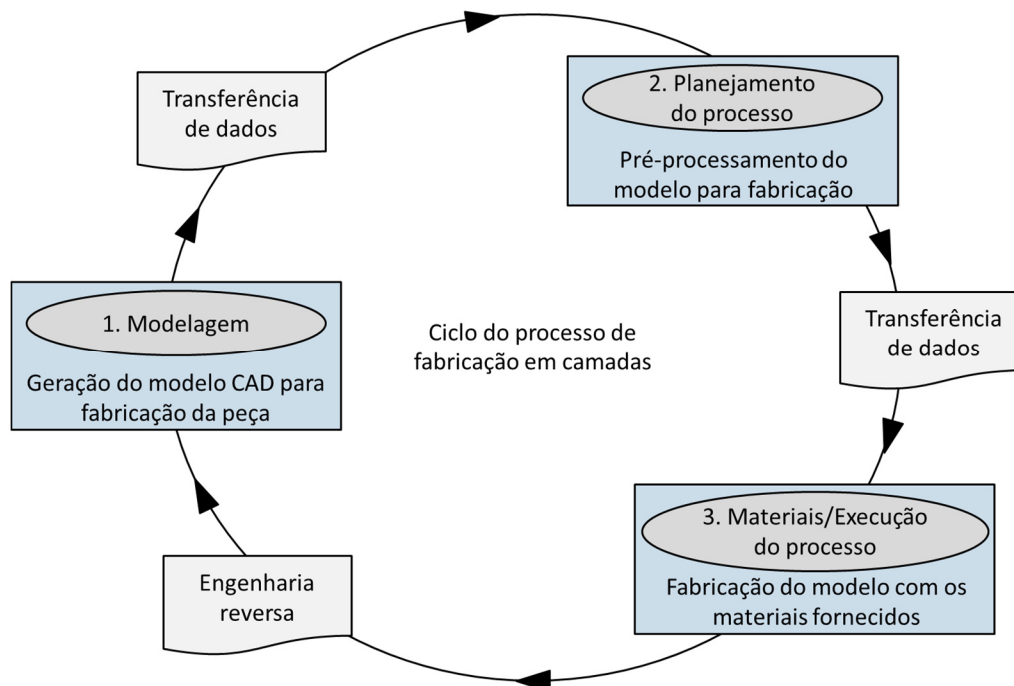


FIGURA 4. CICLO DO PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA. TRADUZIDO DE KULKARNI *ET AL.* (2000)

A primeira etapa do processo é a geração de um modelo CAD da peça a ser fabricada. Este modelo pode ser de superfícies planas, tridimensionais e complexas (KULKARNI *et al.*, 2000). A modelagem CAD pode ser realizada por meio de software, técnicas computacionais de inteligência artificial, modelagem matemáticas e estatística de processos, dentre outras.

Após a geração do modelo CAD, é necessária uma sequência de passos para o planejamento do processo, para possibilitar uma manufatura eficiente e precisa da peça, componente ou objeto. As etapas da Figura 3 são comuns a todos os processos aditivos, no entanto, podem ser inseridas no planejamento do processo híbrido em função do escopo do planejamento, por tanto, diferentes modelos podem ser desenvolvidos (ROSSI e LANZETTA, 2020). Neste sentido, os planos de planejamento do processo de manufatura híbrida são críticos para a manufatura das peças modeladas, pois especificam

a seleção e o sequenciamento dos processos aditivo e subtrativo, ferramentas, atividades e condições de operação (BASINGER *et al.*, 2018). O desenvolvimento de planos de processo, chamado de planejamento de processo, tem sido classificado como o elo central entre o projeto de engenharia e a produção da peça, objeto ou componente (BARD e FEO, 1989; XU *et al.*, 2011; YUSOF e LATIF, 2014; NEWMAN *et al.*, 2015).

Após o planejamento do processo, o objeto, peça ou componente pode ser fabricado na máquina especificada. Os materiais mais usados hoje são os polímeros, metais, cerâmicas, resinas, compostos e híbridos (TOFAIL *et al.*, 2018). Uma vez que a manufatura híbrida é um método de manufatura fundamentalmente diferente com necessidades informacionais únicas, a cada planejamento há novos problemas no projeto, representação e modelagem de peças que precisam ser atendidos.

A transferência de dados entre as etapas da Figura 3, implica a transferência de dados de projeto do modelo CAD para o planejamento do processo, e dados de manufatura do planejamento do processo para a manufatura (KULKARNI *et al.*, 2000).

A atividade de engenharia reversa completa o ciclo, e nada mais é do que o controle comparativo retroativo do objeto produzido com o fabricado. O controle metrológico do objeto fabricado é feito e então comparado com o modelo CAD original para avaliar a qualidade da peça fabricada e sua adequação com relação às especificações do projeto (KULKARNI *et al.*, 2000). Este controle retroativo pode ser superado pelo processo de simulação ou previsão do comportamento dos parâmetros do processo e suas variáveis de saída (CORTINA *et al.*, 2018c).

Na análise da literatura observa-se um critério comum de aceitação sobre a possibilidade que o desenvolvimento de máquinas para manufatura híbrida oferece para unir as vantagens dos processos aditivo e subtrativo em uma única máquina. No entanto, entende-se que o planejamento do processo híbrido, como uma abordagem holística, é uma etapa importante a ser cumprida para a plena utilização das máquinas híbridas e que precisa de atenção por parte da indústria e da academia (FLYNN *et al.*, 2016; CORTINA *et al.*, 2018c; DÁVILA *et al.*, 2020; SIBISI *et al.*, 2020).

Neste sentido, aspectos críticos sobre o planejamento do processo híbrido devem ser levados em consideração para estruturar um ciclo de manufatura integrado, e, antes mesmo da implementação a escala industrial das máquinas híbridas, como por exemplo:

- Incerteza geométrica do processo aditivo

Conforme Cortina *et al.* (2018c), o processo aditivo é o mais crítico na integração à manufatura híbrida como consequência do estado da arte e da falta de maturidade da tecnologia. Nesse sentido, segundo Zelinski (2015), sabe-se que a manufatura aditiva possibilita a produção de recursos internos e objetos complexos, porém se desconhece de forma genérica como esses recursos devem ser inspecionados, uma vez que o processo por si só não é 100 % preciso.

Como complemento, Arrizubieta *et al.* (2018), argumentam que a sensibilidade da taxa de deposição de material no processo aditivo correlaciona-se à taxa de vazão de material, ao volume do substrato, à geometria da região onde o material está sendo depositado, ao acabamento superficial e à distância até a superfície de contato. Este fato pode gerar diferenças entre o componente ou peça projetada e a resultante na manufatura.

- Projeto e validação do processo híbrido

Segundo Cortina *et al.* (2018c), há uma necessidade de mudança no paradigma da concepção do processo híbrido, no sentido de, não apenas entender e executar cada processo de forma independente (aditivo e subtrativo), mas também superar os desafios que surgiram pela possibilidade da integração. Métodos de análise de decisão multicritério (MCDA) são comumente usados para auxiliar na tomada de decisão no projeto da geometria de uma peça (SALONITIS e ZARBAN, 2015). No entanto, não existe uma metodologia padrão ou planejamento de processos voltado para máquinas híbridas, isto se dá pelo fato de uma abordagem diferente é executada em função da aplicação, qual seja, manufatura, reparo ou remanufatura (CORTINA *et al.*, 2018c).

- Escopo do processo híbrido

Outro ponto de interesse segundo Hällgren *et al.* (2016), é o fato de que para obter resultados satisfatórios e explorar todo o potencial da manufatura

híbrida, é necessário que o planejamento se desenvolva como uma abordagem orientada à integração das características do projeto (peça) e do processo. Isto é, um método focado tanto na melhoria da geometria da peça fabricada quanto na otimização do próprio processo de manufatura.

- Controle proativo do processo híbrido

As bases de dados para as simulações do processo podem ser alimentadas com dados de processos reais. Nesse contexto, o desenvolvimento de novas estratégias de deposição e usinagem, e para criar caminhos “inteligentes” da ferramenta, onde os métodos de controle tenham papel fundamental na garantia da qualidade (DÁVILA *et al.*, 2020).

O monitoramento do processo é de grande relevância na garantia da qualidade de peças fabricadas. O controle preditivo do processo pode fornecer informações sobre o processo e a probabilidade de aparecimento de defeitos (URBANIC *et al.* 2018). No entanto, no critério de Cortina *et al.* (2018c), o monitoramento não pode se limitar a controlar o processo instantaneamente, mas também ser capaz de simular e prever a ocorrência de defeitos na geometria fabricada e conseqüentemente agir de acordo para evitá-los.

- Sinergia do processo híbrido

Segundo Dávila *et al.* (2020), a *hibridização* do processo vai além da execução do processo subtrativo para o pós-processamento das peças ou componentes fabricados. O conceito híbrido envolve uma sinergia entre as duas técnicas (aditiva e subtrativa), no sentido de que as vantagens de cada uma sejam ampliadas e as desvantagens minimizadas ou eliminadas. Segundo o autor, o processo subtrativo não deve ser concentrado apenas como método de pós-processamento.

O fato de produzir peças usando tecnologias aditivas e subtrativas em uma única configuração constitui um desafio quanto ao planejamento do sequenciamento das atividades subtrativas e aditivas, ou seja, não há um método padronização que relacione quando iniciar uma atividade ou outra, isto vai depender do planejamento da aplicação que se esteja projetando (manufatura, reparo ou remanufatura), e dos processos intermediários, como limpeza, controle metrológico, inspeção etc. (CORTINA *et al.*, 2018c).

Ainda, conforme Dávila *et al.* (2020), para superar a restrição de processos intermediários na manufatura híbrida, as pesquisas focam na

otimização dos parâmetros do processo aditivo visando sua estabilidade e previsibilidade (HANSEL *et al.*, 2016; SABOORI *et al.*, 2018). Isso resulta na minimização dos defeitos, e o processo subtrativo pode ser usado quando estritamente necessário.

Na literatura não se apresenta uma metodologia padrão de planejamento do processo de manufatura voltado para máquinas híbridas, sendo que a especificidade de cada processo se sustenta pelas características da geometria a ser fabricada; as características dos processos integrados e as variáveis-resposta avaliadas (CORTINA *et al.*, 2018c). Trata-se o planejamento do processo como a identificação de uma sequência de atividades (alternância das operações) que levarão à manufatura da peça desejada, mas sem considerar uma abordagem preditiva na validação dos efeitos dos parâmetros do processo na geometria final fabricada para eliminar a experimentação elevada que os estudos ainda em fase preliminar requerem (ZHANG *et al.*, 2020).

2.4 MODELOS DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA

A qualificação das técnicas de manufatura aditiva e subtrativa quando integradas na manufatura híbrida para aplicação industrial em larga escala requer um adequado planejamento e validação para o atingimento da repetibilidade confiável do processo e a reprodutibilidade e qualidade do produto, peça, ou componente fabricado, como sugerido por Sibisi *et al.* (2020).

Como já mencionado, o planejamento do processo de manufatura aditiva envolve fundamentalmente a definição de 5 atividades, propostas por Kulkarni *et al.* (2000), e conforme observado na literatura, são comuns na estruturação de modelos de planejamento do processo de manufatura híbrida analisados nesta tese (conforme autores citas nos tópicos i a vii), sendo:

- (i) orientação da peça para manufatura (OP), que impacta o processo em função do custo e tempo de manufatura, qualidade superficial, estabilidade do volume depositado e volume da estrutura de suporte utilizada (LIOU *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2015; ABDULHAMEED *et al.*, 2018; ELDAKROURY *et al.*, 2018; ROSSI e LANZETTA, 2020);

- (ii) direção de fabricação (DF), que implica a determinação da melhor estratégia de deposição para atender às propriedades geométricas da peça (RUAN *et al.*, 2005; LIOU *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2015; JOSHI e ANAND, 2017; BEHANDISH *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020; BARRAGAN *et al.*, 2021);
- (iii) estrutura de suporte (fixação) (ES), que quanto menor seja a estrutura de apoio necessária para fabricar a peça, menor o custo e tempo de manufatura, pois a remoção alonga o processo de manufatura e implica muitas vezes o descarte desta estrutura (JOSHI e ANAND, 2017; ELDAKROURY *et al.*, 2018);
- (iv) decomposição geométrica da peça (DG), que implica a decomposição da geometria em camadas de altura uniforme ou variável para realizar a deposição até finalizar a manufatura do modelo completo (EIAMSA-ARD *et al.*, 2005; RUAN *et al.*, 2005; LIOU *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2015; CHEN-LI *et al.*, 2018; ELDAKROURY *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020; BARRAGAN *et al.*, 2021);
- (v) planejamento da trajetória da ferramenta (PT), implica a determinação da trajetória geométrica da ferramenta de deposição em função dos parâmetros do processo específico e do modelo CAD a ser construído (EIAMSA-ARD *et al.*, 2005; RUAN *et al.*, 2005; REN *et al.*, 2006; LIOU *et al.*, 2007; JOSHI e ANAND, 2017; BEHANDISH *et al.*, 2018; ELDAKROURY *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020; BARRAGAN *et al.*, 2021).

Quando o processo aditivo se integra ao subtrativo, no caso da manufatura híbrida, o planejamento da trajetória (PT) deve incorporar o planejamento da trajetória da ferramenta de remoção de material (processo subtrativo) (CORTINA *et al.*, 2018c; BASSINGER *et al.*, 2018; ROSSI e LANZETTA, 2020), seja para garantia da qualidade superficial do produto fabricado ou como processo alternativo (WANG *et al.*, 2015; CHEN-LI *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020).

Além disso, outra atividade deve ser inserida no planejamento, qual seja, (vi) o sequenciamento das operações (SO), que visa determinar a sequência de execução das atividades aditivas e subtrativas com vistas à redução do tempo de operação, do custo e garantia das propriedades

geométricas, físicas e mecânicas da peça (RUAN *et al.*, 2005; JOSHI e ANAND, 2017; ABDULHAMEED *et al.*, 2018; BEHANDISH *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020; ROSSI e LANZETTA, 2020; BARRAGAN *et al.*, 2021).

Outra atividade no planejamento do processo híbrido é a (vii) detecção da colisão (DC) entre as ferramentas de manufatura e o substrato ou superfície a ser construída, inclusive quando há a necessidade de acessar a partes da peça que são ocas ou côncavas (RUAN *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2015; ELDAKROURY *et al.*, 2018; BEHANDISH *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2018; CHEN-LI *et al.*, 2020).

Adicionalmente, uma etapa de simulação do processo que atribua à proposta de planejamento uma abordagem preditiva, se apresenta como uma evolução dos programas de planejamento do processo híbrido, possibilitando a redução da experimentação iterativa e do consumo excessivo de material e tempo, e o fato de os processos de manufatura serem diferentes em função do sistema híbrido usado, a repetibilidade e estabilidade do processo pode se ver comprometida. Neste sentido, uma previsão baseada em simulação é preferida (CORTINA *et al.*, 2018c; ZHANG *et al.*, 2020).

No Quadro 1, observa-se que nenhum dos modelos contempla as sete atividades em conjunto. Das 14 propostas encontradas na literatura só 12 incluem a atividade de planejamento da trajetória da ferramenta (PT); 9 modelos abordam o sequenciamento das operações (SO); apenas 8 consideram as atividades decomposição da geometria (DG) e direção da fabricação (DF); 7 estudam a detecção da colisão (DC); 5 a orientação da peça (OP), e só 2 consideram a estrutura de suporte (fixação) (ES) no planejamento.

Também no Quadro 1 verifica-se que, em relação à inclusão de uma etapa de controle preditivo (simulação do processo), apenas seis realizam uma simulação do processo. Destes, dois simulam a interação de no máximo dois parâmetros do processo aditivo e seu efeito no substrato (LIOU *et al.* (2007) e WANG *et al.* (2015)). ELDAKROURY *et al.* (2018) avalia a colisão entre o substrato e a ferramenta de deposição. Dois modelos simulam a execução do algoritmo computacional proposto pelos autores (CHEN-LI *et al.* (2018) e CHEN-LI *et al.* (2020)); e, 1 simula apenas a interação de um parâmetro do processo na altura da camada (ZHANG *et al.*, 2020), porém, nenhuma dessas

abordagens preditivas avalia o efeito da interação dos parâmetros do processo nas variáveis geométricas.

O Quadro 1 apresenta os modelos de planejamento do processo de manufatura híbrida encontrados na literatura no período 2005 - 2022. No Quadro se apresentam: 1) os autores; 2) resumo da proposta de planejamento; 3) descrição da abordagem experimental para execução do planejamento; 4) as atividades da etapa de planejamento: (i) orientação da peça (OP); (ii) direção de fabricação (DF); (iii) estrutura de suporte (fixação) (ES); (iv) decomposição geométrica da peça (DG); (v) planejamento da trajetória da ferramenta (PT); (vi) sequenciamento das operações (SO); e (vii) detecção da colisão (DC); 5) se o método inclui uma etapa de simulação do processo; 6) área de aplicação do modelo.

QUADRO 1. MODELOS PARA PPMH

(CONTINUA)

Autores	Resumo da proposta para PPMH	Abordagem experimental	Atividades do ciclo de planejamento orientado à integração do projeto e do processo							Projeção do PPMH		
			OP	ES	DG	PT	SO	DF	DC	Aplicação	Abordagem preditiva do planejamento (simulação)	
1. Eiamsaard et al. (2005)	PPMH para reparo de superfícies complexas desgastadas ou corroídas por meio do recobrimento superficial adaptativo visando a redução de custo, tempo de manufatura e energia.	1) Definição da superfície a ser reparada; 2) Geração da trajetória da ferramenta de usinagem da superfície danificada; 3) Gerar da trajetória da ferramenta de deposição para levar a superfície danificada a mais próxima da original; 4) Pós-processamento dos dados da trajetória da ferramenta para obter o arquivo de códigos CNC para sistema de manufatura híbrido.			X	X					Reparo/Remanufatura	Não
2. Ruan et al. (2005)	PPMH para manufatura de superfícies complexas orientado à redução do tempo de manufatura e a quantidade de vezes que ocorre a alternância entre os processos.	1) Fatiamento adaptável multieixos; 2) Geração da trajetória da ferramenta de deposição 2-D; 3) Deposição de material por camadas; 4) Sequenciamento dos processos até a construção da geometria final.			X	X	X	X	X		Manufatura	Não
3. Ren et al. (2006)	PPMH para reparo de superfícies complexas desgastadas ou corroídas por meio do recobrimento superficial adaptativo visando a redução do tempo de processamento e interferência humana.	1) Geração da trajetória adaptativa da ferramenta de deposição (2D e 3D); 2) Deposição adaptativa do material na superfície a ser reparada; 3) Geração da trajetória adaptativa da ferramenta de usinagem (2D e 3D); 4) Usinagem para acabamento superficial.				X					Reparo/Remanufatura	Não

Orientação da peça (OP); Direção de fabricação (DF); Estrutura de suporte (fixação) (ES); Decomposição geométrica da peça (DG); Planejamento da trajetória da ferramenta (PT); Sequenciamento das operações (SO); Detecção da colisão (DC).

QUADRO 1. MODELOS PARA PPMH**(CONTINUA)**

Autores	Resumo da proposta para PPMH	Abordagem experimental	Atividades do ciclo de planejamento orientado à integração do projeto e do processo							Projeção do PPMH	
			OP	ES	DG	PT	SO	DF	DC	Aplicação	Abordagem preditiva do planejamento (simulação)
4. Liou et al. (2007)	PPMH para manufatura de peças metálicas complexas com alta precisão e acabamento superficial visando a redução do tempo de manufatura e o custo operacional.	1) Determinação da orientação da peça; 2) Extração do esqueleto; 3) Decomposição da peça em subpeças; 4) Determinação a sequência e a direção de manufatura para as subpeças; 5) Verificação da viabilidade da sequência e direção de manufatura para o processo de usinagem; 6) Otimização da deposição e usinagem.	X		X	X	X	X	X	Manufatura	Modelo matemático para previsão do fluxo de pó e sua interação com o laser e o substrato.
5. Wang et al. (2015)	PPMH para manufatura de peças metálicas com alta precisão e acabamento superficial baseado no controle gráfico por sensores para geração da trajetória da ferramenta (câmeras de alta resolução).	1) Algoritmo para extração das bordas da peça; 2) Determinação da orientação da peça; 3) Decomposição da peça em submódulos e determinação da direção de manufatura; 4) Sequenciamento das operações; 5) Verificação da viabilidade da sequência e direção de manufatura para o processo de usinagem.	X		X	X	X	X	X	Manufatura	Modelo matemático para previsão do fluxo de pó e sua interação com o laser e o substrato.
6. Joshi e Anand (2017)	PPMH para seleção do melhor método de manufatura com base nas complexidades geométricas da peça com foco na otimização dos recursos e tempo de manufatura.	1) Geração do modelo CAD da peça a ser fabricada; 2) Decomposição da peça em subpeças ao longo dos planos perpendiculares à direção de construção/eixo da ferramenta; 3) Identificação e seleção dos parâmetros do processo aditivo e subtrativo para cada divisão da peça; 4) Cálculo das pontuações de complexidade para AM, SM e todas as combinações de HM; 5) Plotagem das pontuações de complexidade ao longo das divisões e identificação do processo de manufatura ideal.		X		X	X	X		Manufatura	Não

Orientação da peça (OP); Direção de fabricação (DF); Estrutura de suporte (fixação) (ES); Decomposição geométrica da peça (DG); Planejamento da trajetória da ferramenta (PT); Sequenciamento das operações (SO); Detecção da colisão (DC).

QUADRO 1. MODELOS PARA PPMH**(CONTINUA)**

Autores	Resumo da proposta para PPMH	Abordagem experimental	Atividades do ciclo de planejamento orientado à integração do projeto e do processo						Projeção do PPMH		
			OP	ES	DG	PT	SO	DF	DC	Aplicação	Abordagem preditiva do planejamento (simulação)
7. Abdulhameed et al. (2018)	PPMH para manufatura de peças integrando o processo de inspeção numa configuração de controle autônomo e inteligente com análise de viabilidade com base num modelo de custo.	1) Especificação do escopo e da sequência das operações; 2) Seleção do cenário ideal e o plano de processo com base na seleção econômica das operações; 3) Execução das operações de manufatura; 4) Validação do processo por meio da inspeção.	X				X			Manufatura	Não
8. Behandish et al. (2018)	PPMH para identificar combinações não triviais, qualitativamente distintas e com ótimo custo-benefício das operações aditiva e subtrativa por meio de álgebra booleana finita.	O planejamento do processo é descrito em termos relacionados aos estados e transições da álgebra booleana finita.				X	X	X	X	Manufatura	Não
9. Chen-Li et al. (2018)	PPMH para desenvolvimento de um algoritmo voltado para a determinação da sequência alternada mínima entre o processo aditivo e subtrativo com foco na acessibilidade da ferramenta durante o processo subtrativo.	1) Configuração e modelagem da capacidade do processo de usinagem; 2) Algoritmo para acesso dinâmico da ferramenta às determinadas regiões da superfície complexa; 3) Modelagem do algoritmo otimizado; 4) Simulação computacional para validação.			X	X	X	X	X	Manufatura (simulação)	Simulação computacional para avaliar a eficácia e correção da abordagem proposta.

Orientação da peça (OP); Direção de fabricação (DF); Estrutura de suporte (fixação) (ES); Decomposição geométrica da peça (DG); Planejamento da trajetória da ferramenta (PT); Sequenciamento das operações (SO); Detecção da colisão (DC).

QUADRO 1. MODELOS PARA PPMH**(CONTINUA)**

Autores	Resumo da proposta para PPMH	Abordagem experimental	Atividades do ciclo de planejamento orientado à integração do projeto e do processo						Projeção do PPMH		
			OP	ES	DG	PT	SO	DF	DC	Aplicação	Abordagem preditiva do planejamento (simulação)
10. Eldakrouy et al. (2018)	PPMH para identificação e seleção do substrato adequado (limitado a geometria cilíndrica e retangular) para manufatura de peças complexas com base na colisão entre o substrato e o cabeçote de deposição.	1) Modelagem do fatiamento da geometria; 2) Avaliação da direção de manufatura para ajuste do substrato cilíndrico e retangular; 3) Extração e teste do “esqueleto” da peça para colisão assumindo o crescimento da deposição no substrato candidato.	X	X	X	X			X	Manufatura	Simulação da colisão entre o substrato e a ferramenta de deposição
11. Chen-Li et al. (2020)	PPMH para encontrar uma sequência alternada mínima das operações, mantendo acessibilidade suficiente da ferramenta durante o processo subtrativo e garantindo a condição livre de colisão durante o processo aditivo.	1) Análise da manufatura subtrativa e aditiva via avaliação e medição da acessibilidade das ferramentas; 2) Configuração do algoritmo de planejamento da sequência das operações que minimiza o número de alternâncias; 3) Testes de simulação do protótipo de software.			X	X	X	X	X	Manufatura (simulação)	Simulação computacional para avaliar a eficácia e correção da abordagem proposta.
12. Rossi e Lanzetta (2020)	PPMH para garantia do sequenciamento e da flexibilidade operacional orientados à programação da execução das operações.	1) Extração das características do modelo CAD; 2) Identificação dos modos alternativos para executar a operação e das trocas entre as operações na sequência de execução; 3) Integração da programação da execução das operações.	X				X			Manufatura	Não

Orientação da peça (OP); Direção de fabricação (DF); Estrutura de suporte (fixação) (ES); Decomposição geométrica da peça (DG); Planejamento da trajetória da ferramenta (PT); Sequenciamento das operações (SO); Detecção da colisão (DC).

QUADRO 1. MODELOS PARA PPMH**(CONCLUSÃO)**

Autores	Resumo da proposta para PPMH	Abordagem experimental	Atividades do ciclo de planejamento orientado à integração do projeto e do processo						Projeção do PPMH		
			OP	ES	DG	PT	SO	DF	DC	Aplicação	Abordagem preditiva do planejamento (simulação)
13. Zhang et al. (2020)	PPMH para manufatura de uma superfície plana de camada única visando eliminar a necessidade de experimentação iterativa para garantir que material suficiente seja depositado sem recorrer à manufatura excessiva, cara e ineficiente.	1) Calibração de um modelo analítico recursivo para predição de altura da camada única com base nas medições de um trabalho prévio; 2) Ajuste do modelo com base nas medições das variáveis avaliadas; 3) Seleção dos parâmetros para delimitação da trajetória da ferramenta; 4) Acabamento superficial da deposição.				X				Manufatura	Simulação da altura da camada com diferentes distanciamentos entre os cordões
14. Barragan et al. (2021)	PPMH par remanufatura de componentes de diferentes materiais e geometria complexa.	1) Preparação; 2) Processamento; 3) Pós-processamento.			X	X	X	X		Remanufatura	Não

Orientação da peça (OP); Direção de fabricação (DF); Estrutura de suporte (fixação) (ES); Decomposição geométrica da peça (DG); Planejamento da trajetória da ferramenta (PT); Sequenciamento das operações (SO); Detecção da colisão (DC).

Verifica-se a partir do Quadro 1 que os modelos de PPMH variam na integração das etapas, das atividades inerentes a cada etapa, e das formas de controle do processo e seu planejamento. Além disso, observa-se que um único modelo não integra as sete atividades para garantia da estabilidade do processo. Percebe-se que o escopo do desenvolvimento dos modelos se orienta às abordagens metodológicas para desenvolvimento do PPMH, tendo como fator comum a orientação do PPMH para a tecnologia que integra a manufatura aditiva (LMD) e subtrativa (usinagem).

Os modelos de planejamento de processo de manufatura híbrida avaliados (Quadro 1), não incluem uma etapa de simulação multiparamétrica (simulação da interação de múltiplos parâmetros do processo de forma simultânea), que atribua ao planejamento do processo uma abordagem preditiva para a compreensão holística e execução do processo de forma a garantir a estabilidade e repetibilidade da operação híbrida.

A partir da análise da literatura, em suma, verifica-se que o emprego de técnicas, ferramentas ou métodos de modelagem e simulação de processos oferece robustez ao planejamento do processo híbrido. Sua aderência às características individuais dos processos, aos requisitos tecnológicos e recursos disponíveis é importante. A aplicação dos métodos, técnicas ou ferramentas para prever o comportamento do processo antes de sua total implementação devem ser de fácil execução e possibilitar uma tomada de decisão assertiva. Além disso, esta etapa deve ser incluída como parte não opcional do modelo de manufatura para evitar alta iteratividade dos experimentos que podem levar ao consumo de materiais em excesso, gerando desperdícios e aumento de custo do processo.

2.5 TÉCNICAS E FERRAMENTAS PARA A SIMULAÇÃO DE PROCESSOS NO PPMH

Na literatura analisada, percebeu-se que o foco das propostas que estudam o desenvolvimento de métodos de planejamento do processo de manufatura híbrida recai no processo aditivo (LMD) quando avaliados os aspectos de controle preditivo para simulação dos parâmetros do processo e sua interação com as variáveis de saída (variáveis geométricas da deposição).

Vários estudos podem ser encontrados na literatura explorando o desenvolvimento de métodos majoritariamente estatísticos para simular e prever

o comportamento dos parâmetros do processo LMD avaliando diferentes variáveis geométricas.

Sun e Hao (2012) empregaram o método CCD (*Central Composite Design*), RSM (*Response Surface Method*) e ANOVA (*Analysis of Variance*), para desenvolver um modelo matemático para prever a influência dos parâmetros do processo LMD na geometria de deposição de Ti6Al4V (pó e substrato). O método ANOVA foi utilizado para estabelecer relações entre os parâmetros do processo e as variáveis geométricas (altura, largura e penetração da deposição). O erro percentual relativo do modelo atingiu 7 %.

Saqib *et al.* (2014), Aggarwal *et al.* (2014) e Urbanic *et al.* (2016), realizaram análises semelhantes usando RSM e CCD juntamente com uma rede neural artificial para desenvolver um modelo estatístico com o fim de prever a relação entre a geometria da camada depositada e os principais parâmetros do processo de deposição de aço inoxidável AISI 420 a laser. Farahmand e Kovacevic (2014) usaram uma abordagem preditiva também com base no método CCD-RSM-ANOVA para avaliar a influência dos parâmetros do processo LMD na geometria e microdureza da deposição. Segundo os autores, o erro relativo do modelo atingiu 5 %.

Liu e Kovacevic (2014) estudaram os efeitos dos parâmetros de processo na eficiência de captura do pó e na geometria da camada (altura e largura). Eles também usaram o método CCD-RSM-ANOVA para prever e identificar relações estatísticas entre parâmetros de entrada e variáveis de saída. Este estudo utilizou abordagem semelhante a trabalhos anteriores (FARAHMAND e KOVACEVIC, 2014), porém usando diferentes materiais em pó, o que pode ser considerado uma pesquisa estendida. Eles indicaram que o erro relativo da simulação atingiu ~12 %.

Arrizubieta *et al.* (2018) propuseram um modelo matemático para previsão do tamanho de grânulos de pó, a dureza e a probabilidade de formação de poros em aço inoxidável AISI 304 depositado via LMD. Os resultados numéricos foram validados experimentalmente e obteve-se boa concordância entre os valores experimentais e estimados. Um erro abaixo de 6 % foi medido, o que, segundo os autores, justifica a precisão do modelo.

Ansari *et al.* (2019) propuseram um modelo de regressão baseado no método RSM-ANOVA para simular o comportamento do fluxo de pó no processo

de LMD. O modelo estatístico foi desenvolvido para identificar as condições ideais de processamento para obter apenas camadas simples com diluição mínima, altura máxima do cordão e alta eficiência do pó. Segundo os autores, uma boa correlação foi alcançada entre os dados experimentais e os previstos (erro de 5 %).

Yu *et al.* (2018) estudaram através de experimentos ortogonais, diferentes estratégias de deposição e seu efeito nas propriedades mecânicas e microestruturais. Wu *et al.* (2019) desenvolveram um modelo numérico para simular a atenuação do laser e a transferência de calor durante o fornecimento de pó durante a deposição. O erro máximo do modelo foi de 11 %.

Graf *et al.* (2013) usaram uma análise fatorial experimental completa (*full-factorial experimental design*) para determinar o efeito dos parâmetros do processo na geometria do cordão (altura e largura) de uma superliga à base de níquel René 80 depositado a laser. Segundo os autores, o procedimento apresentou boa correlação entre o modelo estatístico e os resultados experimentais obtidos, no entanto o erro do modelo não foi discutido.

Huang *et al.* (2019) desenvolveram um modelo analítico matemático para previsão das características térmicas da microestrutura do material depositado via LMD. Segundo os autores, as características simuladas da microestrutura mostraram concordância razoável com as observações experimentais, no entanto, o erro não foi quantificado. Alam *et al.* (2018) propuseram um modelo preditivo baseado em análise de regressão múltipla RSM para simular o efeito dos parâmetros do processo na dureza e características da camada simples de aço inoxidável depositado a laser. Os resultados do modelo comparados com os experimentais geraram um erro de ± 14 %.

Derimow *et al.* (2022) propuseram um modelo matemático preditivo para simular as características térmicas de camadas simples de ti-6Al-4V depositadas a laser para manufatura aditiva em aplicações aeroespaciais e biomédicas. Kapil *et al.* (2022) também desenvolveram um modelo matemático para simulação da formação de camadas depositadas de forma híbrida via laser-arco de soldagem (*welding arc*). Em ambos os casos, não foi quantificado o erro quando comparados os resultados experimentais com o modelo proposto.

Como pode ser observado, as pesquisas se concentram na geometria do cordão, limitada à altura e largura, ao desenvolver modelos preditivos

principalmente estatísticos. O estudo da geometria de deposição não implica apenas a análise da altura, largura e profundidade de penetração como as principais características da qualidade de deposição ao estudar a manufatura por LMD (NAGESH e DATTA, 2002). Outras características geométricas importantes que têm sido estudadas em menor extensão são a razão altura/largura do cordão, razão profundidade de penetração/largura do cordão, ângulo de molhabilidade e diluição, o que representam uma oportunidade a ser explorada.

As pesquisas sobre propostas de modelagem preditiva são desenvolvidas principalmente usando métodos estatísticos e multicritério limitados a um conjunto estreito de parâmetros e configurações experimentais, variando um fator de cada vez em torno de uma única variável para análise. Os modelos não são expansíveis para uma ampla gama de configurações dos parâmetros do processo. Para o planejamento do processo híbrido, os métodos de simulação e controle preditivo precisam ser desenvolvidos para um grande conjunto de variáveis envolvidas no processo. No entanto, há um significativo interesse de pesquisa no desenvolvimento de modelos de processos e métodos que possam prever/simular a qualidade, precisão dimensional e propriedades mecânicas das peças produzidas via MA (JIMÉNEZ *et al.*, 2021).

A lógica nebulosa (FL – *Fuzzy Logic*) é uma técnica computacional adequada para modelar processos complexos, que em alguns casos podem conter informações vagas e incertas, com menor uso de recursos de *hardware* e *software* e tem se mostrado uma técnica eficaz para apoiar a tomada de decisão em problemas multiobjetivos linguisticamente especificados (LATHA e SENTHILKUMAR, 2010).

A FL se enquadra dentro das técnicas de inteligência artificial que podem ser aplicadas na área da engenharia (manufatura) no desenvolvimento de planejamento de processos automatizado, conhecido como Planejamento de Processos Assistido por Computador (CAPP – *Computer Aided Process Planning*). O CAPP e a gama de métodos, técnicas e ferramentas para sua aplicação têm recebido uma crescente atenção de pesquisa de profissionais e pesquisadores, pois como principais benefícios inclui-se o tempo de processamento reduzido e confiabilidade aprimorada (KUMAR, 2017).

Xu *et al.* (2011) realizaram uma revisão sobre CAPP para o período entre 2000-2010. A discussão sobre várias abordagens CAPP inclui tecnologias baseadas em recursos, teorias KBS (*Knowledge Based Systems*), ANN (*Artificial Neural Networks*), GRA (*Gray Relational Analysis*), Fuzzy Set (FS), Petri Nets (PN), Agent Based (AB), abordagens compatíveis com *Standards for Exchange of Product Model Data* (STEP), etc. São apresentadas análises estatísticas sobre artigos publicados, publicações em periódicos e tendências de pesquisas futuras.

Mardani *et al.* (2015) realizaram uma revisão sobre as aplicações das técnicas *Fuzzy Multiple Criteria Decision Making* (MCDM) para o período 1994–2014. A literatura coletada foi agrupada em áreas de engenharia, gestão e negócios, ciência e tecnologia. Os resultados da revisão permitiram inferir que o método híbrido *Fuzzy-MCDM* e *Fuzzy-Analytical Hierarchy Process* (AHP) se classificam como o primeiro e segundo métodos em uso para apoio à tomada de decisão, respectivamente. Por fim, são apresentadas também as possíveis tendências de pesquisas futuras.

Adnan *et al.* (2015) extrapolaram a utilidade da FL para modelagem de processos de usinagem. Cinco tipos de análises realizadas com a técnica de FL foram utilizados para comparação. Inclui-se nelas a previsão, seleção, monitoramento, controle e otimização do processo de usinagem. Inferiu-se nos resultados que, a fresagem contribuiu para uma maior rugosidade superficial, a qual foi modelada usando a FL. O método do “centro de gravidade” foi usado principalmente para *defuzzificação* e a função triangular foi considerada principalmente para estruturar a função de pertinência. Por fim, são apresentadas possíveis tendências de pesquisas futuras.

Susilawati *et al.* (2015) empregaram a FL para medir o grau de aplicação do princípio *Lean* na indústria manufatureira. O conceito multidimensional envolvendo uma variedade de componentes das práticas *Lean* foi medido para se chegar a uma medida para a atividade *Lean* de uma determinada organização. O índice foi construído a partir de dados primários e secundários de levantamento bibliográfico e validado com entrevistas amostrais. A imprecisão do julgamento humano subjetivo sobre as práticas *Lean* foram modeladas pela lógica *fuzzy* em conjunto com uma consideração adicional

relacionada à duração da implementação das práticas *Lean*. Os resultados observados foram validados através da implementação de um estudo de caso.

Nallusamy *et al.* (2016) realizaram avaliação de sustentabilidade ambiental usando abordagem multiobjetivo. A abordagem *fuzzy*-multiobjetivo foi utilizada para obter um cálculo eficaz do Índice de Sustentabilidade Ambiental (ISA). A implementação de um estudo de caso foi realizada para a indústria automobilística e observou-se o valor ISA de 6,1. Inferiu-se que, os valores calculados são precisos e dentro do nível aceitável de 6-8. Isso provou que no caso estudado a indústria é ambientalmente sustentável forte para melhorar a eficiência da produção.

Outros pesquisadores têm aplicado também a lógica *fuzzy* para automatizar a avaliação de parâmetros e simular o desempenho de processos de manufatura.

Supriadi e Manabe (2013) usaram um controlador *fuzzy* adaptativo para melhorar a precisão dimensional do processo de trefilação de tubos. Eles concluíram que com a introdução da abordagem *fuzzy*, a variação do erro do processo foi mínima. Lin e Lin (2005) usaram a lógica nebulosa cinza (GFL - *Gray Fuzzy Logic*) baseada em uma matriz ortogonal para otimizar o processo de usinagem por descarga elétrica (EDM) com multi-resposta. Os resultados experimentais demonstraram a eficácia da abordagem utilizada.

Wu e Wang (2009) apresentaram uma abordagem *neuro-fuzzy* para gerar sequências de polimento de moldes/matrizes. Os resultados obtidos experimentalmente concordaram com os previstos. No entanto, uma fonte de erro possivelmente foi introduzida devido às incertezas da medição da rugosidade da superfície, uma vez que o dispositivo de medição usado nos experimentos tinha uma precisão mensurável limitada.

Kovac *et al.* (2012) usaram GFL para otimização dos parâmetros de perfuração em materiais compósitos de Plástico Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP). Amaitik (2013) incorporou a FL para seleção de parâmetros de usinagem em um planejamento do processo automatizado. Um conjunto de regras *fuzzy* foi estruturado a partir de manuais, *defuzzificados* e convertidos em variáveis de saída após avaliação. Os resultados do estudo de caso compararam com os dados do manual de usinagem e foi observado um ajuste adequado dos resultados experimentais.

No campo de aplicação do processo de manufatura híbrida, os trabalhos têm se concentrado não processo aditivo como parte de estudos experimentais e exploratórios.

Masinelli *et al.* (2020) usaram técnicas de inteligência artificial (*machine learning*) para monitoramento e controle de manufatura aditiva de metais. Hodonou *et al.* (2020) propuseram uma metodologia baseada na lógica *fuzzy* para a seleção de processos de manufatura (PBF- *Powder Bed Fusion*) de componentes estruturais aeronáuticos com base no impacto econômico e meio ambiental. O erro do modelo não foi quantificado.

Sai *et al.* (2020) propuseram um modelo de simulação baseado num sistema de inferência neuro-*fuzzy* adaptativo (ANFIS) e algoritmo de otimização meta-heurística para modelagem e otimização do processo de modelagem por deposição fundida (FDM – *Fused Deposition Modeling*) para impressão de implantes. O erro relativo percentual para os três parâmetros simulados foi de 13 % aproximadamente. Singh *et al.* (2018) propuseram um modelo de lógica *fuzzy* preditivo para simular a temperatura superficial e otimização dos parâmetros do processo de acabamento por abrasão magnética que afetam a temperatura externa de componentes metálicos. O erro do modelo variou entre -7 % e 5 %.

Tan *et al.* (2021) apresentaram um sistema de inferência *fuzzy* (FIS – *Fuzzy Inference System*) do tipo Mamdani para prever propriedades de tração de ligas fundidas. A abordagem utilizada combinada com algoritmo genético apresentou alta precisão. Genna *et al.* (2020) desenvolveram uma abordagem de tomada de decisão *fuzzy* para otimizar o processo de deposição a laser de estruturas híbridas polímero-metal também combinada com algoritmo genético que permitiu obter os resultados com um menor nível de incerteza.

Alguns outros pesquisadores abordaram os princípios de FL para estudar outros processos de manufatura aditiva e subtrativa.

Srivastava *et al.* (2018) apresentaram uma otimização do processo de modelagem por fusão da deposição (FDM) multiobjetivo usando a FL incorporada ao RSM. Das *et al.* (2016) desenvolveram um algoritmo *grey-fuzzy* para encontrar o nível ótimo dos parâmetros do processo para fresamento CNC de compósitos de matriz metálica Al-4,5%Cu-TiC. Sahu *et al.* (2013) utilizaram a FL para desenvolver um estudo sobre precisão dimensional de peças processadas por FDM.

Sabe-se que os métodos de tomada de decisão multicritério envolvem a quantificação de julgamentos e preferências para escolher pesos para critérios. No entanto, os critérios podem ser imprecisos nos estágios iniciais do projeto. Portanto, a abordagem linguística *fuzzy* introduzida por Zadeh (1965) tem sido mais bem utilizada para lidar com as limitações dos métodos de tomada de decisão multicritério (HODONOU *et al.*, 2020). A lógica *fuzzy* é mais apropriada do que os métodos convencionais de tomada de decisão multicritério ao lidar com a incerteza (JAFARIAN e VAHDAT, 2012).

Como parte do planejamento do processo de manufatura híbrida, é de suma importância obter um entendimento completo da correlação entre os parâmetros de entrada de ambos os processos (aditivo e subtrativo) e o desempenho das variáveis geométricas. O PPMH, deve incluir ademais, a avaliação de todas as atividades de forma integral para garantir robustez no planejamento e desenvolvimento do processo. A configuração de métodos baseados em ferramentas computacionais para prever/simular a geometria da peça (todas as variáveis geométricas de forma simultânea) como parte das atividades que configuram o ciclo de manufatura híbrida é uma oportunidade de pesquisa e forma parte do campo e proposta deste estudo.

2.6 DESIGN SCIENCE RESEARCH

O *Design Science Research* (DSR) abrange um conjunto de técnicas analíticas que facilitam o desenvolvimento de pesquisas nas variadas áreas de conhecimento, como por exemplo, na engenharia (HEVNER *et al.*, 2004). Lacerda *et al.* (2013), afirmam que a aplicação do DSR permite estruturar, projetar e validar “artefatos” novos, ou ainda aprimorar os já existentes. Segundo Çağdaş e Stubkjær (2011), o DSR é um processo que fornece rigor à projeção de artefatos para resolver problemas, avaliar o que foi projetado ou o que está funcionando, e comunicar os resultados obtidos.

March e Smith (1995) classificam e descrevem os tipos de “artefato” como segue:

- Constructos ou conceitos: Conformam o vocabulário e conceituação de um domínio (área de conhecimento). Se utilizam para realizar a descrição

dos problemas dentro de um domínio e suas soluções respectivas. Agrupam os termos para descrever uma atividade a executar;

- Modelos: são um conjunto de proposições ou declarações que expressam as relações entre os constructos. Em atividades de *design*, os modelos representam situações específicas (problemas e suas soluções); descrição de eventos ou ocorrências; são uma representação real e estruturada de um determinado evento ou atividade.
- Métodos: Conjunto de passos (algoritmos, recomendações, orientações) usado para executar uma tarefa. Se baseiam em um conjunto de constructos predefinidos (linguagem) e uma representação (modelo) formando parte de um espaço de solução. Podem estar vinculados a um modelo, sendo as etapas do método elementos que podem utilizar partes do modelo como uma entrada para o desenvolvimento de determinada atividade. Os métodos se usam para explicar um modelo ou para dar resolução a um problema específico, e são concepções típicas das pesquisas em *Design Science*;
- Instanciações: São a concretização de um artefato em seu ambiente de aplicação. As instanciações operacionalizam (validação após aplicação) constructos, modelos e métodos. No entanto, uma instanciação pode, na prática, preceder a articulação completa de seus constructos, modelos e métodos. Instanciações (ex.: estudo de caso) demonstram a viabilidade e a eficácia dos modelos e métodos que elas contemplam.

Hevner (2007), explica o processo de desenvolvimento do DSR com base em três ciclos fundamentais: Relevância, Rigor e Projeto. Na Figura 5 são representados estes ciclos.

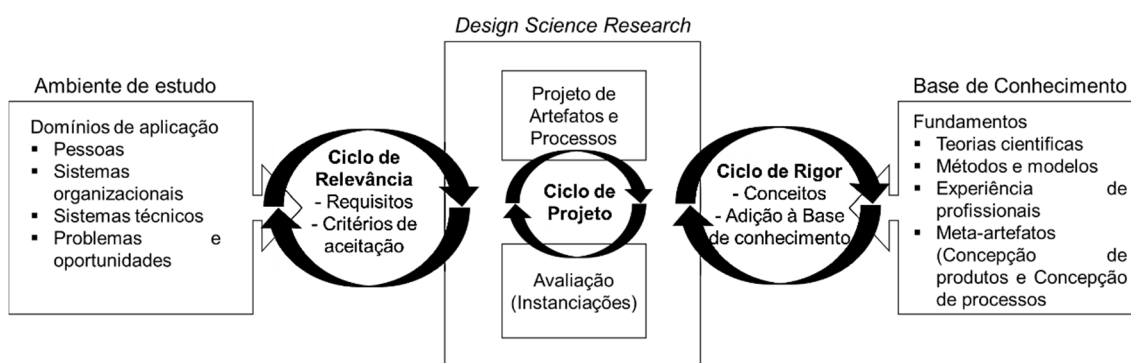


FIGURA 5. CICLOS DO DESIGN SCIENCE RESEARCH. TRADUZIDA DE HEVNER (2007)

O primeiro ciclo é nomeado Ciclo de Relevância. Neste ciclo se definem as entradas, oportunidades e/ou problemas de pesquisa nos domínios de aplicação no ambiente de estudo, tais como: pessoas (funções, capacidades, características etc.), sistemas organizacionais (estratégias, estruturas, cultura, processos, etc.) e/ou sistemas técnicos (infraestrutura, aplicações, literatura, etc.). Após definir o problema de pesquisa, se estabelecem os requisitos de pesquisa e os critérios de aceitação do artefato, como entradas para o Ciclo de Projeto.

O Ciclo de Rigor fornece conhecimento prévio, como entrada, ao Ciclo de Projeto para garantir sua inovação. O Ciclo de Rigor inicia a partir da análise de uma base de conhecimento ampla que fundamente a pesquisa. Esta base abrange as teorias científicas, os modelos de engenharia, experiência de profissionais no domínio de aplicação e os artefatos existentes (HEVNER, 2007). Este ciclo objetiva encontrar os fundamentos apropriados para idealizar o projeto do artefato que se quer desenvolver. Analisa-se a aderência aos requisitos da pesquisa, definidos no Ciclo de Relevância, os artefatos existentes, os projetos análogos em outros domínios de aplicação, assim como os conceitos e teorias acadêmicas (IVARI, 2007).

O Ciclo de Projeto é o núcleo do DSR e o terceiro ciclo a se desenvolver. Este ciclo visa gerar uma alternativa de projeto e avaliar essa alternativa com relação aos requisitos previstos até que um projeto satisfatório seja criado (SIMON, 1996). O Ciclo de Projeto depende dos anteriores (Relevância e Rigor) pois a entrada dele são as saídas dos outros dois. No entanto, há certa independência deste ciclo na execução da pesquisa dado que o projeto dos artefatos e sua avaliação (instanciações) é um processo iterativo que visa alcançar o melhor resultado e as experimentações podem ser executadas atendendo ao conhecimento e teoria previamente estabelecidos (não muda em função da base conceitual e empírica delimitada).

Para a execução do Ciclo de Projeto de forma robusta, Manson (2006), propõe uma metodologia composta por cinco etapas, sendo, conscientização, sugestão, desenvolvimento, avaliação e finalização (Figura 6).

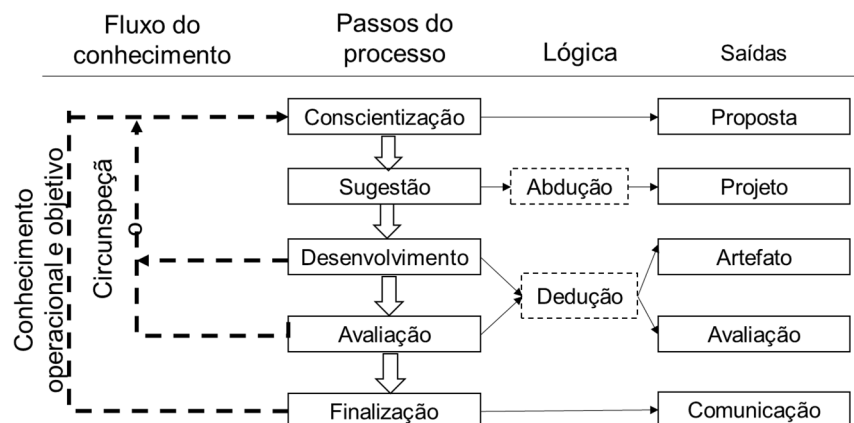


FIGURA 6. METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DO CICLO DE PROJETO. TRADUZIDA DE MANSON (2006)

No Quadro 2 se apresenta a descrição de cada etapa da metodologia proposta por Manson (2006).

QUADRO 2. ETAPAS DA METODOLOGIA PROPOSTA POR MANSON (2006)

Passos	Descrição
Conscientização	<ul style="list-style-type: none"> Objetivo: Conscientização do problema segundo a origem. Saída: Definição do problema de pesquisa, requisitos e escopo de estudo.
Sugestão	<ul style="list-style-type: none"> Objetivo: Apresentar ou formular um ou mais projetos de artefatos experimentais (Abdução). Saída: Definição de opções de artefatos que expliquem ou resolvam o problema.
Desenvolvimento	<ul style="list-style-type: none"> Objetivo: Construir um ou mais artefatos. Se inicia o processo de dedução a partir das teorias existentes, as experiências, para estruturar de forma funcional o(s) artefato(s). Saída: Apresentar o(s) artefato(s) construído(s), exemplo: algoritmos, <i>softwares</i>, sistemas, métodos, modelos, protótipos, entre outros.
Avaliação	<ul style="list-style-type: none"> Objetivo: Avaliar o(s) artefato(s) com relação aos critérios para o que foi projetado. Nesta fase se encerra o processo de dedução. Saída: Artefato que atende de modo amplo as expectativas de solução ao problema de pesquisa definido. Em caso de que o artefato não atenda aos critérios de aceitação há a necessidade de retornar à etapa de conscientização para ajustes na compreensão do problema de pesquisa. Esse fluxo é chamado de circunspecção.
Finalização	<ul style="list-style-type: none"> Objetivo: Consolidar e registrar o conhecimento adquirido, o processo de criação e o projeto do artefato, seus mecanismos de avaliação e os resultados obtidos. Saída: Conhecimento adquirido.

MANSON (2006)

Segundo Simon (1996), diferentes investigadores podem gerar diferentes tipos de soluções. As sugestões de artefatos satisfatórias são aceitáveis quando uma solução ótima não for possível de ser obtida.

Hevner (2007) argumentam que uma solução pode ser considerada satisfatória quando houver um consenso entre os envolvidos no problema e o artefato atender aos critérios de aceitação previamente definidos.

Conforme Manson (2006), um artefato raramente atende de forma abrangente as soluções esperadas para um determinado problema. Neste sentido, deve ser adequadamente apresentado o desvio de desempenho do artefato aos critérios de aceitação (erro).

Com relação à aplicabilidade do DSR na área da engenharia, Lacerda *et al.* (2013) e Goecks *et al.* (2021) desenvolveram uma RSL sobre a aplicação da DSR como método de pesquisa na Engenharia de Produção (EP). Os autores coincidem em que a abordagem se mostra relevante para a aplicação na área a partir da possibilidade de contribuir como um método de investigação em Estudos de Caso e Pesquisa-Ação, métodos próprios da EP nacional.

Nestes trabalhos (LACERDA *et al.*, 2013; GOECKS *et al.*, 2021) são apresentados os desafios, limitações e contribuições da aplicação da DSR na área de EP por meio das pesquisas levantadas na RSL. Lacerda *et al.* (2013) concluem que os conceitos da proposta metodológica da DSR são pertinentes e aplicáveis à solução de problemas na Engenharia de Produção. Por último, Goecks *et al.* (2021) observaram que as áreas de aplicação da DSR têm prevalência em produção e indústria, negócios, e no concernente a processos de simulação e design, se mostram efetivas e com ampla potencialidade de disseminação.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta a classificação da pesquisa e a abordagem metodológica empregada para o desenvolvimento desta tese.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa soluciona um problema relacionado à Engenharia de Produção e dentro desta área classifica-se como descrito em seguida.

Segundo a natureza: é aplicada pois contribui na geração de conhecimentos para aplicação prática visando a solução de um problema específico (PRODANOV e FREITAS, 2013).

Quanto ao objetivo: é exploratória já que a finalidade é proporcionar mais informações sobre o tema de pesquisa tratado, possibilitando sua definição e seu delineamento, assim como contribuindo com o estabelecimento de um novo enfoque para o assunto estudado (PRODANOV e FREITAS, 2013).

Segundo a abordagem: é quantitativa porque procura medir, quantificar e estabelecer a relação entre os parâmetros e as variáveis estudadas para garantir a precisão dos resultados da pesquisa. Empregam-se recursos e técnicas estatísticas para complementar o processo de análise e interpretação dos resultados (PRODANOV e FREITAS, 2013).

Foram adotados como procedimentos técnicos: a Revisão Sistemática da Literatura sustentada pelo método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analysis*) (MOHER *et al.*, 2009), a metodologia *Design Science Research* (HEVNER, 2007; LACERDA *et al.*, 2013) para a construção do modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida com abordagem preditiva que é o escopo desta tese, e a aplicação do modelo proposto por meio da pesquisa experimental, pois os elementos e o objeto de estudo são submetidos à influência de certos parâmetros, em condições de operação controladas e conhecidas para observar os efeitos que se produzem (GIL, 2008).

3.2 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A pesquisa desenvolveu-se em três etapas conforme os procedimentos técnicos definidos anteriormente. Na primeira foram realizadas três Revisões Sistemáticas da Literatura (RSLs), para identificar a lacuna da pesquisa e com isso delimitar uma abordagem para sua solução. Na segunda etapa foi adotada a metodologia *Design Science Research* (DSR) para desenvolvimento e estruturação do modelo de PPMH proposto nesta tese (com escopo metodológico e não tecnológico), por ser um procedimento de pesquisa que auxilia na projeção e construção de modelos e métodos, o que possibilitou atender ao objetivo geral definido nesta tese. Na terceira etapa, como resultado do DSR (etapa 2), o modelo desenvolvido é aplicado e a validação experimental é realizada.

Na Figura 7 se apresenta a estrutura do desenvolvimento desta pesquisa conforme as etapas e procedimentos antes mencionados.

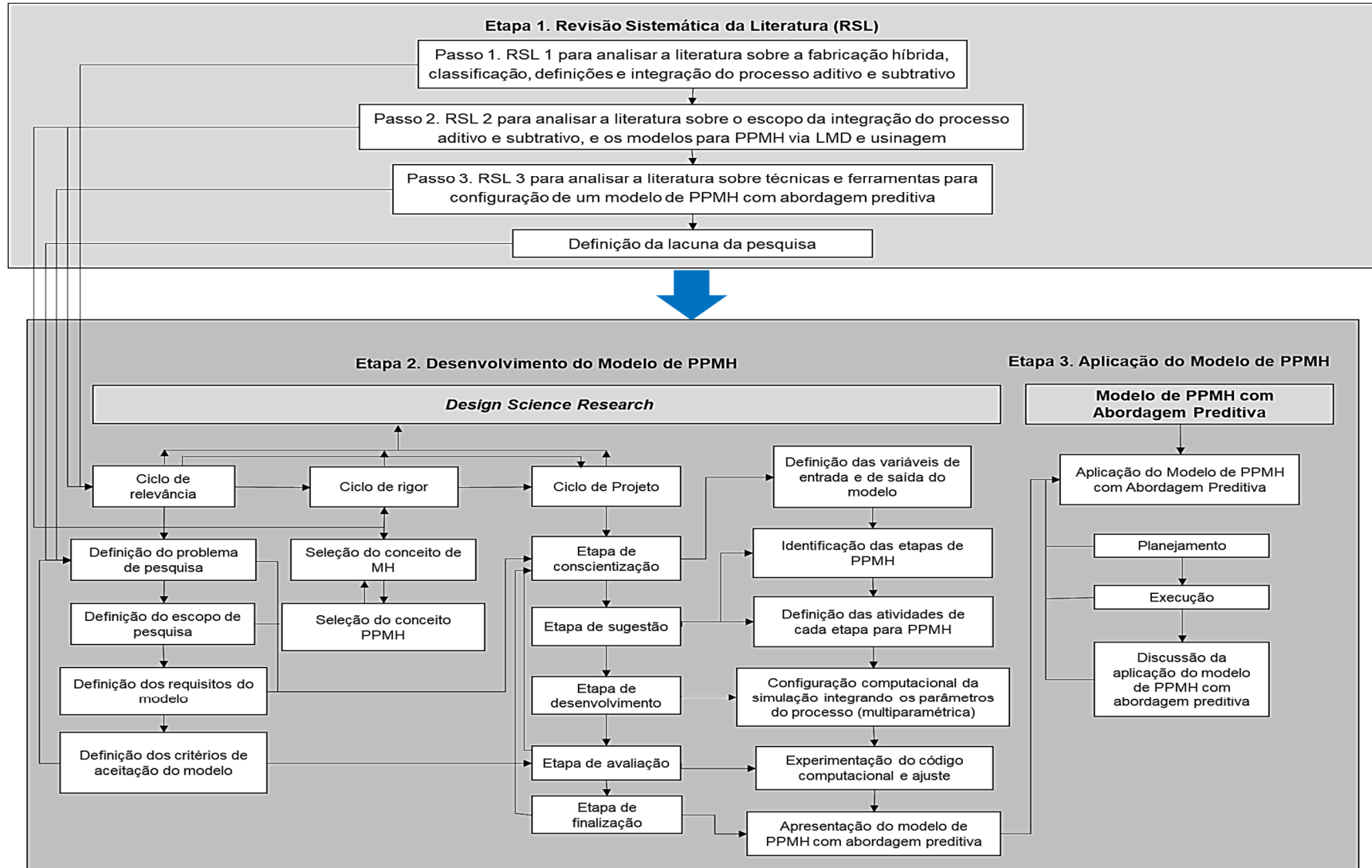


FIGURA 7. ABORDAGEM METODOLÓGICA DA PESQUISA

3.2.1 ETAPA 1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Esta etapa teve a finalidade de identificar a lacuna de pesquisa e, com isto, definir o problema que este trabalho pretende resolver. Foram realizadas três revisões sistemáticas da literatura abrangendo o PPMH, no entanto, para cada RSL se estabeleceu um protocolo e objetivo de pesquisa específicos detalhados nas subseções 3.2.1.1 a 3.2.1.3. O método PRISMA adotado para as RSLs é apresentado no fluxograma de 4 fases na Figura 8. O *software* Mendeley de gerenciamento de referências foi usado como apoio para agrupar os artigos selecionados e realizar as análises correspondentes. É importante destacar que a atividade de meta-análise que propõe o método PRISMA não foi desenvolvida pois não é objetivo desta tese verificar a relação e agregação dos resultados das diferentes pesquisas analisadas.

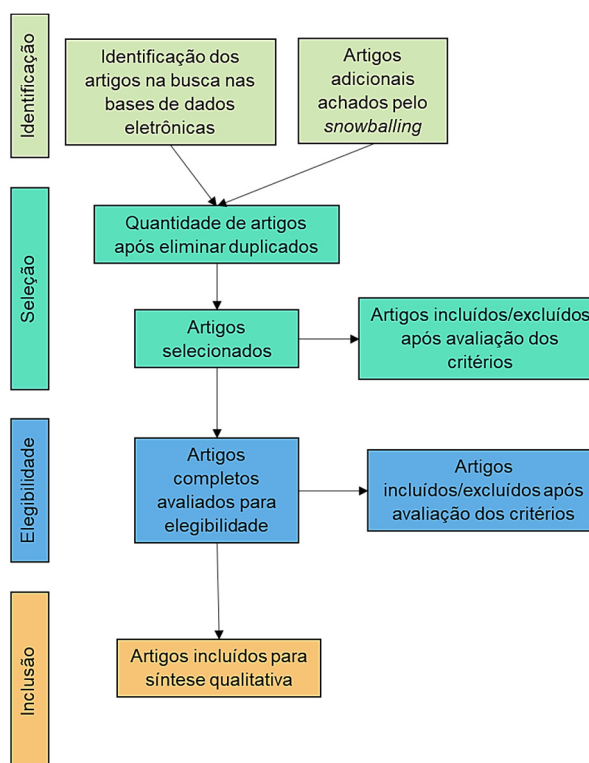


FIGURA 8. MÉTODO PRISMA PARA O DESENVOLVIMENTO DAS RSLs. ADAPTADO E TRADUZIDO DE MOHER ET AL. (2009)

Na fase de **Identificação** (Figura 8), foram identificados nas bases de dados (*Science Direct; Springer Link; Web of Science*) os artigos de potencial interesse por meio das *strings* (S) de busca definidos para cada RSL no protocolo

de pesquisa (Quadro 3). Também foram identificados alguns artigos de interesse pela técnica de *snowballing*.

As fases de **Seleção** e **Elegibilidade** (Figura 8) desenvolveram-se de forma simultânea uma vez coletados os artigos obtidos nas três bases de dados definidas, além da inclusão de outros artigos de interesse (*snowballing*). Nessas fases os artigos agrupados foram filtrados segundo os critérios de inclusão (I) e exclusão (E) definidos no protocolo de pesquisa (Quadro 3).

Na fase de **Inclusão** (Figura 8) foram analisados os artigos que restaram das duas etapas anteriores (Seleção e Elegibilidade). Foi feita uma análise de conteúdo (síntese qualitativa) para verificar a aderência dos artigos agrupados ao objetivo de pesquisa de cada RSL. As análises resultaram no referencial teórico apresentado no Capítulo 2 e na construção do Capítulo 1.

QUADRO 3. PROTOCOLO DE PESQUISA E RESULTADOS DA BUSCA NAS BASE DE DADOS

Fases do PRISMA	Etapas	Descrição das etapas	Artigos
Identificação	Busca nas bases de dados Science Direct; Springer Link; Web of Science	RSL ₁ S ₁ : “ <i>hybrid manufacturing process</i> ” AND “ <i>additive manufacturing</i> ” OR “ <i>3D printing</i> ” AND “ <i>subtractive manufacturing</i> ” AND “ <i>hybrid processes integration</i> ” AND “ <i>process classification</i> ”	RSL ₁ = 687
		RSL ₂ S ₂ : “ <i>hybrid manufacturing process planning</i> ” AND “ <i>process planning models</i> ” AND “ <i>hybrid process planning steps</i> ” AND “ <i>hybrid process planning activities</i> ” AND “ <i>hybrid process planning parameters</i> ” AND “ <i>laser metal deposition</i> ” AND “ <i>machining</i> ”	RSL ₂ = 574
		RSL ₃ S ₃ : “ <i>hybrid manufacturing process planning</i> ” AND “ <i>simulation tools</i> ” OR “ <i>predictive approaches</i> ” AND “ <i>predictive process planning</i> ” AND “ <i>process planning simulation</i> ” AND “ <i>laser metal deposition</i> ” AND “ <i>machining</i> ”	RSL ₃ = 235
Seleção e Elegibilidade	Filtragem nível 1 para inclusão (I) / exclusão (E) dos artigos	(E ₁) Artigos duplicados	RSL ₁ = 441
		(E ₂) Artigos nas categorias: “ <i>Encyclopedia</i> ”, “ <i>Book chapters</i> ”, “ <i>Conference abstracts</i> ”, “ <i>Editorials</i> ”, “ <i>Short communications</i> ”, e “ <i>Other</i> ”.	RSL ₂ = 305
		(I ₁) Artigos com presença dos termos exatos contidos nas strings, em qualquer parte do documento. (I ₂) Artigos com período de publicação: últimos 10 anos. (I ₃) Tipos de artigos na categoria: “ <i>Review articles</i> ”, “ <i>Research articles</i> ” e “ <i>Original articles</i> ”	RSL ₃ = 128
	Filtragem nível 2 para inclusão (I) / exclusão (E) dos artigos	(I ₄) Categoria de acesso: “ <i>Open access</i> ”. (I ₅) Artigos selecionados por meio da leitura do título, palavras-chave e resumo. (E ₃) Artigos fora do escopo da pesquisa (sem relação com o tema de estudo).	RSL ₁ = 156 RSL ₂ = 139 RSL ₃ = 99
Inclusão	Síntese qualitativa	(I ₆) Análise de artigos com contribuição teórica ou prática identificada por meio da análise do conteúdo conforme objetivos definidos para cada RSL.	RSL ₁ = 103
		(E ₄) Artigos sem contribuição teórica ou prática conforme objetivos definidos para cada RSL.	RSL ₂ = 88
			RSL ₃ = 62

3.2.1.1 Análise da literatura relacionada a processos de manufatura e sua integração na manufatura híbrida. Classificação, conceitos e definições

A RSL₁ se desenvolveu com o intuito de analisar os conceitos e definições dos processos de manufatura que podem vir a integrar os processos de manufatura híbrida, e a evolução dos conceitos desta última. Esperava-se também identificar como é estruturado o processo híbrido e a necessidade da integração dos processos aditivo e subtrativo.

Na fase de **Identificação** (Quadro 3), o primeiro passo para executar a RSL₁, foi a estruturação da *string* de busca S_1 , composta pelas palavras-chave no idioma inglês extraídas dos 10 artigos mais relevantes resultantes das bases de dados delimitadas para desenvolver as revisões (*Science Direct; Springer Link; Web of Science*). As palavras-chave inicialmente usadas para delimitar estes 10 artigos foram “*hybrid manufacturing*”, “*additive manufacturing*”, e “*subtractive manufacturing*”. As bases foram escolhidas pela variedade de trabalhos publicados em periódicos de alto extrato que dispõem na área da engenharia, especificamente no tema desta tese. Com resultado desta busca se obtiveram 687 documentos.

Na fase de **Seleção e Elegibilidade** (Quadro 3), se aplicaram duas filtragens segundo os critérios de inclusão (I_1, \dots, I_5) e exclusão (E_2 e E_3) delimitados. Após a filtragem 1 ($I_1, I_2, I_3; E_2$), de 687 documentos, restaram 441 artigos. Após a filtragem 2 ($I_4, I_5; E_3$), de 441 artigos, 183 não estavam disponíveis para leitura, ou seja, não se classificavam como *open access* (I_4). Dos 258 restantes, após excluir 102 que não estavam dentro do escopo da pesquisa (E_3), foram agrupados segundo o critério I_5 156 artigos.

Na fase de **Inclusão** (Quadro 3), se realizou uma análise de conteúdo para delimitar quais artigos apresentavam mais aderência aos principais elementos delimitados no escopo desta primeira revisão. Após a aplicação dos critérios I_6 e E_4 , de 156 artigos, resultaram aproximadamente 103 documentos.

Parte dos documentos agrupados serviram para a construção teórica de outras partes desta tese e como complemento para a fundamentação do modelo. A síntese teórica correspondente a esta etapa se apresenta no Capítulo 2, nas seções 2.1 Classificação dos processos de manufatura, 2.2 Definições de processo híbrido de manufatura, 2.2.1 Integração da usinagem e a LMD na

manufatura híbrida e 2.2.2 Parâmetros e variáveis de saída do processo de manufatura híbrida.

3.2.1.2 Análise da literatura relacionada a modelos de planejamento do processo de manufatura híbrida

Na primeira RSL se identificou que em função do escopo de aplicação do processo híbrido (manufatura, reparo ou remanufatura) diferentes abordagens metodológicas e modelos de planejamento do processo híbrido podem ser estruturados. Assim, a RSL₂ se realizou com o fim de compreender a estrutura dos modelos planejamento do processo híbrido para manufatura, suas partes integrantes (etapas) e as atividades do planejamento e formas de controle. Esperava-se identificar especificamente os modelos de planejamento do processo híbrido que integram a manufatura aditiva e subtrativa, via LMD e usinagem, para verificar o estado atual de desenvolvimento e possíveis oportunidades de pesquisa.

Na fase de **Identificação** (Quadro 3) da RSL₂, se repetiu o procedimento da RSL₁ (estruturação da *string* de busca S₂, composta pelas palavras-chave no idioma inglês extraídas dos 10 artigos mais relevantes resultantes das bases de dados delimitadas para desenvolver as revisões, *Science Direct*; *Springer Link* e *Web of Science*). A diferença nesta fase da RSL₂ foi que as palavras-chave usadas para delimitar estes 10 artigos, foram “*hybrid manufacturing*”, “*process planning*”, “*process parameters*”, “*laser metal deposition*”, e “*machining*”. Com resultado desta busca se obtiveram 574 documentos.

Na fase de **Seleção e Elegibilidade** (Quadro 3) da RSL₂, se repetiu o procedimento da RSL₁ (aplicação de duas filtragens segundo os critérios de inclusão e exclusão delimitados, agora incluindo o critério (E₁) artigos duplicados). Após a filtragem 1 (I₁, I₂, I₃, E₁ e E₂), de 574 documentos, restaram 305 artigos. Após a filtragem 2 (I₄, I₅; E₃), de 305 artigos, 127 não estavam disponíveis para leitura, ou seja, não se classificavam como *open access* (I₄). Dos 178 restantes, após excluir 39 que não estavam dentro do escopo da pesquisa (E₃), foram agrupados segundo o critério I₅ 139 artigos.

Na fase de **Inclusão** (Quadro 3) da RSL₂, se realizou a análise de conteúdo correspondente para delimitar quais artigos apresentavam mais aderência aos principais elementos delimitados no escopo da RSL₂. Após a

aplicação dos critérios I₆ e E₄, de 139 artigos, resultaram aproximadamente 88 documentos. Destes 88, apenas 14 artigos apresentavam efetivamente modelos para planejamento do processo híbrido para manufatura via LMD e usinagem, os que foram avaliados de forma mais aprofundada.

Parte dos documentos agrupados serviram para a construção teórica de outras partes desta tese e como complemento para a fundamentação do modelo. A síntese teórica correspondente a esta etapa se apresenta no Capítulo 2, nas seções 2.3 Planejamento do processo híbrido de manufatura e 2.4 Modelos para planejamento do processo híbrido de manufatura via LMD e usinagem.

3.2.1.3 Análise da literatura relacionada às técnicas e ferramentas para simulação no PPMH

Na segunda RSL se verificou que alguns modelos de planejamento do processo híbrido de manufatura incluíam uma etapa de simulação limitada apenas a um parâmetro do processo, atividade ou variável geométrica. Com a RSL₃ buscou-se identificar as técnicas e ferramentas usadas no planejamento e validação do processo híbrido, que poderiam ser integradas numa etapa de simulação do processo, especificamente integrando a deposição de metal a laser e a usinagem.

Na fase de **Identificação** (Quadro 3) da RSL₃, se repetiu o procedimento da RSL₁ e RSL₂. No entanto, a estruturação da string de busca S₃, foi composta por palavras-chave no idioma inglês extraídas de alguns dos artigos obtidos nas duas revisões anteriores. As bases consultadas foram as mesmas, *Science Direct*; *Springer Link* e *Web of Science*. Como resultado desta busca se obtiveram 235 documentos.

Na fase de **Seleção e Elegibilidade** (Quadro 3) da RSL₃, se repetiu o procedimento da RSL₂ (aplicação de duas filtragens segundo os critérios de inclusão e exclusão delimitados. Após a filtragem 1 (I₁, I₂, I₃, E₁ e E₂), de 235 documentos, restaram 128 artigos. Após a filtragem 2 (I₄, I₅, E₃), de 128 artigos, 29 não estavam disponíveis para leitura, ou seja, não se classificavam como *open access* (I₄). Dos 99 restantes, após excluir 12 que não estavam dentro do escopo da pesquisa (E₃), foram agrupados segundo o critério I₅ 87 artigos.

Na fase de **Inclusão** (Quadro 3) da RSL₃, se realizou a análise de conteúdo correspondente para delimitar quais artigos apresentavam mais

aderência aos principais elementos delimitados no escopo desta revisão. Após a aplicação dos critérios I₆ e E₄, de 87 artigos, resultaram aproximadamente 62 documentos. Parte dos documentos agrupados serviram para a construção teórica de outras partes desta tese e como complemento para a fundamentação do modelo. A síntese teórica correspondente a esta etapa se apresenta no Capítulo 2, na seção 2.5 Técnicas e ferramentas para a tomada de decisão preditiva no PPMH.

3.2.2 ETAPA 2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Esta etapa trata do desenvolvimento do modelo para PPMH. O desenvolvimento do modelo se sustentou na metodologia *Design Science Research* descrita na seção 2.6 do Capítulo 2. Os resultados desta etapa se apresentam no Capítulo 4 desta tese.

3.2.2.1 *Design Science Research* para proposta do modelo de PPMH com abordagem preditiva

O *Design Science Research* foi usado para estruturar a proposta do modelo que trata esta tese, que segundo March e Smith (1995) é uma ferramenta adequada para o desenvolvimento de modelos e métodos de forma robusta e fundamentada. A partir da seleção e análise crítica dos modelos para planejamento do processo de manufatura híbrida que se ajustam ao escopo da tese, assim como as técnicas e ferramentas de apoio à tomada de decisão para construção do modelo foram seguidos os três ciclos que compõem o DSR, que segundo Hevner (2007) são: Ciclo de Relevância, Ciclo de Rigor e Ciclo de Projeto.

- **Ciclo de Relevância**

O ciclo de relevância busca detalhar e fundamentar apoiando-se nas análises da literatura a necessidade da proposta do modelo de PPMH com abordagem preditiva (escopo), por meio da identificação do problema e lacuna de pesquisa, além dos requisitos e critérios de aceitação do modelo, conforme a Figura 7.

- **Ciclo de Rigor**

O ciclo de rigor é retroalimentado pelo ciclo de relevância. Neste ciclo se utilizam as definições e conceitos levantados na análise da literatura para identificar os conceitos que se adotam como referência e que fundamentam o desenvolvimento do modelo proposto, conforme a Figura 7.

- **Ciclo de Projeto**

O ciclo de projeto apoia-se nas informações geradas nos ciclos anteriores (de Relevância e de Rigor). O desenvolvimento deste ciclo ocorre nas 5 etapas, definidas por Manson (2006), que são: Conscientização, Sugestão, Desenvolvimento, Avaliação e Finalização. Estas etapas visam auxiliar na construção do modelo proposto nesta tese, conforme a Figura 7. A seguir se descreve cada uma.

1. Conscientização: nesta fase se objetiva ter um amplo entendimento do modelo que se propõe. Para isso, se analisam as necessidades definidas no ciclo de relevância. Para atender essas necessidades se definem as variáveis de entrada e saída do modelo.

2. Sugestão: é a fase na qual as partes integrantes do modelo são definidas. Se identificam as etapas do modelo de planejamento, se definem as atividades que integram cada etapa, os requisitos e parâmetros do processo, e as técnicas e ferramentas para a realização de cada uma das etapas e atividades previamente definidas.

3. Desenvolvimento: nesta fase se procede à estruturação das conexões e fluxos entre cada uma das partes integrantes do modelo e suas respectivas atividades. Se define nesta fase como o uso das ferramentas e técnicas de auxílio à tomada de decisão para PPMH contribuirão como método de controle do modelo que se propõe.

4. Avaliação: nesta etapa o código computacional preditivo (simulação) é configurado e rodado para validação das variáveis de saída avaliadas até que os critérios de aceitação, definidos no ciclo de relevância, sejam atendidos.

5. Finalização: nesta etapa é apresentado o modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida adotando as correções que sejam necessárias após a fase de avaliação. Após a finalização, o modelo é aplicado em um caso real.

3.2.3 ETAPA 3. APLICAÇÃO DO MODELO DE PPMH

A aplicação do Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva é realizada para avaliar a assertividade e confiabilidade da proposta, e se o processo estudado é possível de se realizar mantendo a estabilidade esperada. A aplicação ocorre em três etapas: (i) planejamento do processo, (ii) execução do processo e (iii) análise e discussão dos resultados.

No planejamento é identificada a empresa, a máquina híbrida a utilizar, o DoE é estruturado e os recursos disponíveis são definidos. Na etapa de execução é aplicado o modelo proposto segundo o DoE realizado na etapa anterior. Por último, na etapa de discussão são analisados os resultados obtidos nos experimentos e é feita a comparação entre a simulação e os resultados experimentais e se discute a correlação entre ambas as abordagens.

A aplicação do modelo a partir das três etapas anteriormente mencionadas e sua discussão será realizada no Capítulo 5 desta tese.

4 MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA

Neste capítulo é detalhado o procedimento para a estruturação do Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva.

4.1 CICLO DE RELEVÂNCIA

Como apresentado no Capítulo 3, na Figura 7, o primeiro ciclo para desenvolver o *Design Science Research* é o Ciclo de Relevância. Este ciclo se desenvolve a partir da definição do problema de pesquisa, o escopo de pesquisa, os requisitos e os critérios de aceitação do modelo proposto.

4.1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

Foram desenvolvidas duas revisões sistemáticas da literatura (RSL₂ e RSL₃), apresentadas no Capítulo 2, nas seções 2.3 e 2.4 (RSL₂), e 2.5 (RSL₃), que resultou na definição da lacuna da pesquisa: inexistência de um modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida que integre uma etapa de simulação do processo, e que na própria etapa de planejamento sejam integradas todas as atividades da operação para atendimento aos requisitos operacionais e de qualidade num planejamento holístico do processo. Após a identificação da lacuna foi possível definir o problema de pesquisa: como estruturar um modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida que integre todas as atividades da operação assim como uma etapa de simulação para garantia da estabilidade e repetibilidade do processo por meio da configuração de uma estratégia de manufatura adequada?

4.1.2 DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA PESQUISA

O escopo desta pesquisa limita-se ao planejamento do processo de manufatura híbrida que integra a deposição de metal a laser (LMD) e usinagem. O escopo foi delimitado com o apoio das RSL₁ e RSL₂, correspondentes às seções 2.2 e 2.2.1 (RSL₁), e 2.3 a 2.4 (RSL₂), do Capítulo 2. Com estas revisões

se identificaram as possibilidades para integração de ambos os processos, aproveitando as potencialidades de cada um, os modelos de planejamento do processo híbrido, suas etapas, atividades principais e limitações. Por tanto, define-se como o escopo desta pesquisa: a proposta de um modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida com abordagem preditiva.

4.1.3 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DO MODELO DE PLANEJAMENTO

Com base na análise conceitual do Capítulo 2, seção 2.6 e na Figura 4 da mesma seção, e sustentados pela lacuna, problema e escopo de pesquisa, identificam-se os requisitos que o modelo deve atender para garantir que sua aplicabilidade reflita da forma mais assertiva possível a situação real que visa representar. Os requisitos do modelo proposto buscam atender os requisitos mais utilizados nos modelos existentes, e incluir os que não são atendidos por estes modelos, e preencher as limitações dos modelos avaliados. Por tanto, definem-se como requisitos do modelo:

- Integrar as sete atividades da etapa de planejamento do processo de manufatura híbrida;
- Incluir uma etapa de simulação do processo que avalie os parâmetros do processo híbrido e que permita simular seu efeito nas características geométricas de saída para reduzir a necessidade de experimentação iterativa e elevar a confiabilidade do processo;
- Garantir uma estratégia de manufatura que permita executar o processo híbrido de forma estável e eficiente.

4.1.4 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DO MODELO DE PLANEJAMENTO

Conforme Dresch *et al.* (2015), o primeiro critério de aceitação que deve ser atendido pelo modelo é cumprir com todos os requisitos previamente definidos. Com isto, o modelo proposto tem como principal critério de aceitação, a satisfação dos três requisitos definidos anteriormente. A Figura 9 ilustra os requisitos do modelo e seus critérios de aceitação.



FIGURA 9. REQUISITOS E CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DO MODELO

4.2 CICLO DE RIGOR

O segundo ciclo no *Design Science Research* a ser desenvolvido é o Ciclo de Rigor. Neste ciclo, com base nos resultados da revisão da literatura, apresentada no Capítulo 2, na seção 2.1 e 2.2 (RSL₁), e na seção 2.3 (RSL₂), se selecionou a base conceitual que distingue o modelo proposto e que atende os requisitos definidos no ciclo anterior: manufatura híbrida, planejamento do processo e abordagem preditiva.

4.2.1 SELEÇÃO DO CONCEITO DE PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA

Foi selecionado como conceito de processo de manufatura híbrida a seguir nesta pesquisa o definido por Zhu *et al.* (2013a), que vai ao encontro das abordagens descritas por Nassehi *et al.* (2011) e CIRP (2011): interação de dois ou mais processos de manufatura diferentes, integrados em uma mesma máquina, e que podem ser executados de forma independente, sobre a mesma área de uma peça ou diferentes áreas seguindo uma sequência predeterminada para um determinado fim.

4.2.2 SELEÇÃO DO CONCEITO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA

Nesta pesquisa, optou-se por seguir o conceito de planejamento do processo de manufatura híbrida como segue: etapa prévia à execução do processo de manufatura híbrida, que forma parte de um ciclo de manufatura que implica a modelagem, determinação, seleção e o sequenciamento de operações ou processos e seus requisitos tecnológicos necessários para transformar uma matéria-prima em um componente acabado (KULKARNI *et al.*, 2000; XU *et al.*, 2011; ROSSI e LANZETTA, 2020).

O planejamento do processo híbrido deve incluir a inserção de uma etapa de simulação do processo, como uma funcionalidade integrada, que garante sua abordagem preditiva, que seja capaz de reajustar as configurações do processo e seu efeito na geometria gerada para garantir a estabilidade e repetibilidade do processo (CORTINA *et al.*, 2018c; CHONG *et al.*, 2018; DÁVILA *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020). Esta abordagem preditiva garante que as condições experimentais do processo estão adequadas para a manufatura da geometria modelada mesmo antes de executar o processo, o que implica na redução de desvios geométricos, da necessidade de experimentação excessiva; elevado consumo de material e tempo de manufatura, o que pode ser caro e resultar numa estratégia de deposição deficiente (CORTINA *et al.*, 2018c; ROSSI e LANZETTA, 2020; ZHANG *et al.*, 2020).

4.3 CICLO DE PROJETO

O Ciclo de Projeto é o último ciclo a ser executado no *Design Science Research*, e é o ciclo mais complexo no desenvolvimento, segundo Hevner (2007). Este ciclo se alimenta das informações dos ciclos anteriores, Ciclo de Relevância e Ciclo de Rigor, para alcançar o objetivo proposto nesta pesquisa que é propor um Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva.

Para o desenvolvimento do ciclo seguiram-se as cinco etapas apresentadas na abordagem metodológica desta pesquisa, na Figura 6, do Capítulo 3.

4.3.1 ETAPA DE CONSCIENTIZAÇÃO

Nesta etapa são definidas as variáveis do modelo de planejamento do processo híbrido que se regem pelos requisitos e critérios apresentados nas seções 4.1.3. e 4.1.4.

4.3.1.1 Definição das variáveis de entrada e de saída do modelo

As variáveis do modelo se desdobram a partir dos requisitos e critérios do modelo. Como variáveis de entrada se adotam as sete atividades do processo que permitem realizar um planejamento mais completo, que são as detalhadas na seção 2.4. Também se incluem os parâmetros do processo híbrido, que possibilitem configurar uma etapa de simulação multiparamétrica do processo, integrando um número maior de parâmetros que os modelos avaliados. Os parâmetros foram os identificados na subseção 2.2.2.

Entende-se que a integração das duas atividades anteriores no modelo de planejamento, permitirá definir a melhor estratégia de manufatura a ser executada de forma a garantir uma adequada estabilidade do processo. A melhor estratégia é aquela que após a etapa de simulação multiparamétrica prevê um menor erro. O erro é parametrizado a partir da análise da literatura realizada na seção 2.5 e pela efetiva configuração do método de simulação definido nesta tese que segue a configuração de um Sistema de Inferência *Fuzzy* (FIS).

As variáveis de saída, se definem a partir dos critérios de aceitação do modelo definidos na subseção 4.1.4. Na Figura 10 se apresentam as variáveis de entrada e saídas do Modelo de Planejamento do Processo Híbrido com Abordagem Preditiva proposto.

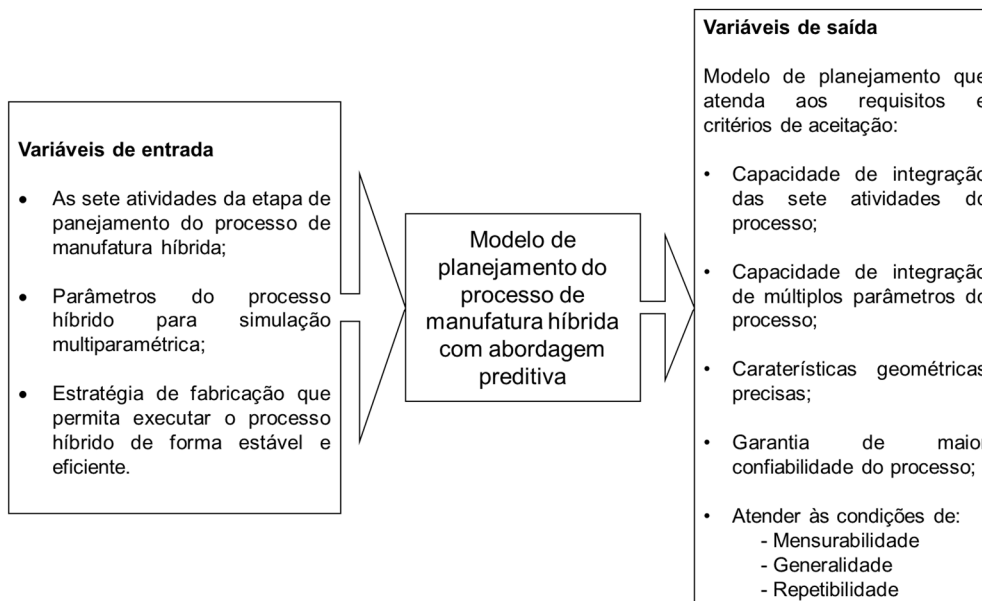


FIGURA 10. VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA

4.3.2 ETAPA DE SUGESTÃO

A etapa de Sugestão visa definir as partes integrantes do modelo. Nesta etapa se identificam as etapas do modelo de planejamento; se definem as atividades que integram as etapas; e, após isso, são definidas as condições técnicas para estruturar e realizar os experimentos a partir dos requisitos, critérios e as variáveis que atendem à proposta do modelo.

4.3.2.1 Definição das etapas do Modelo de PPMH

O desenvolvimento e execução de cada etapa do modelo visa garantir o atendimento ao perfil geométrico modelado, redução da necessidade de experimentação elevada para atender às condições experimentais adequadas conforme o modelo projetado, e a estabilidade e confiabilidade do processo.

As etapas do modelo são:

- Etapa 1. Modelagem CAD (*Design*)
- Etapa 2. Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida
- Etapa 3. Simulação multiparamétrica do Processo de Manufatura Híbrida
- Etapa 4. Execução do Processo de Manufatura Híbrida
- Etapa 5. Análise metrológica (análise dimensional das características geométricas).

A Figura 11 ilustra as etapas do modelo de planejamento do processo híbrido e a sequência de desenvolvimento delas. Na próxima subseção serão detalhadas as principais atividades a desenvolver em cada etapa.

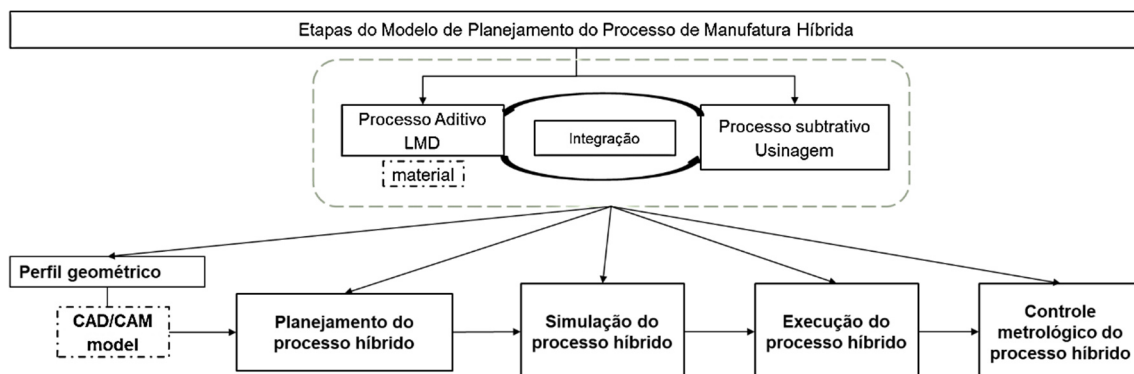


FIGURA 11. ETAPAS DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA

Deve-se destacar que não forma parte do objetivo desta tese definir para o planejamento do processo híbrido novas abordagens metodológicas para executar a Etapa 1, assim como a realização das sete atividades da Etapa 2, identificadas na literatura como relevantes para garantia da estabilidade do processo. Visa-se com a proposta aqui feita identificar as atividades para garantia da estabilidade do processo e sua integração em um único modelo de planejamento, além de inserir uma etapa de simulação multiparamétrica que garanta uma abordagem preditiva ao modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida, para que possa ser controlado mesmo antes de sua execução.

No entanto, na seção a seguir (subseção 4.3.2.2) são feitas sugestões de cunho orientativo, sobre as propostas que podem servir como referência para tratar cada uma dessas etapas (Etapa 1 e Etapa 2) e suas atividades, de acordo com os principais autores que pesquisam sobre o tema, reiterando o fato de que a escolha de como conduzi-las fica a critério do usuário do modelo aqui proposto.

4.3.2.2 Definição das atividades de cada etapa do modelo proposto

As atividades a serem realizadas em cada etapa do modelo visam atender aos requisitos, critérios e variáveis previamente definidas (seções 4.1.3, 4.1.4, 4.3.1.1, respectivamente).

A primeira etapa (Etapa 1) é baseada no projeto do componente. Nesta fase, é definida a geometria a ser gerada através da fabricação híbrida. A Etapa 1 é possível de se realizar a partir de um projeto computacional que permita transferir os dados, informações e principais descrições do modelo de projeto para o ambiente de planejamento do processo (Etapa 2) antes de proceder com sua realização.

Sugere-se adotar como método para atender esta etapa, a proposta metodológica de Kerbrat *et al.* (2011), para um componente novo que se deseja fabricar. Os autores desenvolveram uma abordagem de Projeto para Fabricação (DFM – *Design for Manufacturing*), combinando AM e SM em uma abordagem modular híbrida. Em seu trabalho, os autores propuseram índices de manufacturabilidade (*manufacturability index*) a serem avaliados a partir dos parâmetros de projeto (do modelo CAD da peça), tais como, geometria, dimensões, informações do material e especificações. Esses índices orientam a decisão sobre as características estruturais do objeto e que partes dele devem ser fabricadas pela AM ou SM, numa sequência predefinida.

A Figura 12 apresenta a Etapa 1, Modelagem CAD/CAM do perfil geométrico a ser manufaturado pelo processo híbrido.

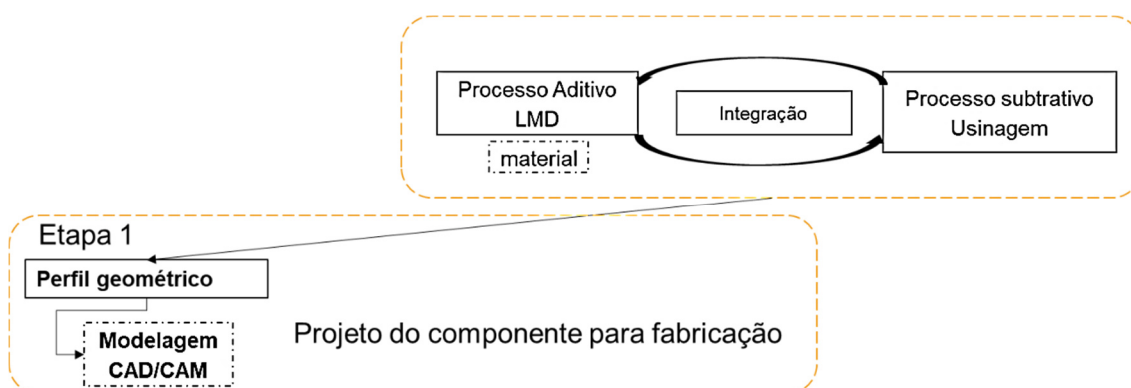


FIGURA 12. ETAPA 1 DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA. ATIVIDADES DA ETAPA 1 MODELAGEM CAD/CAM

A Etapa 2, planejamento do processo híbrido, envolve inicialmente a determinação das atividades necessárias a serem atendidas no planejamento para que o processo possa ser realizado de forma eficiente (atividades definidas na seção 2.4), conforme os critérios da modelagem definidos na Etapa 1.

Conforme identificado na RSL₂ (seções 2.3 e 2.4), o trabalho de Kulkarni *et al.* (2000) abrange as 5 primeiras atividades para desenvolvimento do planejamento do processo aditivo, as que são replicadas pelos autores que desenvolvem as abordagens de planejamento do processo híbrido avaliadas (seção 2.3, e Quadro 1 da seção 2.4). Assim, sugere-se neste trabalho que as atividades: (i) orientação da peça (OP); (ii) direção de fabricação (DF); (iii) estrutura de suporte (fixação) (ES); (iv) decomposição geométrica da peça (DG); (v) planejamento da trajetória da ferramenta (PT), sejam realizadas conforme os diversos critérios e técnicas recomendados por Kulkarni *et al.* (2000) para cada atividade, e ainda podem ser consultados os modelos desenvolvidos pelos autores que atendem a cada uma das atividades, conforme Quadro 1.

Com relação à atividade (vi) sequenciamento das operações (SO), Chen-Li *et al.* (2018) e Chen-Li *et al.* (2020), propõem um PPMH para desenvolvimento de um algoritmo voltado para a determinação da sequência alternada mínima entre o processo aditivo e subtrativo com foco na acessibilidade da ferramenta durante o processo subtrativo. Estes autores desenvolveram um algoritmo que permite executar o processo aditivo da forma mais precisa possível para que a necessidade de execução da atividade subtrativa seja a mínima, para reduzir o tempo de fabricação, a alternância de entre as operações e o desperdício de material.

Sobre a (vii) detecção da colisão (DC), Eldakrouy *et al.* (2018) propuseram um método para identificar os melhores substratos e suas geometrias para manufatura metálica em sistemas de manufatura híbridos multieixos. O método é capaz de encontrar substratos viáveis e realizar uma simulação de colisão para uma variedade de modelos de peças. O método de simulação garante que se a colisão entre o cabeçote e o substrato for detectada, a simulação do modelo será interrompida e relatará as coordenadas de colisão.

Ainda nesta Etapa 2, os parâmetros do processo híbrido são os definidos, assim como as variáveis geométricas a serem avaliadas (subseção 2.2.2.).

Os parâmetros e variáveis de saída do processo híbrido que são estudados no modelo proposto foram identificados por meio da análise dos trabalhos extraídos nas RSL₁; RSL₂ e RSL₃, como apresentado nas seções 2.2, 2.4 e 2.5, respectivamente, no Capítulo 2. A identificação dos parâmetros e suas faixas de operação também se realizou pelo manual da máquina híbrida utilizada.

Os parâmetros do processo aditivo e suas respectivas unidades de medida a serem incorporados no modelo proposto são:

- Potência do laser (W);
- Fluxo de pó (g/min);
- Distância de afastamento do bocal de deposição (mm);
- Velocidade de varredura do laser (mm/min);
- Fluxo do gás de proteção (L/min);
- Diâmetro do ponto focal do laser (mm);
- Espaçamento lateral entre os cordões (mm);
- Ângulo de posição do fluxo de pó (α°);
- Ângulo de posição do laser (β°).

Sobre os dois últimos parâmetros, no caso desta tese, pela máquina híbrida estudada e o princípio de operação (Figura 1, Capítulo 2), o ângulo $\alpha = \beta$ (90°).

Já os parâmetros a serem considerados no processo subtrativo são:

- Velocidade de avanço da ferramenta de corte (mm/min);
- Rotação da ferramenta (rpm);
- Ângulo de posição da ferramenta com relação ao substrato (90°);
- Percurso da ferramenta (mm);
- Profundidade de corte (mm).

Com relação às variáveis geométricas de saída, as principais variáveis geométricas estudadas no modelo proposto são:

- Altura do cordão (mm);
- Largura do cordão (mm);
- Profundidade de penetração do cordão (mm);
- Diluição da deposição (%);
- Ângulo de molhabilidade (θ);
- Densidade volumétrica de energia (J/mm^3).

As três últimas variáveis são dependentes das três primeiras, e do parâmetro Espaçamento lateral entre os cordões (mm) quando são depositados próximos para conformar uma camada de material depositado.

A interação dos parâmetros do processo e seu efeito na geometria da deposição deve ser corretamente avaliada e controlada pois sua variabilidade

pode impactar negativamente na estabilidade do processo e na qualidade do componente ou peça a ser fabricado (PUPO *et al.*, 2013; CORTINA *et al.*, 2018c).

Segundo Debroy *et al.* (2018) e Mahamood (2018), a falta de compreensão de como os parâmetros do processo podem impactar as características geométricas da estrutura fabricada pode trazer como resultado, a ocorrência de pouca ou nenhuma fusão entre o material depositado e o substrato, elevada porosidade, qualidade superficial defeituosa, diluição excessiva, não uniformidade na camada (efeito “degrau”), desperdício de pó, excesso de energia direcionada no substrato e no material depositado que pode causar distorções e rachaduras e acumulação térmica na camada causando pouca solidificação.

Esta análise possibilita que os requisitos e critérios do modelo proposto sejam atendidos adequadamente.

A estratégia de deposição também é definida a partir do modelo geométrico da Etapa 1. A seleção do material, o projeto do experimento, e seleção da máquina híbrida para executar as operações e corpos de prova para experimentação e análise, são aspectos também definidos na Etapa 2, assim como, as medições das variáveis, análises estatísticas e metalográficas, entre outras.

Partindo dos parâmetros do processo e as variáveis de saída apresentadas, se projeta o experimento de forma a atender os requisitos e critérios do modelo, previamente definidos.

O projeto experimental permite identificar os parâmetros de entrada do processo e seus níveis de operação que afetam diretamente as variáveis de saída. Uma análise fatorial combinatória pode ser realizada para determinar todas as combinações de parâmetros possíveis para aprimorar o esforço experimental e avaliar os possíveis efeitos da interação nas variáveis geométricas definidas. Um esquema randomizado para execução dos experimentos pode ser adotado para melhorar a confiabilidade estatística, neste sentido, cada combinação de fatores pode ser repetida no experimento (GRAF *et al.*, 2013).

A combinação dos parâmetros (n) e seus níveis operacionais (m) implicam que m^n experimentos podem ser realizados e cada experimento executado em

R_i repetições. Após as execuções dos experimentos e suas repetições (R_i), cada variável de saída é medida e analisada estatisticamente.

O Quadro 4 apresenta a estruturação do projeto experimental que deve incluir os parâmetros do processo e seus níveis de operação.

QUADRO 4. PARÂMETROS DO PROCESSO E NÍVEIS DE OPERAÇÃO

Parâmetros do processo	Unidade	Níveis operacionais		
		Máx.	Méd.	Mín.
Parâmetro 1				
.				
Parâmetro n				

A Figura 13 apresenta a Etapa 2, Planejamento do Processo, e as atividades da Etapa 2 a serem incluídas na proposta do Modelo de planejamento do processo de manufatura híbrida com abordagem preditiva.

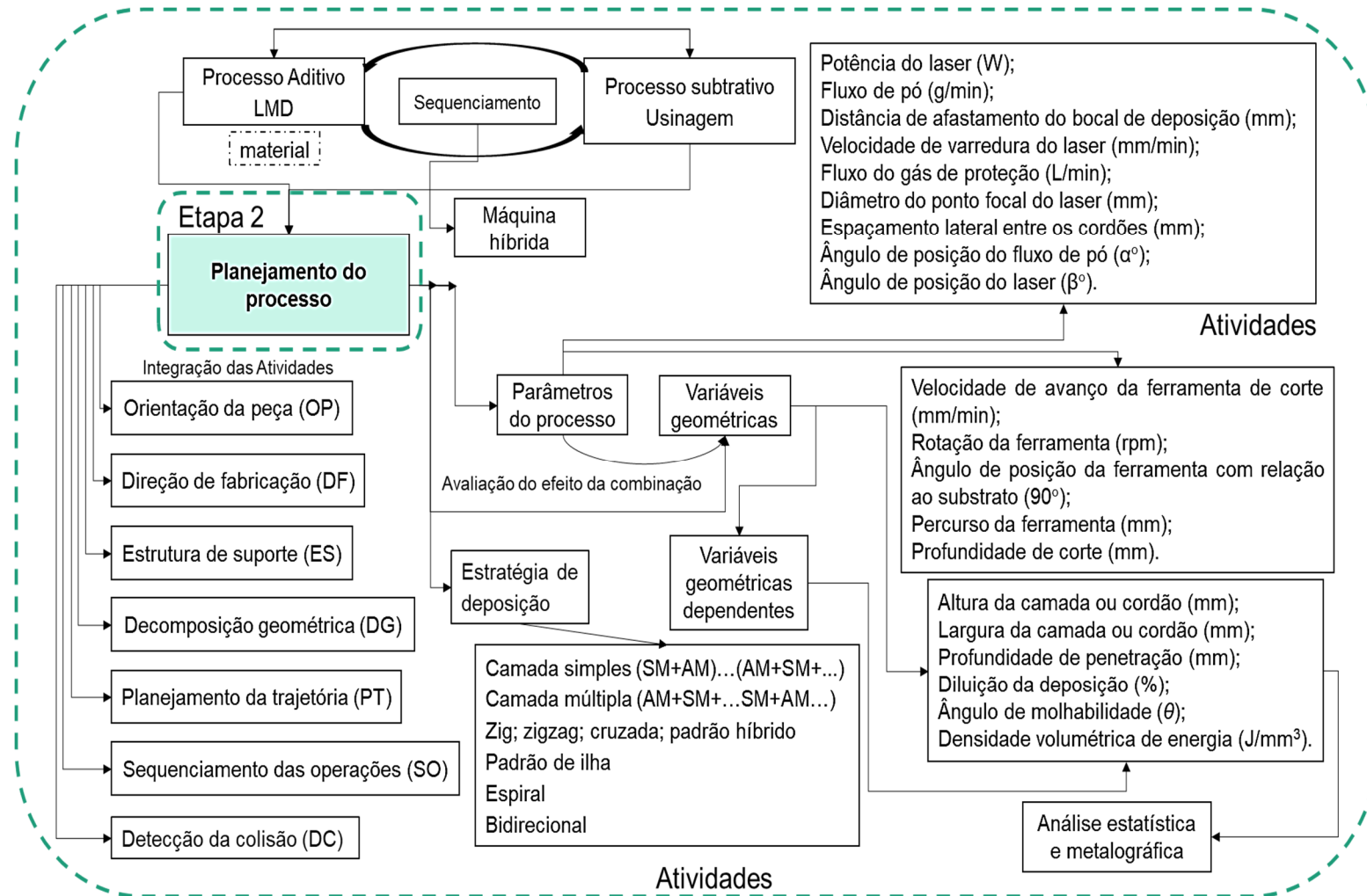


FIGURA 13. ETAPA 2 DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA. ATIVIDADES DA ETAPA 2 PLANEJAMENTO DO PROCESSO

A Etapa 3 é a Simulação multiparamétrica do processo, que será feita no software MATLAB R2011b no quadro de ferramentas *Fuzzy Toolbox*. Na Figura 13 se apresenta a configuração de um sistema de inferência *fuzzy* (FIS), que segundo Gomide *et al.* (1995), integra os seguintes subsistemas e atividades:

- Dados de entrada, que são conjuntos não-*fuzzy* de dados previamente definidos por especialistas ou resultante de medições ou observações;
- Módulo de fuzzificação, que transforma os dados não-*fuzzy* em conjuntos *fuzzy* (*fuzzy sets*) (Zadeh, 1965), de modo que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas de entrada e saída. Após isso, é possível estruturar as funções de pertinência tanto para as entradas, quanto para as saídas (variáveis simuladas), o que servirá para o desenvolvimento do processo de inferência;
- Módulo de Inferência *fuzzy*. Para a execução deste módulo, o motor de inferência comumente utilizado é o *Mamdani* (Mamdani e Assilian, 1975). Esta abordagem determina como as regras, baseadas nos condicionantes “Se” (antecedente) – “então” (consequente), previamente definidas, são ativadas para uma determinada situação e combinadas, e as processa junto aos dados *fuzzy* de entrada, inferindo as ações de controle. A correlação entre as variáveis e as funções de pertinência atreladas a elas segue uma configuração exponencial f^x para a definição da quantidade de regras, onde “ f ” representa a quantidade de funções de pertinência, e “ x ” a quantidade de variáveis.
- A interface de defuzzificação, que transforma a informação que está associada à variável linguística de saída em um valor numérico que pode ser avaliado (*crisp*). Esta interface requer a definição de um método de defuzzificação (Zimmermann, 2001; Saade e Diab, 2004), que permita obter uma saída defuzzificada e associá-la a uma resposta real relacionada ao sistema em estudo.

Como apresentado no Capítulo 2 na seção 2.5, a Lógica *Fuzzy* tem sido muito utilizada como método para simulação de processos. Nesta tese foi usado este método de simulação pela sua capacidade de fornecer soluções computacionais simples e com ampla assertividade; baixo custo computacional (tempo); possibilita lidar melhor com as incertezas do processo; e permite uma

configuração multiparamétrica ampla para simulação de processos que envolvem grande número de parâmetros e variáveis.

A Figura 14 apresenta a Etapa 3 do Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva. A Simulação multiparamétrica do processo é realizada com base num FIS, cujas atividades forma descritas anteriormente. A aplicação do método de Simulação multiparamétrica e cada um dos módulos da etapa pode ser encontrada no Capítulo 5 desta tese.

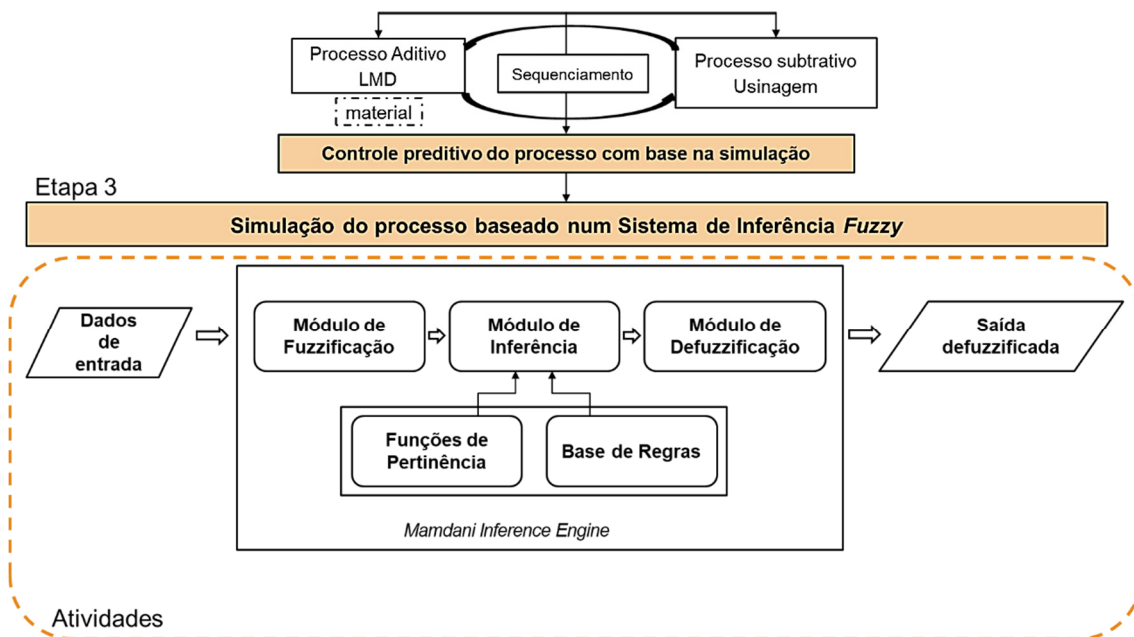


FIGURA 14. ETAPA 3 DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA. ATIVIDADES DA ETAPA 3 SIMULAÇÃO MULTIPARAMÉTRICA DO PROCESSO COM BASE NUM FIS

A Etapa 4, Execução do processo, se realiza conforme o planejamento prévio e após realizar a etapa de simulação, uma vez que esta garante com seus resultados que é possível executar o processo com o menor desvio aceitável.

A Etapa 5, análise metrológica, que é a última etapa, será realizada para verificar que a assertividade do planejamento e o processo de simulação estão adequados, assim como verificar se o processo se comporta estável. As medições se realizam após análises metalográficas, preparação química e polimento das amostras.

As análises estatísticas para correlacionar os efeitos dos parâmetros do processo nas variáveis de saída, são realizados por meio de análise de variância (ANOVA). A quantidade de corpos de prova será estabelecida em função da

quantidade de experimentos realizados e as repetições feitas para confiabilidade das análises estatísticas.

4.3.3 ETAPA DE DESENVOLVIMENTO

Partindo das definições e elementos definidos nas etapas anteriores se realiza a etapa de Desenvolvimento, como se apresenta a seguir.

4.3.3.1 Estruturação do Modelo de PPMH com Abordagem Preditiva

Com o intuito de estruturar um Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva que integre as sete atividades do processo assim como seus principais parâmetros e características de forma a garantir uma adequada estabilidade do processo, se procede à representação esquemática do modelo e suas conexões entre cada etapa e as atividades correspondentes para atender aos requisitos e critérios definidos (subseção 4.1.3 e 4.1.4 da seção 4.1 Ciclo de Relevância). Também se propõe nesta etapa a técnica de simulação multiparamétrica que garante a abordagem preditiva do modelo, sendo neste caso, a configuração de um Sistema de Inferência *Fuzzy* (FIS).

4.3.4 ETAPA DE AVALIAÇÃO

Com base nos resultados das etapas anteriores se realizada a etapa de Avaliação. Após a estruturação do modelo, esta etapa tem o objetivo de verificar por meio de sua experimentação, se o modelo atende os requisitos e critérios de aceitação definidos no Ciclo de Relevância.

4.3.4.1 Experimentação do modelo

Para demonstrar a funcionalidade do Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva, se procede à sua aplicação em dois casos experimentais. Estas aplicações buscam comprovar que a sequência das etapas do modelo, incluindo o código computacional desenvolvido para a etapa de Simulação multiparamétrica realmente respondem

ao objetivo geral desta tese, assim como a coerência nos resultados obtidos. Os resultados desta etapa são apresentados e discutidos no Capítulo 5 desta tese.

4.3.5 ETAPA DE FINALIZAÇÃO

Esta etapa visa finalizar o ciclo da DSR apresentando o resultado que é o Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva.

4.3.5.1 Apresentação do Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva

A Figura 15, apresenta o fluxograma que compõe o Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva estruturado após o cumprimento das etapas dos três ciclos do *Design Science Research*.

A proposta de Kulkarni *et al.* (2000) serviu como referência para identificar quais etapas (p. 4-5) e atividades deveriam ser inseridas no modelo proposto nesta tese, relacionadas ao processo aditivo (tópicos i a v, p.28-29), e quando integrado ao processo subtrativo (tópicos vi e vii, p.30) para configuração do processo de manufatura híbrida. Como já mencionado, estas etapas e atividades foram confirmadas e apoiadas pelos autores que desenvolveram modelos de PPMH conforme apresentado no Quadro 1 (seção 2.4 do Capítulo 2).

O modelo proposto integra as sete atividades em um único planejamento, assim como insere uma etapa de simulação multiparamétrica para garantia de um controle proativo do processo que garanta sua abordagem preditiva.

A aplicação do modelo inicia-se com a Etapa de Modelagem CAD, que implica o projeto do componente que será fabricado. Passa-se à Etapa de Planejamento do processo, conforme atividades definidas nas seções anteriores. Na Etapa de Simulação inclui-se uma atividade decisória a partir do resultado da simulação desta etapa. Se a simulação for precisa, se procede à Etapa de Execução do processo, caso contrário, se retorna à etapa anterior para correção. Após a Execução do processo conforme o Planejamento e Simulação, o modelo finaliza com o a Etapa de Controle metrológico das variáveis de saída do processo.

A saída de cada Etapa do Modelo representa a entrada da seguinte por meio da atividade de transferência de dados, que implica a transferência de dados da Modelagem CAD para o Planejamento do processo, dados de manufatura conforme o Planejamento para a Simulação multiparamétrica, dados da precisão da Simulação conforme o planejamento para a Manufatura, e por último se agrupam os dados do Controle para comparação com o modelo planejado. O fluxo de transferência de dados que retorna para a etapa de Planejamento, desde as etapas de Execução e Verificação da confiabilidade, ocorre para fins de alimentação de uma base de dados na etapa de planejamento para aumentar sua assertividade aprimorando a simulação e a própria execução do processo, caso seja replicado sob condições similares. Os conectores numerados de 1 a 4 indicam que em cada etapa se realizam as atividades referidas na subseção 4.3.2.2.

Reafirma-se que o escopo desta tese visa à proposição de um Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva, cuja proposta se sustenta pelos resultados apresentados no Capítulo 2 (seções 2.1 a 2.6) a partir das RSLs realizadas (metodologia descrita no Capítulo 3), e pelas características do modelo proposto a partir do desenvolvimento de todos os Ciclos da DSR (Capítulo 4), os que incluem: (i) As definições apresentadas nas subseções 4.1.1 a 4.1.4 da seção 4.1 Ciclo de Relevância; (ii) A seleção dos conceitos apresentados nas subseções 4.2.1 e 4.2.2 da seção 4.2 Ciclo de Rigor, como resultado da RSL₁, seções 2.1 e 2.2, e RSL₂, seções 2.3 e 2.4 do Capítulo 2, e; (iii) A estruturação das etapas das subseções 4.3.1 a 4.3.4 da seção 4.3 Ciclo de Projeto.

Ressalta-se que para a replicação ou aplicação do modelo proposto, conforme descrito na subseção 4.3.2.2, cada usuário deve ter capacitação sobre o processo a ser desenvolvido com conhecimentos mínimos sobre os materiais, a combinação dos parâmetros do processo mais adequada, e um escopo previamente definido para aplicação. O modelo fornece as etapas e a sequência em que estas devem ser desenvolvidas para o planejamento e execução efetiva do processo, cabendo a cada usuário escolher, organizar e ajustar as atividades pertinentes para desenvolver cada etapa. Quanto ao método de simulação, também pode ser selecionado dentre a gama existente destes, conforme revisão de literatura realizada nesta tese no Capítulo 2.

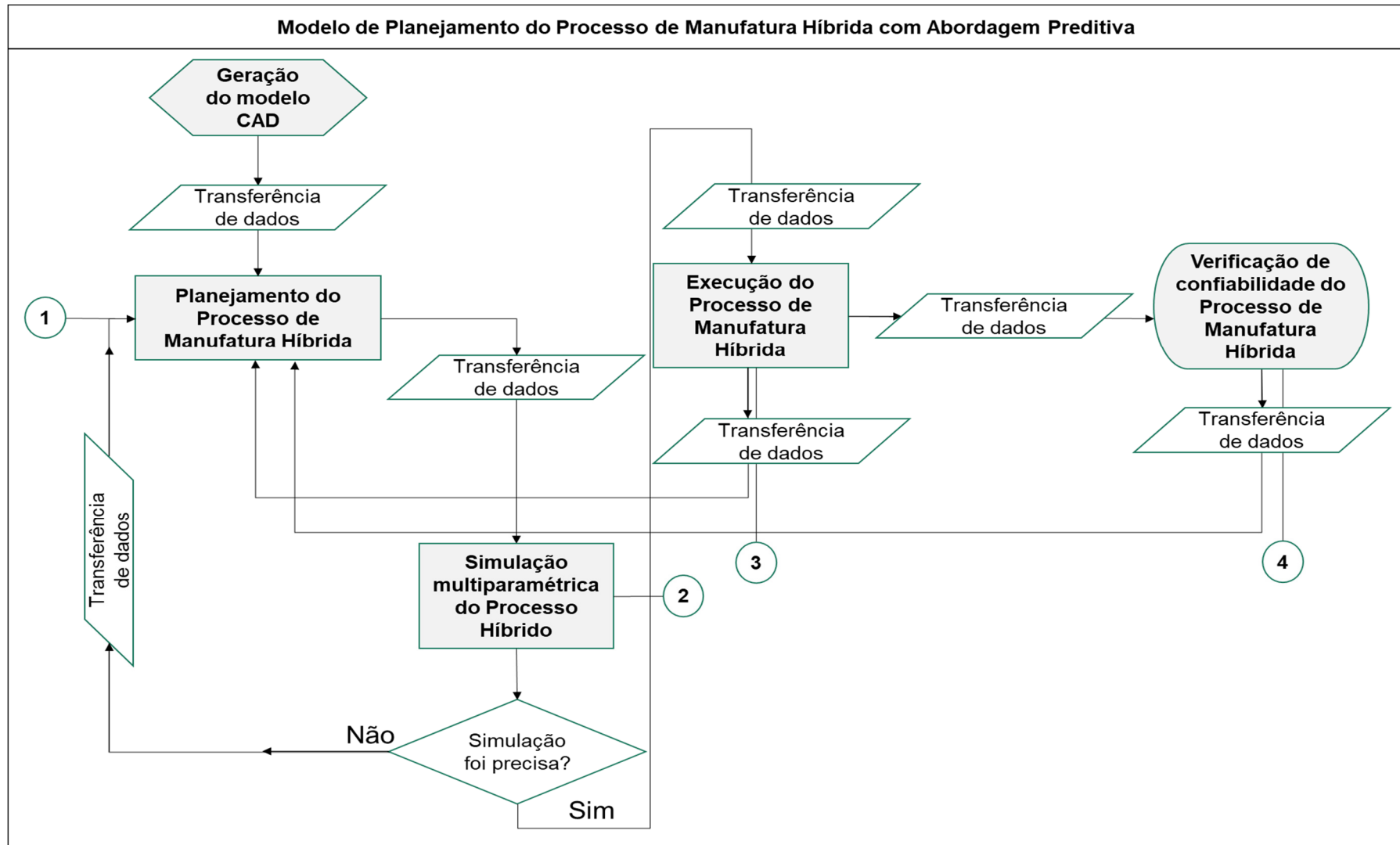


FIGURA 15. MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA

5 APLICAÇÕES DO MODELO DE PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA COM ABORDAGEM PREDITIVA

Neste capítulo são apresentadas as aplicações de ilustração do Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva proposto com o objetivo de demonstrar sua aplicabilidade em dois experimentos.

APLICAÇÃO 1. SIMULAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE CORDÕES ÚNICOS GERADOS POR MEIO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA VIA LMD E USINAGEM

Esta aplicação se baseia na simulação, por meio da inferência *fuzzy*, das características geométricas de cordões únicos gerados pelo processo de manufatura híbrida que integra a deposição a laser de aço AISI 316 e a usinagem. Pretende-se avaliar com esta aplicação a assertividade das etapas do modelo proposto e o método *fuzzy* preditivo seguindo as fases definidas na Etapa 3 da Figura 7.

ETAPA 1. PLANEJAMENTO DO PROCESSO

ATIVIDADE 1.1 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O DoE (*Design of Experiment*) permitiu integrar os parâmetros de entrada do processo híbrido e seus níveis de operação para comprovar experimentalmente como influenciam diretamente na geometria da deposição.

Foram realizadas análises qualitativas e quantitativas dos efeitos da variabilidade dos parâmetros de entrada do processo: potência do laser (PL), distância focal (DF), e fluxo de pó (FP) sobre as variáveis de saída avaliadas altura do cordão (Ac), largura do cordão (Lc), profundidade de penetração do cordão (Pc), razão Ac/Lc, diluição (d) e ângulo de molhabilidade (w_a). Outros parâmetros do processo subtrativo com níveis operacionais fixos foram empregados para garantia da planicidade do substrato em que foram depositados os cordões, sendo: velocidade de avanço da ferramenta de corte

(VC), rotação da ferramenta de corte (RF), percurso da ferramenta de corte (PF) e profundidade de corte (PC).

Uma análise fatorial simples foi realizada para determinar todas as combinações de parâmetros possíveis para melhorar o esforço experimental e avaliar seus efeitos de interação nas variáveis de saída analisadas Ac, Lc, Pc, razão Ac/Lc, d e wa. A combinação dos fatores (*f*) (parâmetros) e seus níveis operacionais (*x*) implicaram que 18 experimentos (corridas) foram realizados ($f^x = 3^2 \times 2^1 \times 1^1 \dots 1^1$). A ANOVA foi utilizada para determinar a correlação estatística e a influência dos parâmetros de entrada nas variáveis de saída.

Para cada corrida experimental (R1) foram realizadas outras duas repetições (R2 e R3), totalizando 54 experimentos (três para cada combinação de parâmetros), visando maximizar a confiabilidade da análise estatística para cada corrida e correlacionar com a modelagem *fuzzy* configurada. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de processo estudados e seus níveis de operação.

TABELA 1. PARÂMETROS DO PROCESSO HÍBRIDO E NÍVEIS OPERACIONAIS

Parâmetros do processo	Unidade	Níveis operacionais		
Potência do laser (PL)	W	225	250	275
Distância focal (DF)	mm	4.8	5.0	5.2
Fluxo de pó (FP)	g/s	9.40	-	13.35
Velocidade de varredura do laser (VL)	mm/min		300	
Saída do bocal do gás (NG)	L/min		5	
Gás de proteção (SG)	L/min		5	
Gás transportador (CG)	L/min		4	
Velocidade de avanço ferram. de corte (VC)	mm/min		700	
Rotação da ferramenta (RF)	rpm		2000	
Ângulo de posição ferram. de corte (AF)	°		90	
Percurso da ferramenta (PF)	mm		25	
Profundidade de corte (PC)	mm		1	

ATIVIDADE 1.2 - SISTEMA HÍBRIDO E CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS

Os experimentos foram conduzidos em uma máquina híbrida ROMI DCM 620-5X HYBRID de 5 eixos equipada com um cabeçote de deposição a laser AMBIT™ Ytterbium Fiber Laser com potência máxima de 500 W, com comprimento de onda de 1070 nm e 1 mm de diâmetro máximo. A máquina híbrida encontra-se nas instalações da Industria ROMI S.A na sede Matriz em Santa Bárbara D'Oeste, São Paulo Brasil. No Anexo 1 se apresenta a máquina

híbrida utilizada (incluindo o módulo dos cabeçotes de usinagem e laser e o módulo de fornecimento de pó).

A Figura 16 mostra a configuração do sistema híbrido e seus eixos operacionais, incluindo o princípio de operação do laser (retrátil), gás de proteção e alimentação de pó com relação à posição do substrato, e o cabeçote para usinagem (fixo).

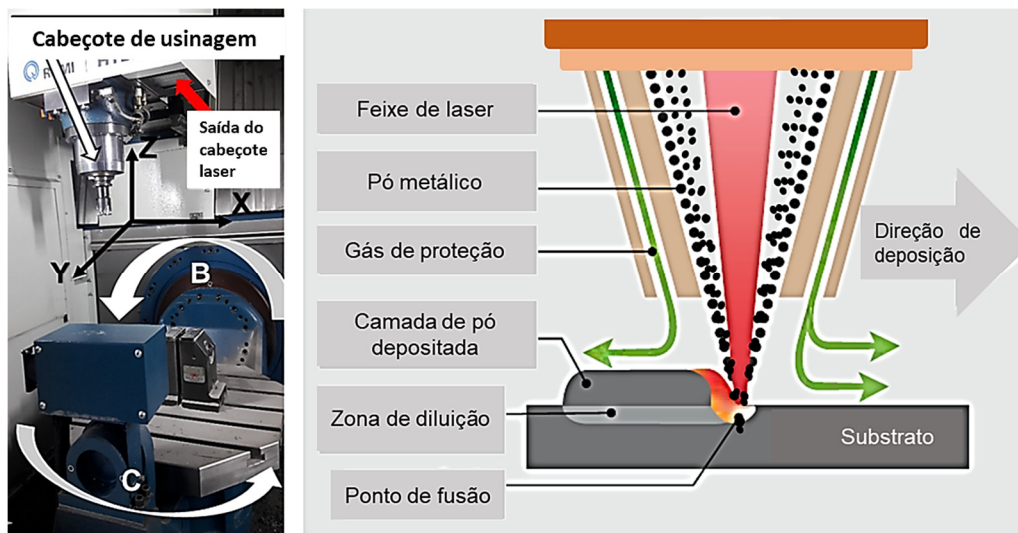


FIGURA 16. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO E PRINCÍPIO OPERACIONAL DO LASER. ADAPTADO DE ROMI (2017)

A dimensão das amostras inicialmente foi de $\varnothing 25 \times 10$ mm. O processo híbrido foi iniciado fresando os substratos na face superior (orientados perpendicularmente em relação à ferramenta de corte), retirando 1 mm de material para produzir uma superfície plana, logo após foi executado o processo de deposição do material metálico. Os substratos foram fixados no suporte embutido na mesa rotativa de dois eixos (Figura 16). As dimensões das amostras após o fresamento resultaram em $\varnothing 25 \times 9$ mm como dimensão final.

Para executar o processo aditivo, o feixe de laser foi focado no material substrato (AISI 316 SS) para gerar oito cordões únicos (B1 a B8) em 18 amostras, combinando os parâmetros do processo e seus diferentes níveis (Tabela 1). A direção de deposição seguiu um movimento unidirecional deslocando-se em padrão *Zig* e o pó utilizado também foi AISI 316 SS com granulometria de 44-106 μm . O comprimento de cada cordão foi de 10 mm e a distância entre os cordões foi de 2 mm.

O pó foi alimentado simultaneamente, por um bocal coaxial focado no ponto do laser com orientação de 90° com relação aos substratos, com gás argônio. O gás argônio serve como uma proteção do material depositado e o preserva da oxidação (ALAM *et al.*, 2018).

O procedimento foi repetido duas vezes (R2 e R3) para garantia da confiabilidade estatística nas medições.

ATIVIDADE 1.3 - ANÁLISE DA GEOMETRIA DA DEPOSIÇÃO

O trabalho metalográfico foi feito manualmente. Inclui o corte transversal das amostras, a preparação em reagentes químicos e o polimento das amostras. A medição da altura do cordão (A_c), largura do cordão (L_c) e profundidade de penetração do cordão (P_c) no substrato foi feita usando um microscópio óptico Nikon Optiphot. A lente (x100), com padrão de medição de 1 mm inserido foi usada.

As medições de A_c , L_c e P_c foram feitas em cada cordão das amostras seccionadas incluindo as duas repetições. Por exemplo, considerando a corrida 1 e duas repetições foram geradas 3 amostras. Cada amostra foi seccionada resultando em 6 metades, e cada cordão (8) de cada metade também foi medido. Portanto, a quantidade de medidas para uma variável de saída (ex. A_c) foi de 48x18 corridas, resultando em 864. Foi calculado um valor médio para cada variável de acordo com as condições de deposição (cada corrida), e as repetições, que serviram para caracterizar a geometria do cordão e comprovar o modelo *fuzzy* proposto.

As variáveis dependentes, razão A_c/L_c , diluição (d) e ângulo de molhabilidade (w_a) foram avaliadas conforme as Eq. 1 e Eq. 2 (p.21). No caso da razão A_c/L_c , nesta tese, espera-se um índice próximo de 0,5.

ATIVIDADE 1.4 - SIMULAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS POR MEIO DA CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY (FIS)

A configuração do FIS para prever as características geométricas da deposição, a saber, A_c , L_c e P_c é mostrada na Figura 17. Para prever as

variáveis de saída (Ac, Lc e Pc), um sistema *fuzzy* multiparamétrico diferente foi estruturado para cada uma delas.

A modelagem preditiva baseada na inferência *fuzzy* para predição de Ac, Lc e Pc foi realizada no *software* MATLAB R2011b por meio do módulo de inteligência artificial *Fuzzy Toolbox* embutido no próprio *software*. Além disso, gráficos de superfície 2D e 3D foram plotados para complementar a análise. A configuração do FIS seguiu cada uma das atividades definidas para a Etapa 3, na seção 4.3.2.2.

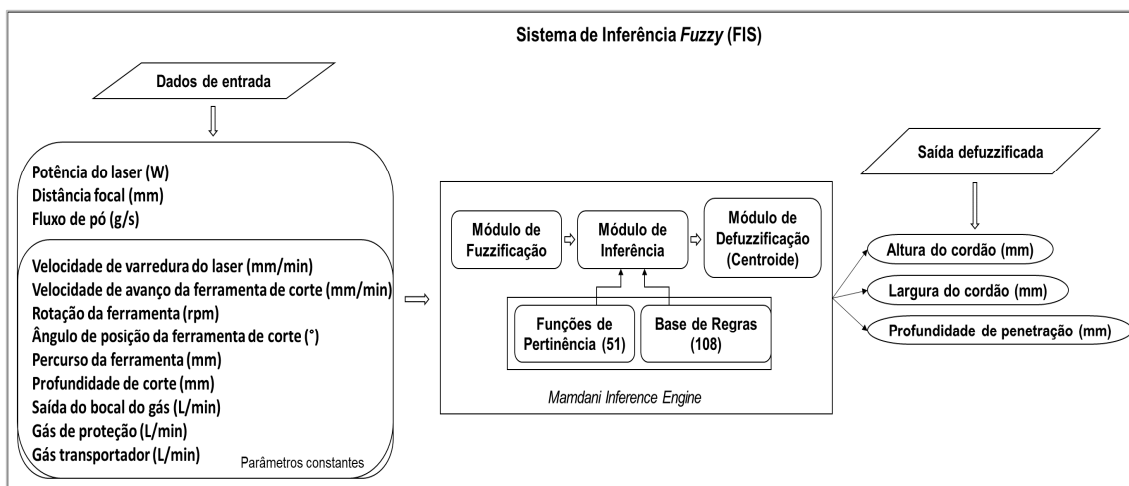


FIGURA 17. CONFIGURAÇÃO DO FIS 1

ATIVIDADE 1.4.1 - CONFIGURAÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Os dados de entrada são os parâmetros do processo e suas faixas de operação definidas anteriormente (Tabela 1). Especificamente foram considerados na configuração do FIS os parâmetros aditivos que apresentam níveis operacionais variáveis, e os parâmetros subtrativos (níveis operacionais fixos) que foram usados no início do processo híbrido conforme descrito na Etapa 1, Atividade 1.2, página 81.

O motor de inferência atua de forma simultânea o módulo de fuzzificação, o módulo de inferência e o módulo de defuzzificação, para gerar uma saída defuzzificada que é o valor numérico (*crisp*) da variável que está sendo simulada (Figura 17).

A Figura 18, Figura 19 e Figura 20 representam esquematicamente o motor de inferência *Mamdani* usado para simular cada variável, altura do cordão (Ac), largura do cordão (Lc) e profundidade de penetração do cordão no

substrato (Pc). Também apresentam os sete parâmetros de entrada do processo de manufatura híbrida usados para configurar o FIS preditivo, sendo: Potência do laser (PL), Distância focal (DF), Fluxo de pó (FP), Velocidade de avanço da ferramenta de corte (VC), Rotação da ferramenta de corte (RF), Percurso da ferramenta de corte (PF) e Profundidade de corte (PC).

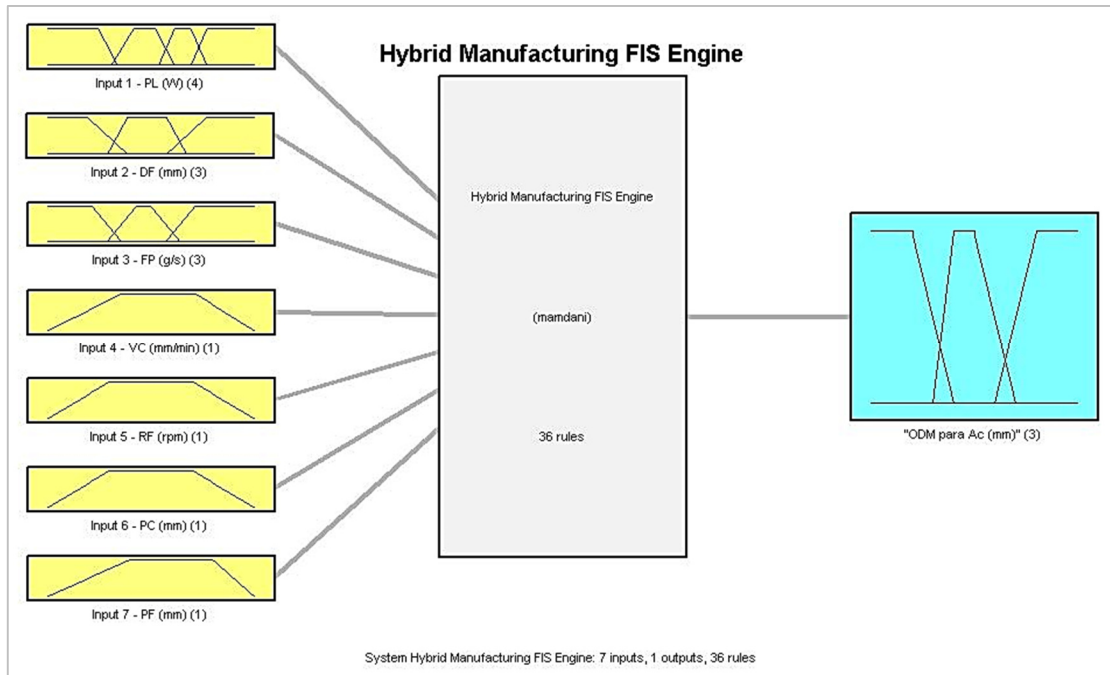


FIGURA 18. MOTOR DE INFERÊNCIA MAMDANI DO PROCESSO HÍBRIDO PARA A VARIÁVEL SIMULADA ALTURA DO CORDÃO (Ac)

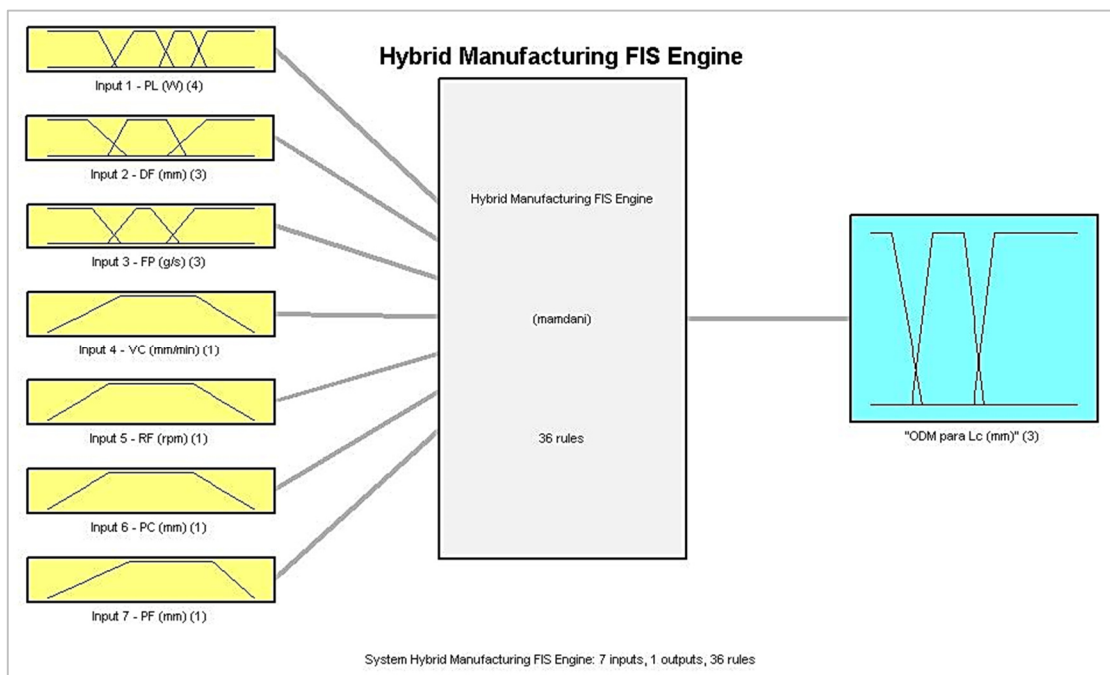


FIGURA 19. MOTOR DE INFERÊNCIA MAMDANI DO PROCESSO HÍBRIDO PARA A VARIÁVEL SIMULADA LARGURA DO CORDÃO (Lc)

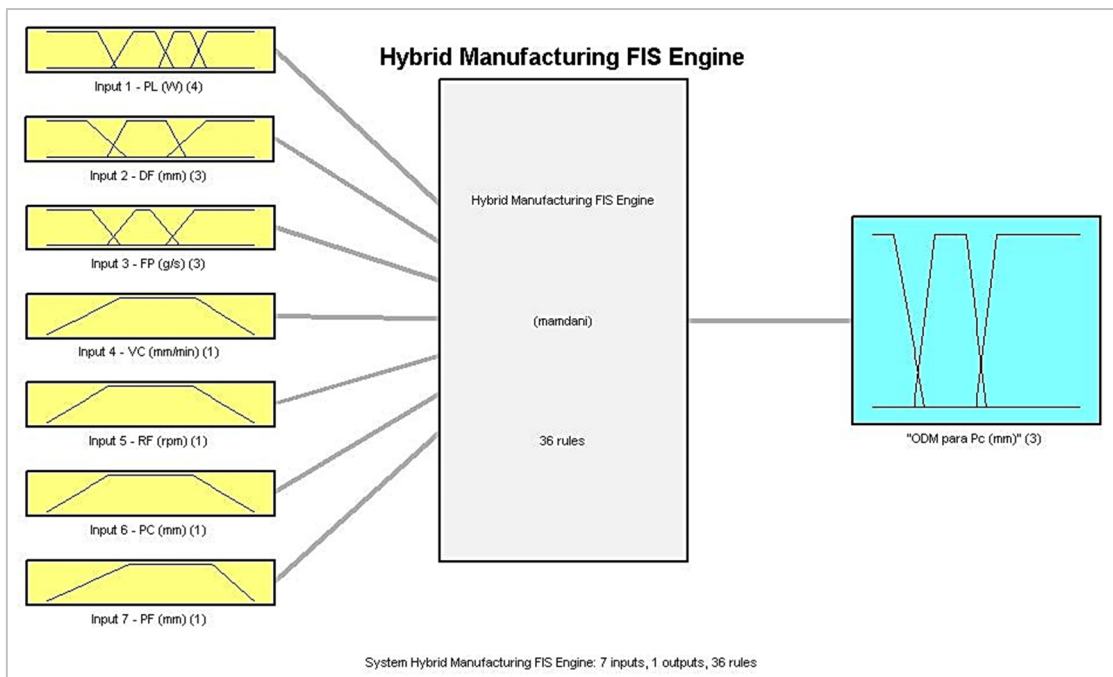


FIGURA 20. MOTOR DE INFERÊNCIA MAMDANI DO PROCESSO HÍBRIDO PARA A VARIÁVEL SIMULADA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DO CORDÃO (PC)

O módulo de fuzzificação (Figura 17) transforma os dados não *fuzzy* (dados de entrada) em conjuntos *fuzzy* para que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas de entrada e saída. A representação dos conjuntos *fuzzy*, variáveis linguísticas e funções de pertinência geradas para cada parâmetro de entrada são apresentados na Figura 21, e para as variáveis de saída simuladas na Figura 22.

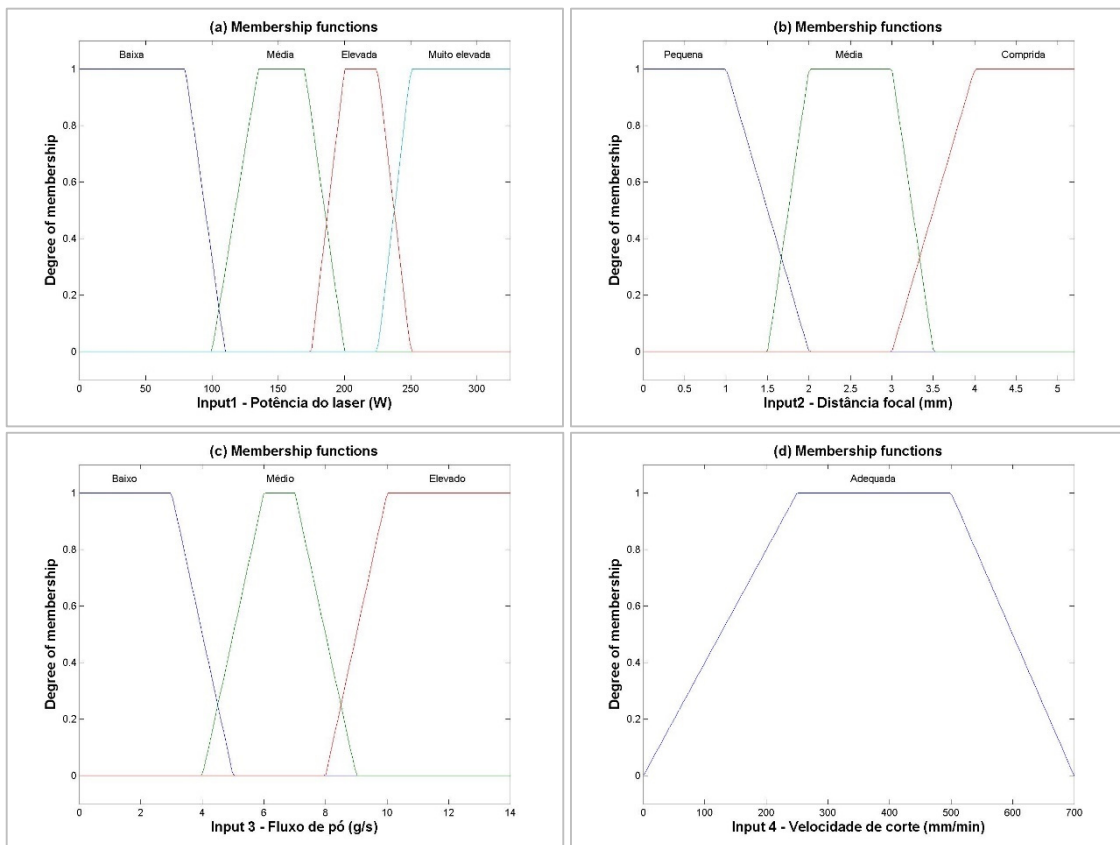
Na Figura 21 se apresentam as funções de pertinência trapezoidais que definem os conjuntos *fuzzy* para cada parâmetro de entrada do processo híbrido, (a) potência do laser, (b) distância focal, (c) fluxo de pó, (d) velocidade de avanço da ferramenta de corte, (e) rotação da ferramenta de corte, (f) profundidade de corte e, (g) percurso da ferramenta de corte. Um total de 51 funções foi gerado, para cada interação dos parâmetros de entrada com as variáveis de saída (Ac, Lc e Pc). As funções de pertinência configuradas nesta aplicação foram estruturadas no *Toolbox* do Matlab® *Membership Functions Editor*, requerendo-se menor complexidade para realizar sua configuração.

Com relação à variável linguística de entrada “potência do laser” foram definidas quatro funções de pertinência de entrada, que foram classificadas em baixa, média, elevada e muito elevada, e seus conjuntos *fuzzy* de entrada de acordo com a faixa de operação do parâmetro. Com relação às variáveis

linguísticas de entrada “distância focal” e “fluxo de pó”, três funções de pertinência foram definidas e classificadas em pequena, média e comprida, e, baixo, médio e elevado, respectivamente, e seus conjuntos *fuzzy* de entrada também definidos.

Com relação às variáveis linguísticas de entrada “velocidade de avanço da ferramenta de corte”, “rotação da ferramenta de corte”, “profundidade de corte” e “percurso da ferramenta”, para cada uma, foi definida uma função de pertinência sendo classificada em adequada conforme corresponde, e seu conjunto *fuzzy* de entrada também definido.

Os limites das funções de pertinência correspondentes aos parâmetros de entrada do processo híbrido (Figura 18, Figura 19 e Figura 20) foram definidos seguindo os níveis operacionais apresentados na Tabela 1.



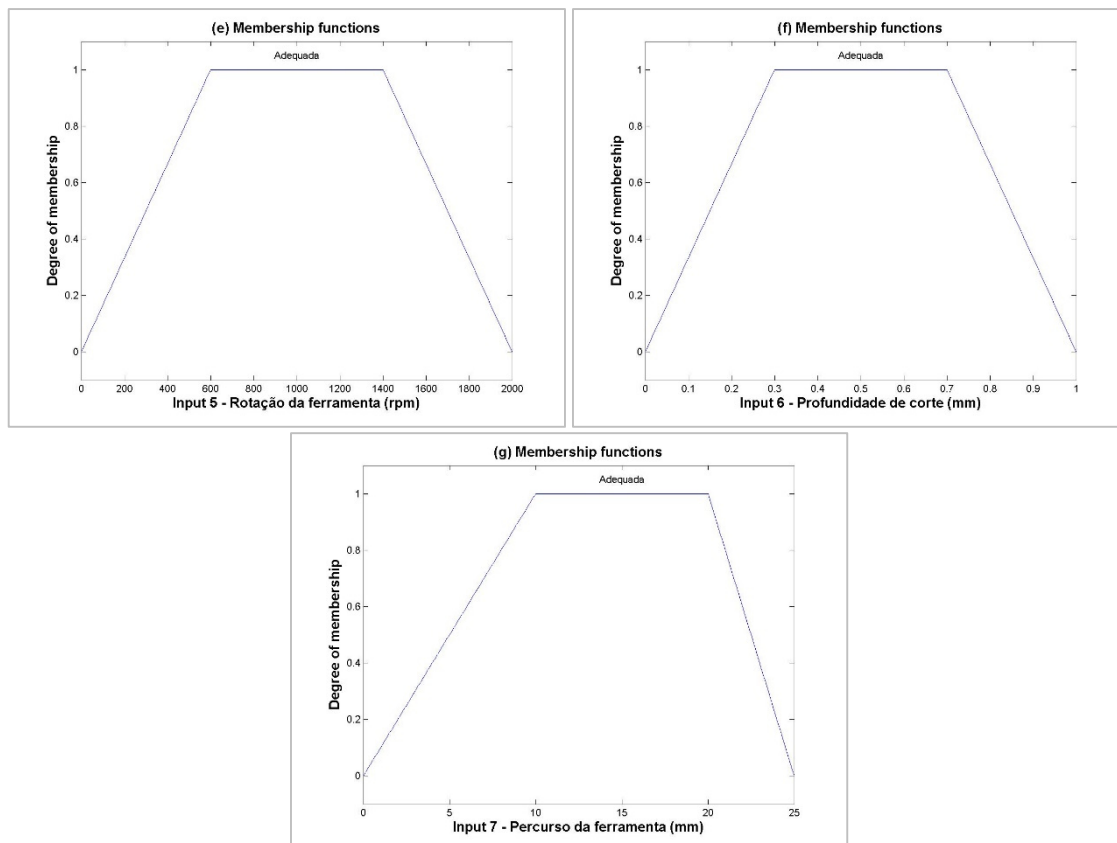


FIGURA 21. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E CONJUNTOS FUZZY PARA CADA PARÂMETRO DE ENTRADA DO PROCESSO HÍBRIDO, (A) POTÊNCIA DO LASER, (B) DISTÂNCIA FOCAL, (C) FLUXO DE PÓ, (D) VELOCIDADE DE CORTE, (E) ROTAÇÃO DA FERRAMENTA, (F) PROFUNDIDADE DE CORTE, (G) PERCURSO DA FERRAMENTA

Na Figura 22 se apresentam as funções de pertinência trapezoidais que definem os conjuntos *fuzzy* para as variáveis de saída. Para cada variável linguística de saída (Ac, Lc e Pc) três funções de pertinência e seus conjuntos *fuzzy* de saída foram definidos como baixa, média e elevada/adequada, respectivamente. Os limites das funções de pertinência correspondentes às variáveis de saída (Figura 22) foram definidos seguindo a geometria esperada considerada adequada, que foi definida na modelagem CAD realizada no painel de operação do sistema híbrido.

A partir dos resultados das variáveis simuladas, se calcularam os valores das variáveis dependentes índice Ac/Lc, diluição (d) e ângulo de molhabilidade (wa), conforme definido anteriormente na Atividade 1.3 da Etapa 1, desta aplicação.

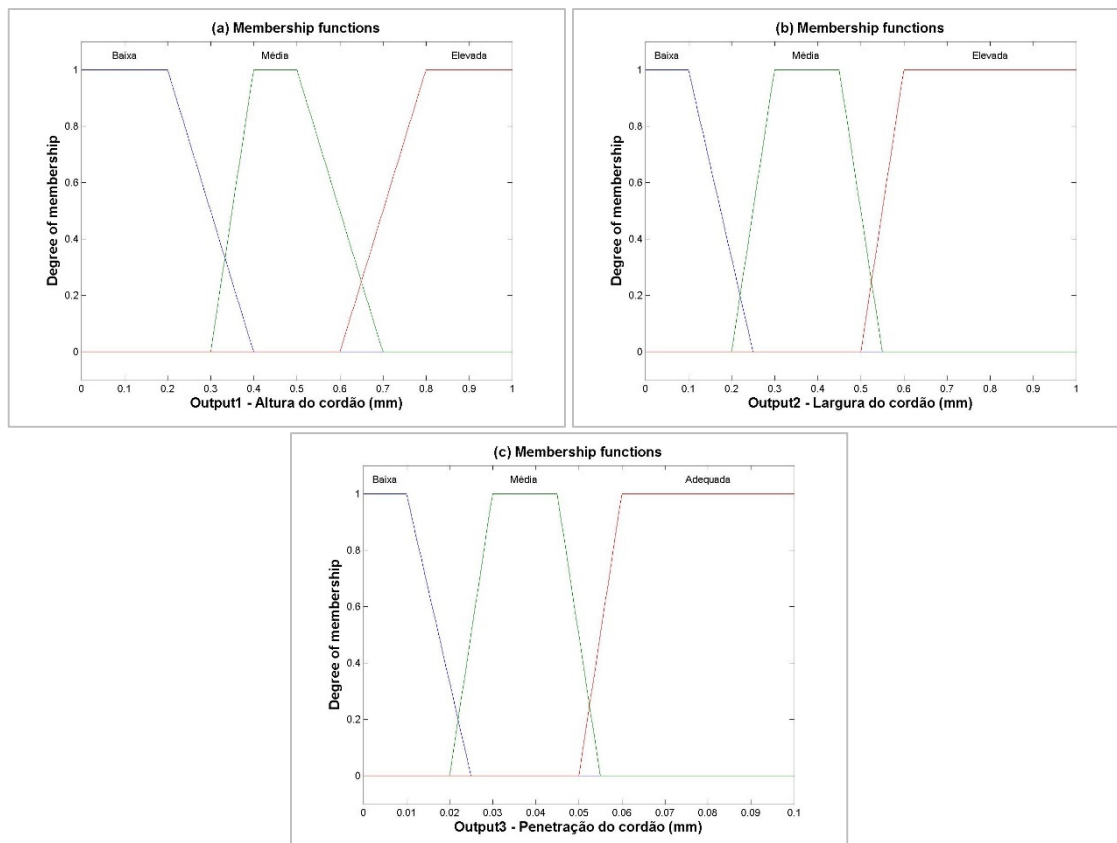


FIGURA 22. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E CONJUNTOS *FUZZY* PARA CADA VARIÁVEL SIMULADA, (A) ALTURA DO CORDÃO, (B) LARGURA DO CORDÃO, (C) PENETRAÇÃO DO CORDÃO

A base de regras (Figura 17) estabelecida seguiu a sequência “*SE-ENTÃO*” para cada condição de parâmetro de entrada (antecedente) e cada variável de saída (consequente). Um total de 108 regras foram definidas para o modelo preditivo *fuzzy* que analisou as variáveis de saída (Ac, Lc e Pc). Para cada análise (variável simulada), 36 regras foram configuradas para delimitar a base de regras seguindo as restrições “*SE-ENTÃO*” (por exemplo, *SE* a potência do laser for 'média' e a distância focal for 'média' e o fluxo de pó for 'elevado' *ENTÃO* a altura de deposição é 'Elevada'). A correlação entre os parâmetros de entrada e suas funções de pertinência segue uma configuração exponencial m^n para definir o número de regras, em que, para cada parâmetro “ n ”, “ m ” representa a quantidade de funções de pertinência.

A Figura 23 apresenta a base de regras para cada variável de saída simulada que interage com os parâmetros de entrada do processo híbrido (Figura 18, Figura 19 e Figura 20). As primeiras sete colunas de cada base de regras representam os conjuntos *fuzzy* de cada parâmetro de entrada do

processo híbrido representados nas funções de pertinência de entrada (Figura 21). A oitava coluna representa o conjunto *fuzzy* da variável de saída segundo cada função de pertinência de saída (Figura 22). As últimas duas colunas são condicionantes das regras conforme a configuração do motor de inferência definido.

A - Base de Regras para a variável simulada Altura do cordão (Ac)	B - Base de Regras para a variável simulada Largura do cordão (Lc)	C - Base de Regras para a variável simulada Penetração do cordão (Pc)
1 1 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 1 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 1 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1
1 1 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 1 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 1 2 1 1 1 1, 1 (1) : 1
1 1 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 1 3 1 1 1 1, 1 (1) : 1	1 1 3 1 1 1 1, 1 (1) : 1
1 2 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1	1 2 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1	1 2 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1
1 2 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 2 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 2 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1
1 2 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 2 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 2 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1
1 3 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1	1 3 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1	1 3 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1
1 3 2 1 1 1 1, 1 (1) : 1	1 3 2 1 1 1 1, 1 (1) : 1	1 3 2 1 1 1 1, 1 (1) : 1
1 3 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 3 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	1 3 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1
2 1 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 1 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 1 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1
2 1 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 1 2 1 1 1 1, 1 (1) : 1	2 1 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1
2 1 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 1 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1	2 1 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1
2 2 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 2 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1	2 2 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1
2 2 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 2 2 1 1 1 1, 1 (1) : 1	2 2 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1
2 2 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1	2 2 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 2 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1
2 3 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 3 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1	2 3 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1
2 3 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1	2 3 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 3 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1
2 3 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	2 3 3 1 1 1 1, 1 (1) : 1	2 3 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1
3 1 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1	3 1 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1	3 1 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1
3 1 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 1 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 1 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1
3 1 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 1 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1	3 1 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1
3 2 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 2 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1	3 2 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1
3 2 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1	3 2 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1	3 2 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1
3 2 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 2 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 2 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1
3 3 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 3 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 3 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1
3 3 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 3 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	3 3 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1
3 3 3 1 1 1 1, 1 (1) : 1	3 3 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1	3 3 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1
4 1 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1	4 1 1 1 1 1 1, 1 (1) : 1	4 1 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1
4 1 2 1 1 1 1, 2 (1) : 1	4 1 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 1 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1
4 1 3 1 1 1 1, 2 (1) : 1	4 1 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 1 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1
4 2 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	4 2 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 2 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1
4 2 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 2 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 2 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1
4 2 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 2 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 2 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1
4 3 1 1 1 1 1, 2 (1) : 1	4 3 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 3 1 1 1 1 1, 3 (1) : 1
4 3 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 3 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 3 2 1 1 1 1, 3 (1) : 1
4 3 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 3 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1	4 3 3 1 1 1 1, 3 (1) : 1

FIGURA 23. BASE DE REGRAS PARA CADA VARIÁVEL DE SAÍDA SIMULADA, (A) ALTURA DO CORDÃO, (B) LARGURA DO CORDÃO, (C) PENETRAÇÃO DO CORDÃO

O módulo de inferência *fuzzy* (Figura 17) foi executado utilizando o método *Mamdani* (Mamdani e Assilian 1975), que realiza um “*raciocínio fuzzy*”, a partir das regras definidas para gerar um valor *fuzzy*. Na última etapa do sistema, o módulo de *defuzzificação* (Figura 17) permite converter a saída *fuzzy* em uma saída mensurável (*crisp*). O MATLAB oferece a possibilidade de escolher o método de defuzzificação, que facilita o processamento computacional.

O método de defuzzificação utilizado nesta simulação foi o chamado método do centro de gravidade (COG), seguindo a Eq. 5, que retorna como saída mensurável o valor do centro da área da função de pertinência inferida da variável simulada:

$$y_0 = \frac{\sum y \mu_x(y)}{\sum \mu_x(y)}; \quad (5)$$

em que, y_0 é a saída defuzzificada das variáveis de saída previstas; y é o valor central da variável nas regiões *fuzzy* e $\mu_x(y)$ as funções de pertinência agregadas.

Nesta tese, os valores preditos pelo FIS para altura do cordão (Ac), largura do cordão (Lc) e profundidade de penetração (Pc), para cada condição de deposição estudada, foram chamados de “medida defuzzificada de saída” (ODM - *output defuzzified measure*) e logo comparados com os resultados da análise experimental. Por último foram gerados gráficos 3D que representam a interação entre os parâmetros do processo híbrido com maior relação de dependência com as variáveis de saída simuladas.

ATIVIDADE 1.4.2 - EXECUÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

SIMULAÇÃO DA ALTURA DO CORDÃO (Ac)

A Figura 24 apresenta o *toolbox* do visualizador de regras do motor de inferência do processo de manufatura híbrida que simula a altura do cordão (Ac). Este editor de regras é usado para determinar cada saída esperada de Ac de acordo com cada condição experimental realizada. As sete colunas da esquerda para a direita mostram os sete parâmetros de entrada do processo híbrido e a última coluna indica o ODM da variável simulada altura do cordão (Ac). A linha vermelha central em cada parâmetro de entrada é o “parametrizador” por meio do qual é possível selecionar o valor de cada condição experimental, resultando no valor simulado da variável de saída Ac.

A Figura 25 mostra os mapas 3D da ODM para Ac a partir da interação dos parâmetros de entrada com faixas operacionais variáveis (Tabela 1), cuja interação e efeito nas variáveis geométricas simuladas pode ser avaliado. A região com valor máximo previsto para as variáveis de saída avaliadas é representada com a superfície colorida mais forte.

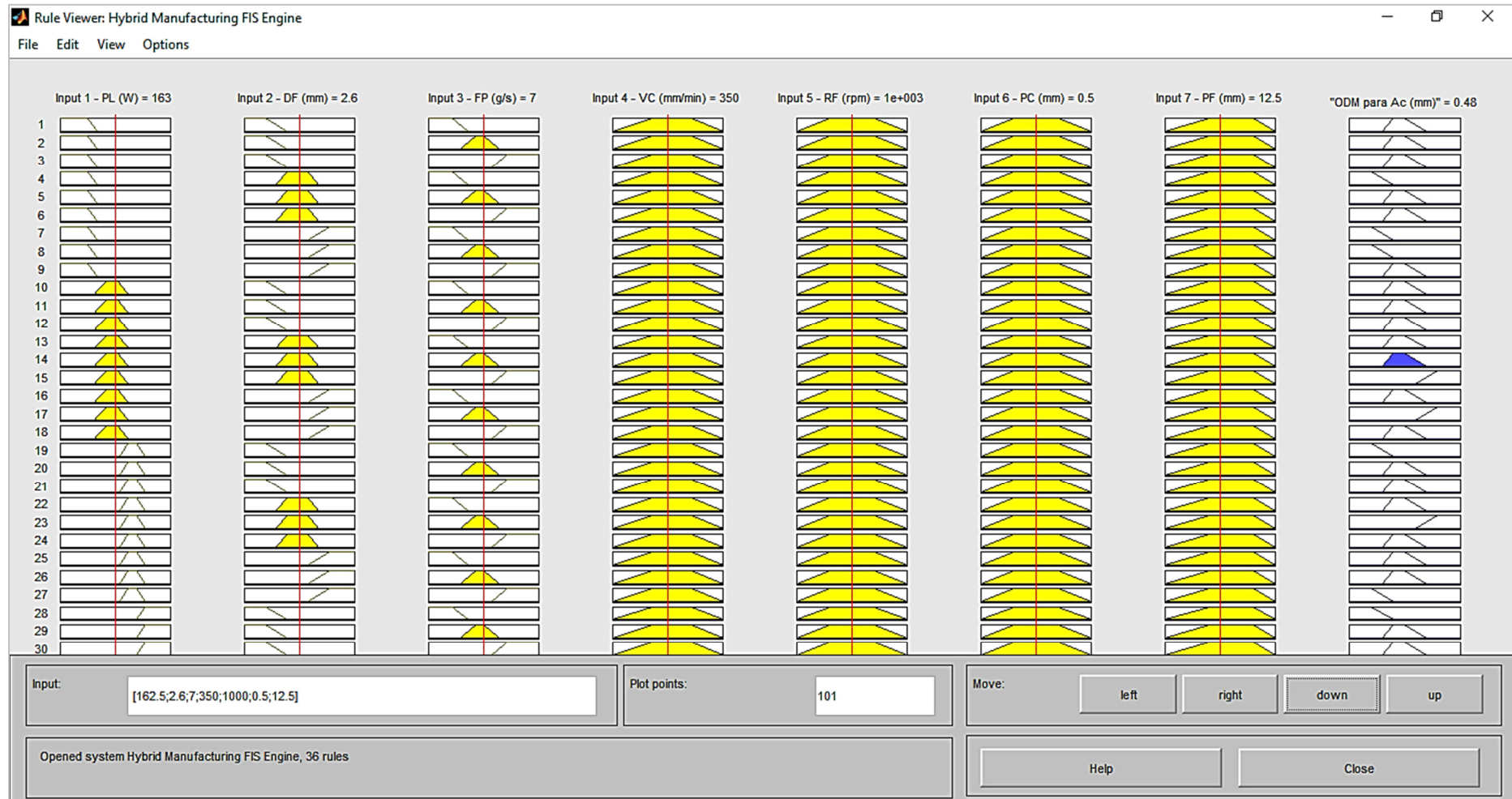


FIGURA 24. VISUALIZADOR DE REGRAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA PARA A VARIÁVEL SIMULADA Ac

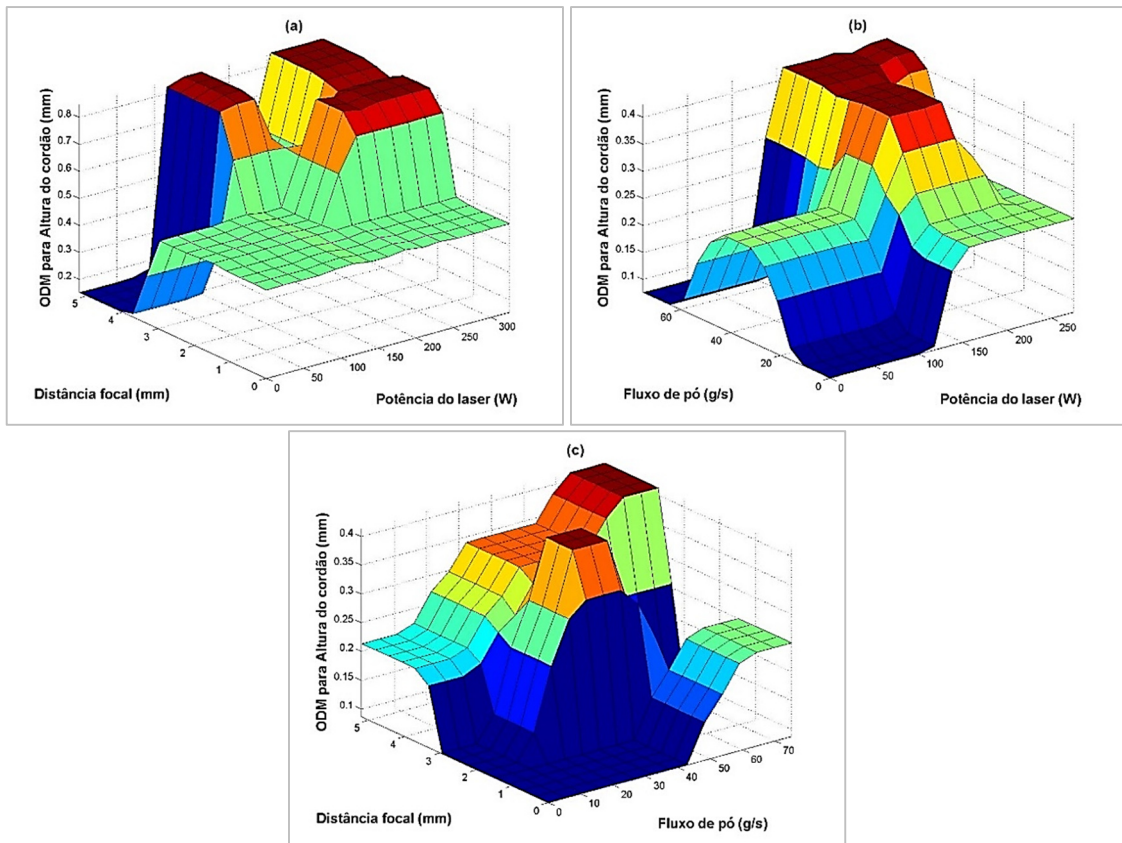


FIGURA 25. MAPAS 3D DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA COM FAIXAS OPERACIONAIS VARIÁVEIS E A VARIÁVEL SIMULADA AC

SIMULAÇÃO DA LARGURA DO CORDÃO (Lc)

A Figura 26 apresenta o *toolbox* do visualizador de regras do motor de inferência do processo de manufatura híbrida que simula a largura do cordão (Lc). Este editor de regras é usado para determinar cada saída esperada de Lc de acordo com cada condição experimental realizada. As sete colunas da esquerda para a direita mostram os sete parâmetros de entrada do processo híbrido e a última coluna indica o ODM da variável simulada largura do cordão (Lc). A linha vermelha central em cada parâmetro de entrada é o “parametrizador” por meio do qual é possível selecionar o valor de cada condição experimental, resultando no valor simulado da variável de saída Lc.

A Figura 27 mostra os mapas 3D da ODM para Lc a partir da interação dos parâmetros de entrada com faixas operacionais variáveis (Tabela 1), cuja interação e efeito nas variáveis geométricas simuladas pode ser avaliado. A região com valor máximo previsto para as variáveis de saída avaliadas é representada com a superfície colorida mais forte.



FIGURA 26. VISUALIZADOR DE REGRAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA PARA A VARIÁVEL SIMULADA Lc

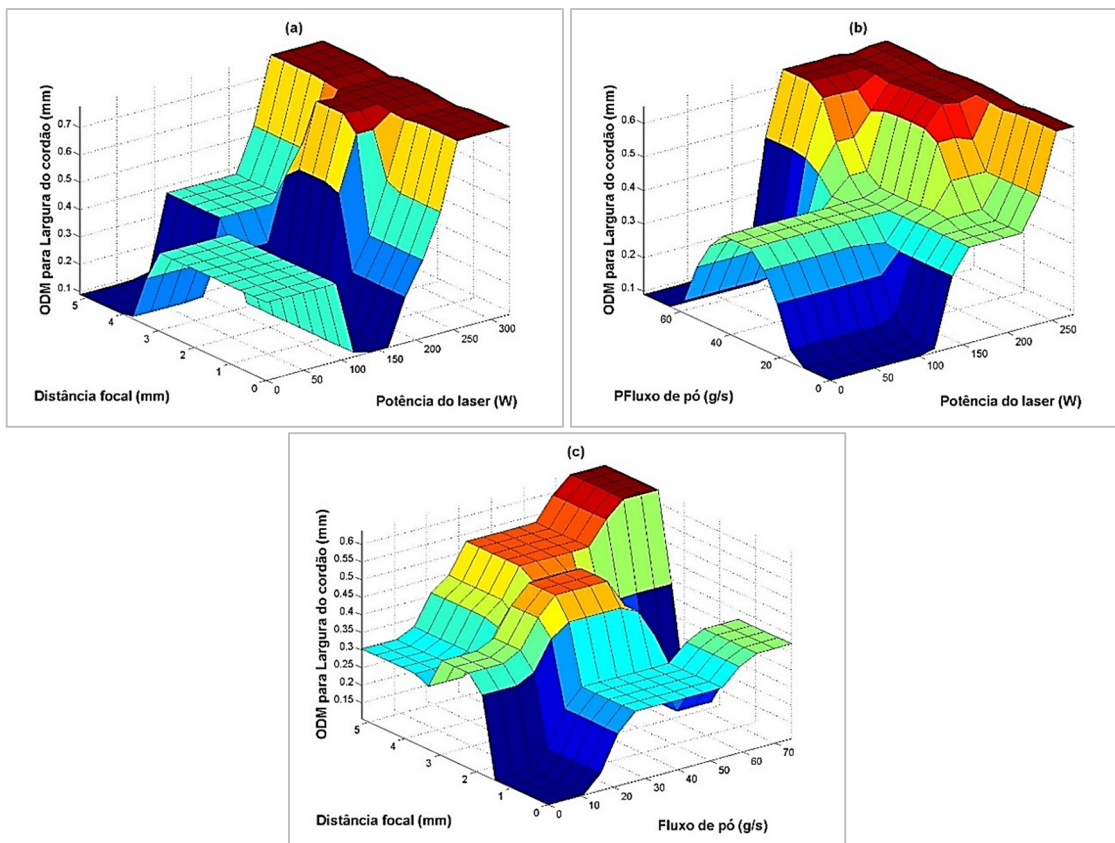


FIGURA 27. MAPAS 3D DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA COM FAIXAS OPERACIONAIS VARIÁVEIS E A VARIÁVEL SIMULADA Lc

SIMULAÇÃO DA PENETRAÇÃO DO CORDÃO (Pc)

A Figura 28 apresenta o *toolbox* do visualizador de regras do motor de inferência do processo de manufatura híbrida que simula a penetração do cordão (Pc). Este editor de regras é usado para determinar cada saída esperada de Pc de acordo com cada condição experimental realizada. As sete colunas da esquerda para a direita mostram os sete parâmetros de entrada do processo híbrido e a última coluna indica o ODM da variável simulada penetração do cordão (Pc). A linha vermelha central em cada parâmetro de entrada é o “parametrizador” por meio do qual é possível selecionar o valor de cada condição experimental, resultando no valor simulado da variável de saída Pc.

A Figura 29 mostra os mapas 3D da ODM para Lc a partir da interação dos parâmetros de entrada com faixas operacionais variáveis (Tabela 1), cuja interação e efeito nas variáveis geométricas simuladas pode ser avaliado. A região com valor máximo previsto para as variáveis de saída avaliadas é representada com a superfície colorida mais forte.

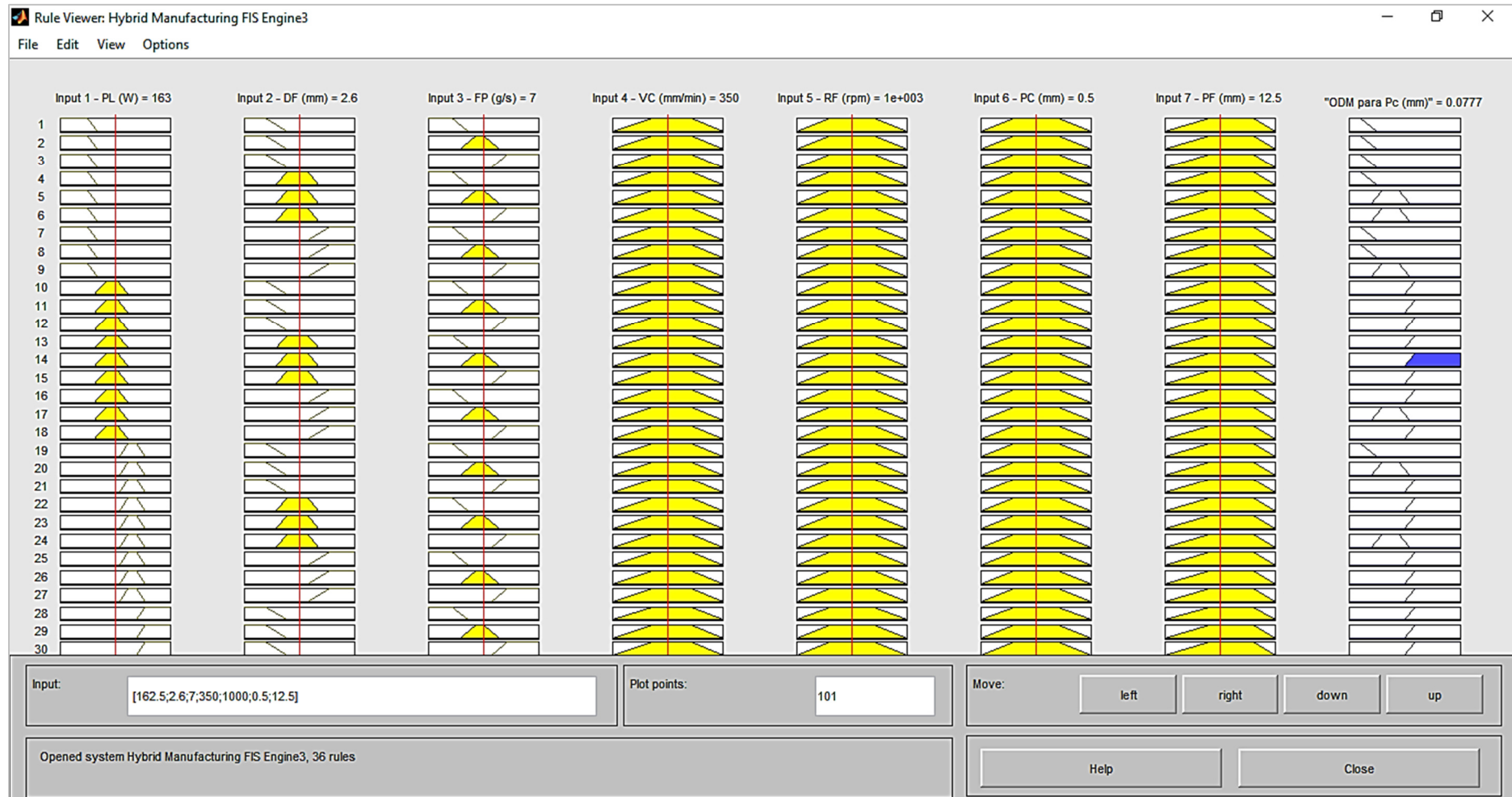


FIGURA 28. VISUALIZADOR DE REGRAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA PARA A VARIÁVEL SIMULADA Pc

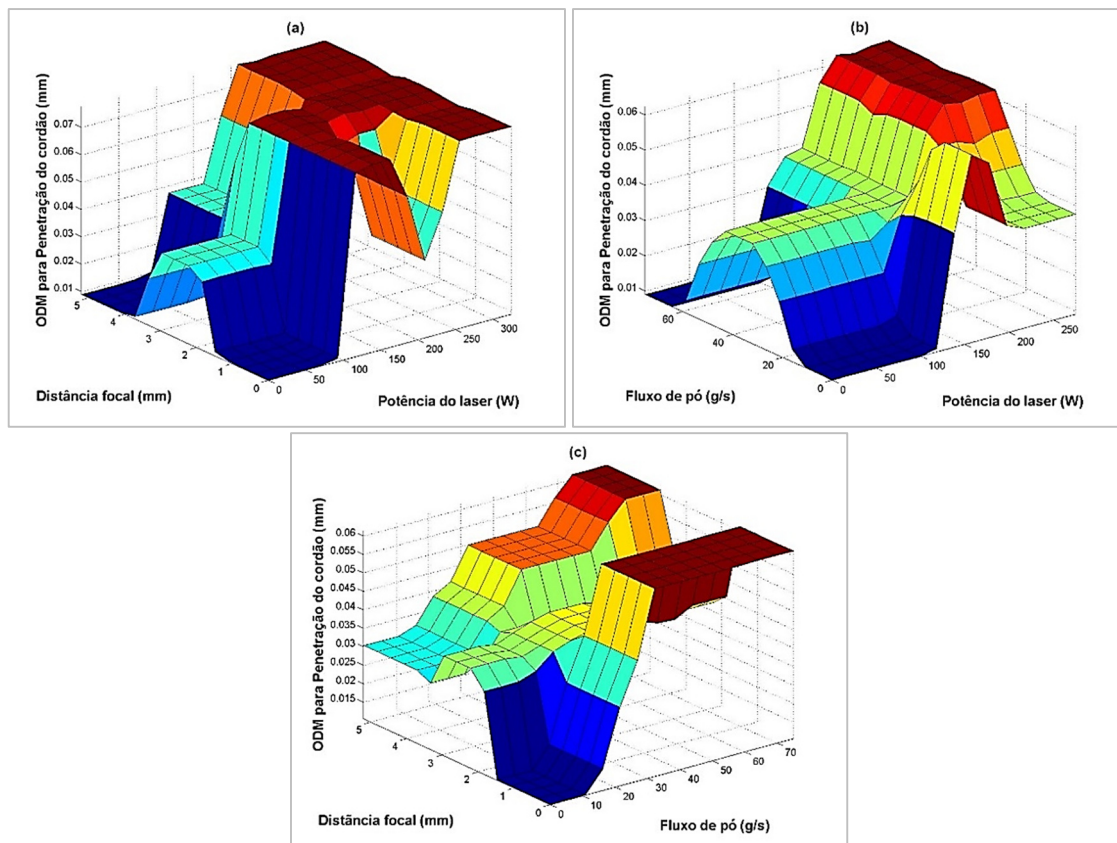


FIGURA 29. MAPAS 3D DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA COM FAIXAS OPERACIONAIS VARIÁVEIS E A VARIÁVEL SIMULADA PC

ETAPA 2. EXECUÇÃO DO PROCESSO

ATIVIDADE 2.1 - DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos e suas análises se realizaram seguindo todas as atividades da Etapa 1 Planejamento do processo, da Aplicação 1, p. 80 e conforme a Figura 15, p. 79. A Figura 30 exemplifica, (a) as características e dimensões das amostras (incluindo os cordões depositados), e (b) a seção transversal feita nas amostras e as variáveis geométricas avaliadas.

A Figura 31 apresenta a seção transversal de um cordão exemplificando as variáveis medidas em cada cordão de cada amostra (altura do cordão (A_c), largura do cordão (L_c), profundidade de penetração (P_c), ângulo de molhado (ω_a) e zona de diluição).

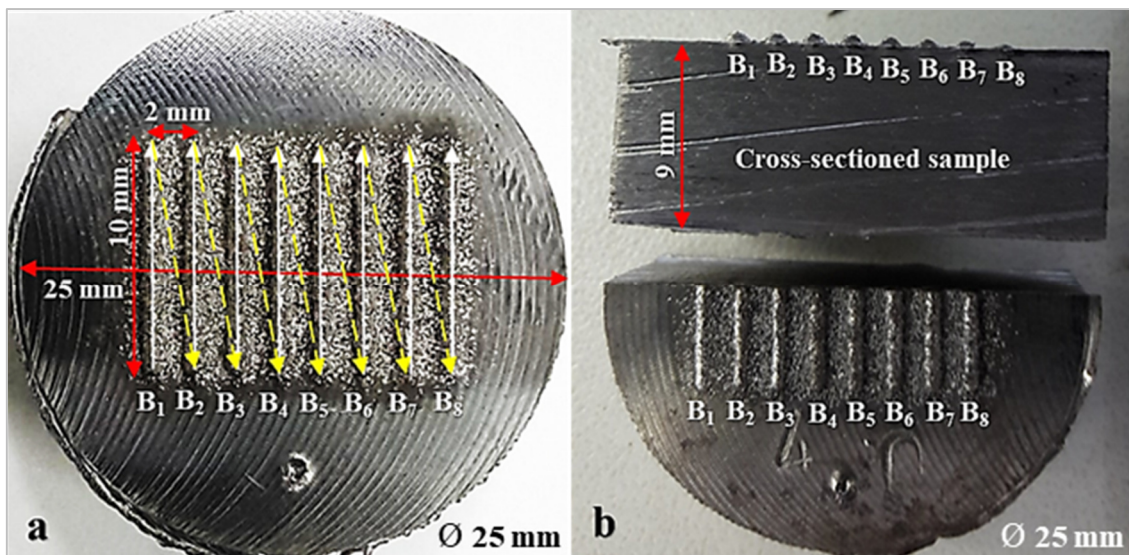


FIGURA 30. (A) DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA, (B) EXEMPLO DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA AMOSTRA

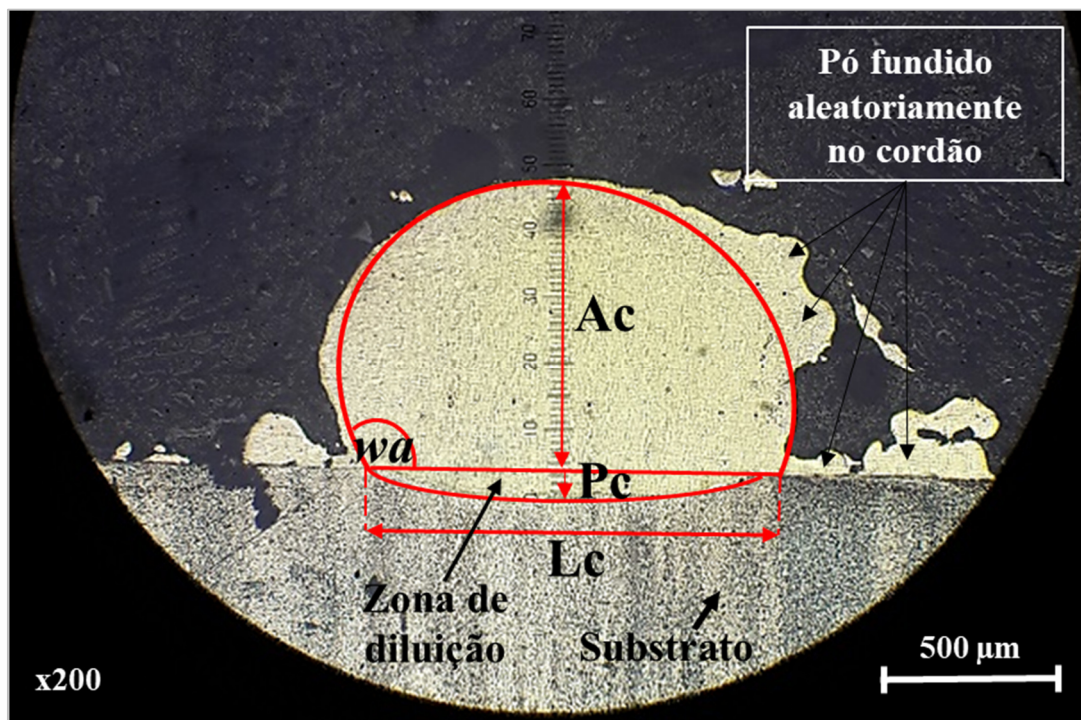


FIGURA 31. SECÇÃO TRANSVERSAL DE UM CORDÃO DE UMA AMOSTRA EXEMPLIFICANDO A ALTURA DO CORDÃO (Ac), LARGURA DO CORDÃO (Lc), PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO (Pc), ÂNGULO DE MOLHADO (wa) E ZONA DE DILUIÇÃO

ETAPA 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

ATIVIDADE 3.1 – ANÁLISE DO EFEITO DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO NA GEOMETRIA DE DEPOSIÇÃO

A Tabela 2 resume os valores médios medidos para altura do cordão (A_c), largura do cordão (L_c), profundidade de penetração do cordão (P_c), razão altura do cordão/largura do cordão (A_c/L_c), diluição (d) e ângulo de molhado (w_a) para cada condição de deposição.

Pela avaliação de cada execução experimental pode-se notar na Tabela 2 que experimentos realizados com fluxo de pó igual a 13,35 g/s, a A_c e a L_c aumentam e a profundidade de penetração diminui. A diluição (d) indica a porcentagem de penetração do pó depositado no substrato, o comportamento variou de 8 % a 22 %. A maior porcentagem de d foi alcançada para $PL = 275$ W, 5 mm e 5,2 mm de distância focal (DF) e $FP = 9,40$ g/s. O maior w_a foi obtido no experimento 2 com valor de 35° para $PL = 225$ W, DF = 4,8 mm e $FP = 13,35$ g/s.

A maior altura foi observada com $PL = 275$ W, DF = 5 mm e $FP = 13,35$ g/s. A maior largura foi alcançada para $PL = 275$ W, DF = 4,8 mm e $FP = 13,35$ g/s. A profundidade de penetração do cordão (P_c) foi maior com $PL = 275$ W, DF = 5 mm e $FP = 9,40$ g/s. Os índices A_c/L_c foram medidos entre 0,337 e 0,698, variando aproximadamente 51 % e o valor do índice mais próximo de 0,5 foi alcançado no experimento 1, sendo 0,516.

TABELA 2. VALORES MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA ANALISADAS PARA CADA CONDIÇÃO EXPERIMENTAL

Exp.	PL (W)	DF (mm)	FP (g/s)	VC (mm/min)	RF (rpm)	PC (mm)	PF (mm)	Ac (mm)	Lc (mm)	Pc (mm)	Ac/Lc	d (%)	wa (°)
1	225	4,8	9.40	700	2000	1	25	0,266	0,516	0,054	0,516	17	27
2	225	4,8	13.35	700	2000	1	25	0,414	0,593	0,031	0,698	7	35
3	250	4,8	9.40	700	2000	1	25	0,259	0,603	0,039	0,430	13	23
4	250	4,8	13.35	700	2000	1	25	0,383	0,712	0,033	0,538	8	28
5	275	4,8	9.40	700	2000	1	25	0,260	0,662	0,064	0,393	20	21
6	275	4,8	13.35	700	2000	1	25	0,436	0,743	0,054	0,587	11	30
7	225	5	9.40	700	2000	1	25	0,199	0,551	0,048	0,361	19	20
8	225	5	13.35	700	2000	1	25	0,400	0,626	0,039	0,639	9	33
9	250	5	9.40	700	2000	1	25	0,253	0,613	0,056	0,413	18	22
10	250	5	13.35	700	2000	1	25	0,392	0,657	0,048	0,597	11	31
11	275	5	9.40	700	2000	1	25	0,248	0,679	0,069	0,365	22	20
12	275	5	13.35	700	2000	1	25	0,454	0,688	0,061	0,660	12	33
13	225	5,2	9.40	700	2000	1	25	0,244	0,528	0,050	0,462	17	25
14	225	5,2	13.35	700	2000	1	25	0,377	0,611	0,038	0,617	9	32
15	250	5,2	9.40	700	2000	1	25	0,215	0,606	0,059	0,355	22	20
16	250	5,2	13.35	700	2000	1	25	0,418	0,634	0,049	0,659	10	33
17	275	5,2	9.40	700	2000	1	25	0,231	0,686	0,067	0,337	22	19
18	275	5,2	13.35	700	2000	1	25	0,416	0,679	0,061	0,613	13	31

PL: potência do laser; DF: distância focal; FP: fluxo de pó (g/s); VC: velocidade de avanço da ferramenta de corte (mm/min); RF: rotação da ferramenta (rpm); PF: percurso da ferramenta de corte (mm); PC: profundidade de corte (mm)

INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS COM MAIOR SIGNIFICÂNCIA NAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS

Uma análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar quais parâmetros têm influência significativa no processo e nas variáveis avaliadas. Esta análise apenas se realizou com os parâmetros que apresentavam níveis operacionais variáveis (PL, DF e FP), conforme a Tabela 1. As Tabelas 3 a 8 apresentam esta análise. Valores de $P < 0,05$ indicam que o efeito do parâmetro nas variáveis de saída avaliadas é significativo a um nível de confiança de 95 %.

As Tabelas 3, 6, 7 e 8 mostram que o fluxo de pó parece ter maior influência na A_c , razão A_c/L_c , d e w_a . Para L_c e P_c , a potência do laser parece ter maior significância (Tabelas 4 e 5).

TABELA 3. ANOVA PARA A VARIÁVEL A_c

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>Error</i>	<i>df</i>	<i>Error</i>	<i>MS</i>	<i>Error</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>
Potência do laser (W)	0,0020	0,1292	2	15	0,0010	0,0086	0,1158	0,8909
Distância focal (mm)	0,0003	0,1309	2	15	0,0002	0,0087	0,0171	0,9830
Fluxo de pó (g/s)	0,1247	0,0065	1	16	0,1247	0,0004	307,0088	7,28e-12

TABELA 4. ANOVA PARA A VARIÁVEL L_c

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>Error</i>	<i>df</i>	<i>Error</i>	<i>MS</i>	<i>Error</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>
Potência do laser (W)	0,0311	0,0266	2	15	0,0156	0,0018	8,7570	0,0030
Distância focal (mm)	3,5e-05	0,0577	2	15	1,8e-05	0,0038	0,0046	0,9954
Fluxo de pó (g/s)	0,0098	0,0479	1	16	0,0098	0,0030	3,2881	0,0886

TABELA 5. ANOVA PARA A VARIÁVEL P_c

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>Error</i>	<i>df</i>	<i>Error</i>	<i>MS</i>	<i>Error</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>
Potência do laser (W)	0,0009	0,0014	2	15	0,0005	9,2e-05	4,9721	0,0221
Distância focal (mm)	0,0002	0,0020	2	15	0,0001	0,0001	0,9104	0,4235
Fluxo de pó (g/s)	0,0004	0,0018	1	16	0,0004	0,0001	3,8206	0,0683

TABELA 6. ANOVA PARA A_c/L_c

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>Error</i>	<i>df</i>	<i>Error</i>	<i>MS</i>	<i>Error</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>
Potência do laser (W)	0,0115	0,2504	2	15	0,0057	0,0167	0,3432	0,7149
Distância focal (mm)	0,0017	0,2602	2	15	0,0008	0,0174	0,0486	0,9527
Fluxo de pó (g/s)	0,2169	0,0449	1	16	0,2169	0,0028	77,2594	1,6e-07

TABELA 7. ANOVA PARA d

<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>Error</i>	<i>df</i>	<i>Error</i>	<i>MS</i>	<i>Error</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>
Potência do laser (W)	45,7777	412,666	2	15	22,8888	27,5111	0,8319	0,4543

Distância focal (mm)	28,7777	429,666	2	15	14,3888	28,6444	0,5023	0,6149
Fluxo de pó (g/s)	355,5555	102,888	1	16	355,5555	6,4305	55,2915	1,41e-06

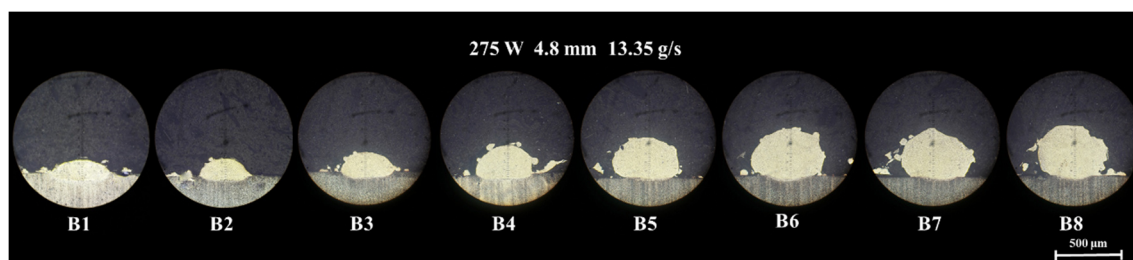
TABELA 8. ANOVA PARA WA

Source	SS	Error	df	Error	MS	Error	F	P-value
Potência do laser (W)	31	499,5	2	15	15,5	33,3	0,4654	0,6366
Distância focal (mm)	2,3333	528,1666	2	15	1,1666	35,2111	0,0331	0,9674
Fluxo de pó (g/s)	440,055	90,4444	1	16	440,0555	5,6527	77,8475	1,5e-07

A Figura 32 mostra oito cordões em corte transversal para ilustrar a tendência geral de variação na geometria depositada (deposição iniciando da esquerda para a direita).

Observou-se que em cada amostra, os três primeiros cordões apresentaram menor altura, porém com maior profundidade de penetração, representando aproximadamente 31 a 48 % de penetração com relação à altura. O inverso ocorre para os cinco cordões restantes, apresentando uma variação entre 8 e 13 %. Isso pode ser condicionado pelo nível de oscilação inicial do fluxo de pó, que sofre um *delay* de 12 s para se estabilizar antes de iniciar a deposição do material.

Os resultados analisados até aqui estão em concordância com os resultados apresentados nos trabalhos de Rao et al. (2009); Sun e Hao (2012); Graf et al. (2013); Calleja et al. (2014); Liu e Kovacevic (2014); Caiazza (2018); Yu et al. (2018), e Ansari et al. (2019).

**FIGURA 12. SEÇÃO TRANSVERSAL DE 8 CORDÕES DE UMA AMOSTRA**

A Figura 33 ilustra os valores médios de A_c , L_c e P_c , e a Figura 34, os valores médios da razão A_c/L_c , diluição (d) e ângulo de molhado (w_a), para cada interação dos parâmetros de entrada do processo híbrido, especificamente os parâmetros do processo aditivo PL (W) e FP (g/s), que são dois dos parâmetros

com faixas operacionais variáveis (Tabela 1) e que mais influenciam na geometria da deposição como evidenciado na Tabela 3 à Tabela 8.

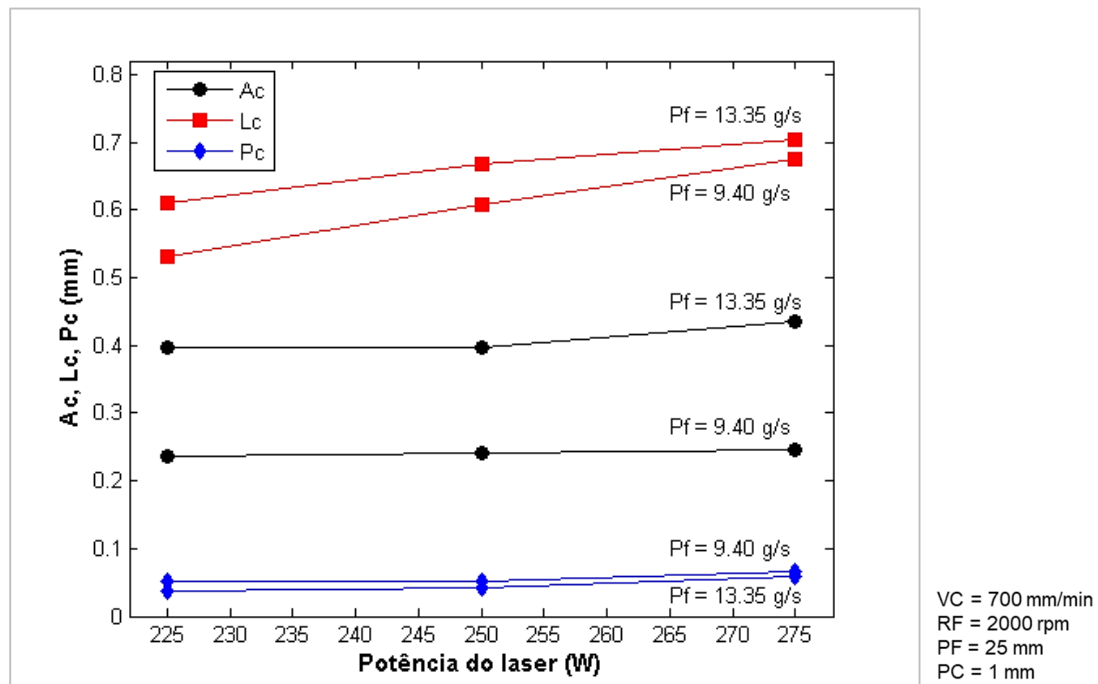


FIGURA 33. VALORES MÉDIOS ALTURA DO CORDÃO (Ac), LARGURA DO CORDÃO (Lc) E PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO (Pc) PARA OS DIFERENTES NÍVEIS DE OPERAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO

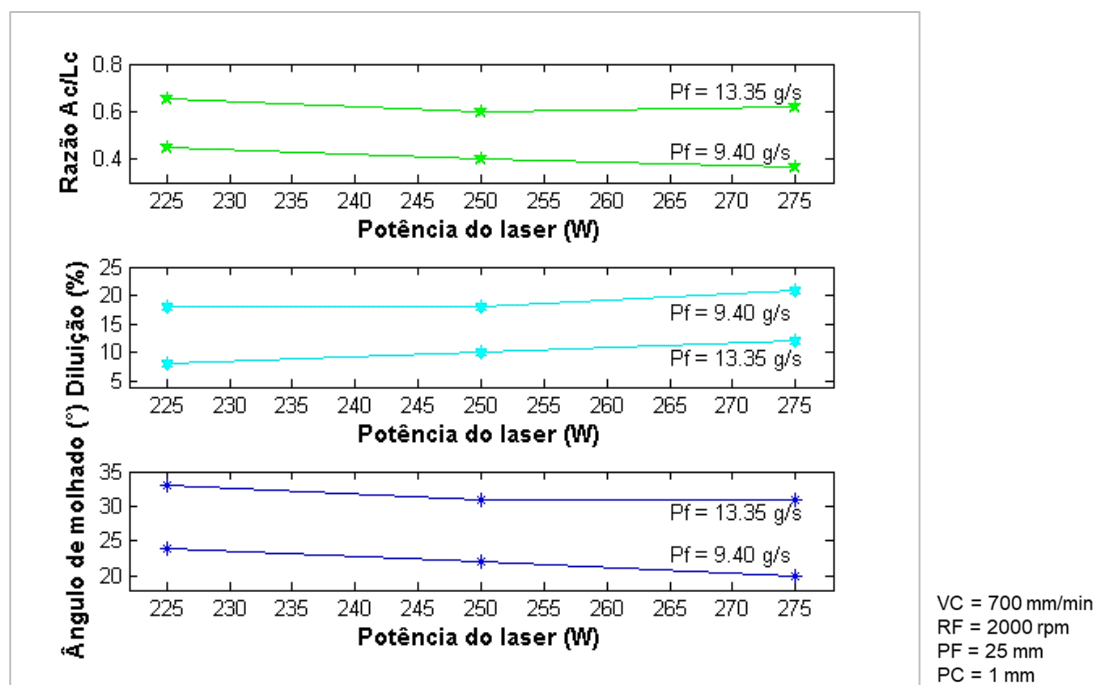


FIGURA 34. VALORES MÉDIOS DE RAZÃO Ac/Lc, DILUIÇÃO (D) E ÂNGULO DE MOLHADO (WA) PARA OS DIFERENTES NÍVEIS DE OPERAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO

ATIVIDADE 3.2. - AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E DA SIMULAÇÃO

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos experimentalmente de Ac, Lc e Pc extraídos da Tabela 2 e os resultados da simulação realizada por meio do FIS para previsão de Ac, Lc e Pc indicadas nas colunas ODM, e o erro relativo percentual resultante da comparação entre cada condição simulada e os resultados experimentais.

TABELA 9. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES EXPERIMENTAIS DE AC, LC E PC VS. ODM PREVISTO E ERRO (%)

Exp.	Ac (mm)	ODM Ac (mm)	Erro (%)	Lc (mm)	ODM Lc (mm)	Erro (%)	Pc (mm)	ODM Pc (mm)	Erro (%)
1	0,266	0,252	5,26	0,516	0,514	0,39	0,054	0,061	-12,96
2	0,414	0,417	-0,72	0,593	0,590	0,51	0,031	0,032	-3,23
3	0,259	0,250	3,47	0,603	0,590	2,16	0,039	0,032	17,95
4	0,383	0,385	-0,52	0,712	0,700	1,69	0,033	0,032	3,03
5	0,260	0,252	3,08	0,662	0,650	1,81	0,064	0,062	3,13
6	0,436	0,424	2,75	0,743	0,745	-0,27	0,054	0,056	-3,70
7	0,199	0,210	-5,53	0,551	0,540	2,00	0,048	0,050	-4,17
8	0,400	0,405	-1,25	0,626	0,635	-1,44	0,039	0,038	2,56
9	0,253	0,250	1,19	0,613	0,640	-4,40	0,056	0,056	0,00
10	0,392	0,385	1,79	0,657	0,650	1,07	0,048	0,050	-4,17
11	0,248	0,252	-1,61	0,679	0,680	-0,15	0,069	0,065	5,80
12	0,454	0,448	1,32	0,688	0,650	5,52	0,061	0,056	8,20
13	0,244	0,250	-2,46	0,528	0,540	-2,27	0,050	0,056	-12,00
14	0,377	0,380	-0,80	0,611	0,635	-3,93	0,038	0,038	0,00
15	0,215	0,210	2,33	0,606	0,635	-4,79	0,059	0,056	5,08
16	0,418	0,417	0,24	0,634	0,635	-0,16	0,049	0,050	-2,04
17	0,231	0,250	-8,23	0,686	0,680	0,87	0,067	0,065	2,99
18	0,416	0,413	0,72	0,679	0,650	4,27	0,061	0,062	-1,64

A representação esquemática da avaliação comparativa entre os resultados obtidos do sistema de inferência fuzzy preditivo e os dados experimentais é apresentada na Figura 35 para Ac, Lc e Pc, e na Figura 36 para d, wa e razão Ac/Lc. Como as três últimas variáveis de saída são dependentes das simuladas, também é apresentada a comparação entre o previsto e o experimental.

Pode-se observar que existe uma boa correlação entre ambos os resultados. O erro relativo (Tabela 9) indica que o modelo *fuzzy* apresenta alta precisão para a predição das variáveis Ac, Lc e Pc. O erro total para cada variável prevista foi 1,03 %, 2,88 % e 4,83%, enquanto o erro médio para cada variável simulada variou entre 0,06 % e 0,27 %, o que é muito baixo.

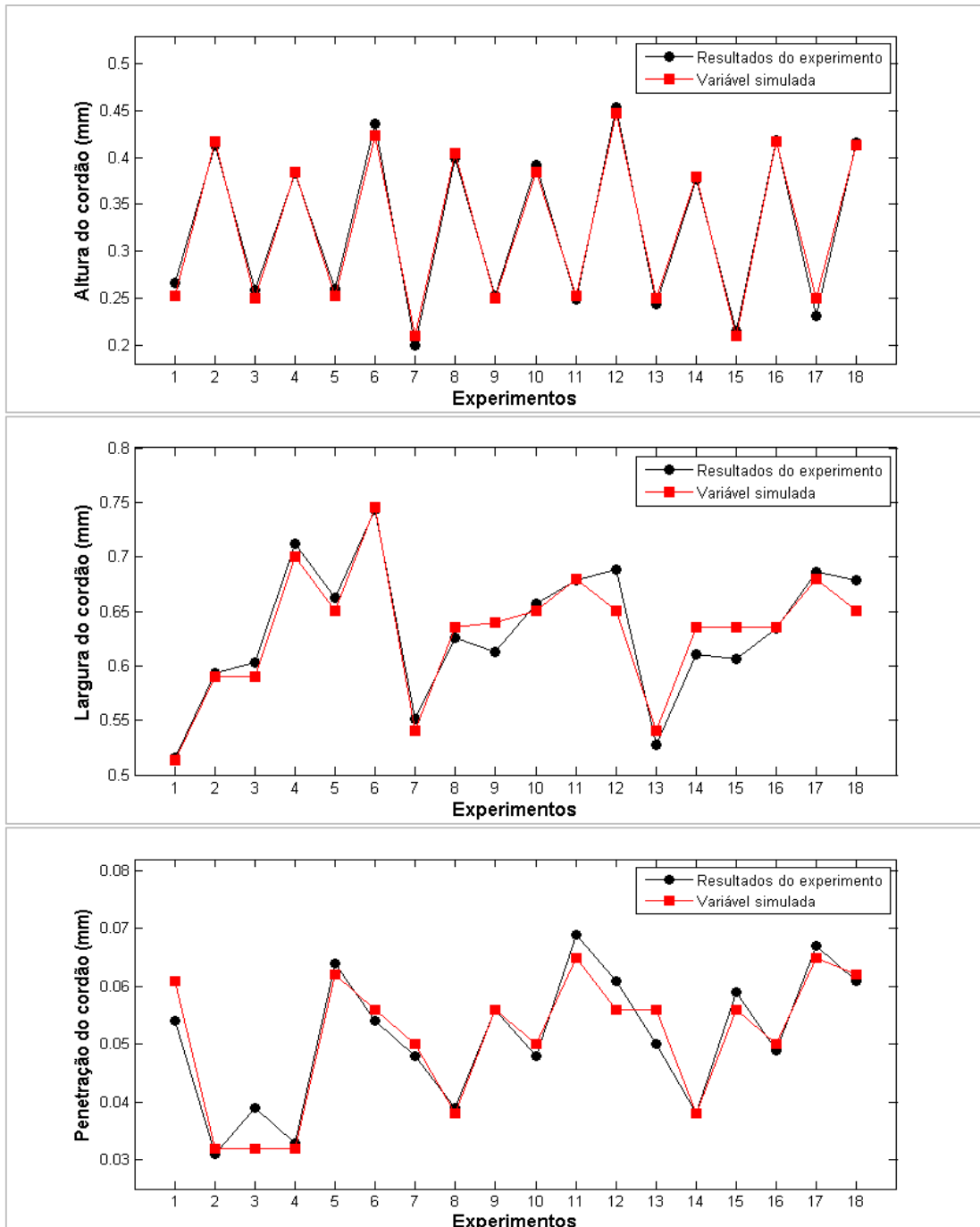


FIGURA 35. CORRELAÇÃO ENTRE VALORES SIMULADOS E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA AC, LC E PC

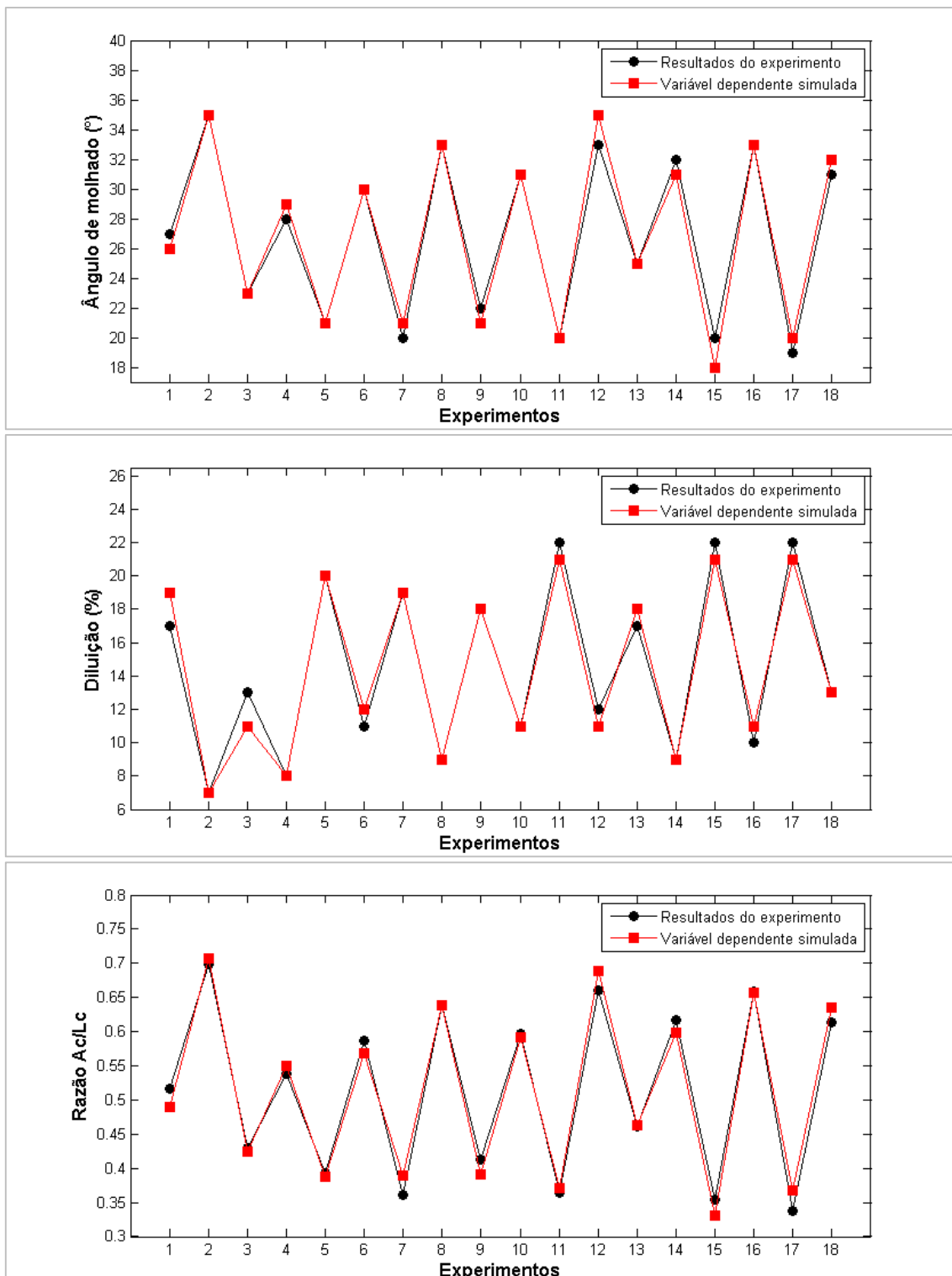


FIGURA 36. CORRELAÇÃO ENTRE VALORES SIMULADOS E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA RAZÃO AC/LC, D E WA

Os resultados do modelo *fuzzy* preditivo apresentaram alto índice de correlação quando comparados com os dados experimentais. O erro total foi de até 8,74 % e o erro médio inferior a 3 %. O modelo *fuzzy* desenvolvido pode ser melhorado e integrado a um ambiente de processo automatizado para reduzir a

complexidade das atividades de planejamento de processo híbrido e aumentar a estabilidade dele. Os resultados mostram que o modelo de inferência *fuzzy* baseado no método Mamdani fornece uma previsão precisa das variáveis de saída avaliadas e boa confiabilidade e estabilidade da abordagem.

APLICAÇÃO 2. SIMULAÇÃO DA DENSIDADE VOLUMÉTRICA DE ENERGIA DE CORDÕES ÚNICOS GERADOS POR MEIO DO PROCESSO DE MANUFATURA HÍBRIDA VIA LMD E USINAGEM

Esta aplicação do modelo se baseia na simulação, por meio da inferência *fuzzy*, da densidade de energia volumétrica gerada para depositar cordões únicos por meio do processo de manufatura híbrida que integra a de deposição a laser de aço AISI 316 e a usinagem. Pretende-se avaliar com esta aplicação a assertividade das etapas do modelo proposto e o método *fuzzy* preditivo seguindo as fases definidas na Etapa 3 da Figura 7.

ETAPA1. PLANEJAMENTO DO PROCESSO

ATIVIDADE 1.1 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na Aplicação 2 se usou parte dos dados e resultados gerados na Aplicação 1, que inclui o uso do sistema híbrido, a aplicação do procedimento experimental e as amostras geradas. Portanto, na Etapa 1 da Aplicação 2 não se procedeu a caracterizar o sistema híbrido e as amostras, e a análise da geometria da deposição (Atividades 1.2 e 1.3, respectivamente, da Etapa 1 da Aplicação 1, p. 80).

Nesta aplicação a energia volumétrica foi calculada conforme a Eq. 6:

$$Ev(J/mm^3) = \frac{PL (W)}{v(mm/s) * Ac(mm) * Lc(mm)} \quad (6)$$

em que: PL é a potência do laser; v é a velocidade de varredura do laser; Ac é a altura do cordão e Lc é a largura do cordão.

Quando mais de um cordão é depositado com determinado índice de sobreposição entre eles para gerar mais de uma camada em determinada superfície, o grau de re-fusão entre as camadas sobrepostas (Δz) aumenta, o que coloca em dúvida o uso da medida da altura do cordão (Ac) na função

densidade de energia. O mesmo ocorre quando há uma taxa de sobreposição entre os cordões depositados, cujo espaço lateral ou largura dos cordões pode vir a variar (MA et al., 2015).

Nesta aplicação, como um único cordão foi depositado em vez de vários cordões sobrepostos para gerar uma camada contínua, nenhum espaçamento lateral pode ser considerado para o cálculo de E_v . Assim, na Eq. 6 foi usada a largura do cordão para consideração volumétrica, uma vez que a potência do laser tem influência direta na largura do cordão (Tabela 4), e nenhum cordão depositado sobreposto de outro poderia ser refundido.

Nesta aplicação espera-se prever a E_v ODM (J/mm^3) gerada pelo processo a partir das variáveis simuladas na aplicação anterior (ODM Ac (mm) e ODM Lc (mm), Tabela 9) e os parâmetros PL (W) e v (mm/s) (Tabela 1). Logo da obtenção dos resultados experimentais obtidos na Aplicação 1 (Tabela 2) procede-se ao cálculo da E_v (J/mm^3) experimental e se realiza a comparação dos resultados experimentais e simulados para determinar o grau de correlação entre eles.

ATIVIDADE 1.2 - SIMULAÇÃO DA DENSIDADE DE ENERGIA VOLUMÉTRICA POR MEIO DA CONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY (FIS)

Com as variáveis simuladas pelo FIS para previsão das características geométricas (Aplicação 1), os resultados dessa simulação se constituíram os parâmetros de entrada de um novo FIS preditivo para simular de forma simultânea a energia volumétrica que seria gerada pela deposição a laser do material metálico após a aplicação do processo subtrativo para garantia da planicidade do substrato.

Para esta simulação se seguiram as mesmas atividades gerais para configuração dos módulos de um FIS, definidas na seção 4.3.2.2, usando o *software* MATLAB R2011b por meio do módulo de inteligência artificial *Fuzzy Toolbox*. O FIS foi configurado seguindo a representação esquemática da Figura 37. Além disso, gráficos de superfície 2D e 3D foram plotados para complementar a análise.

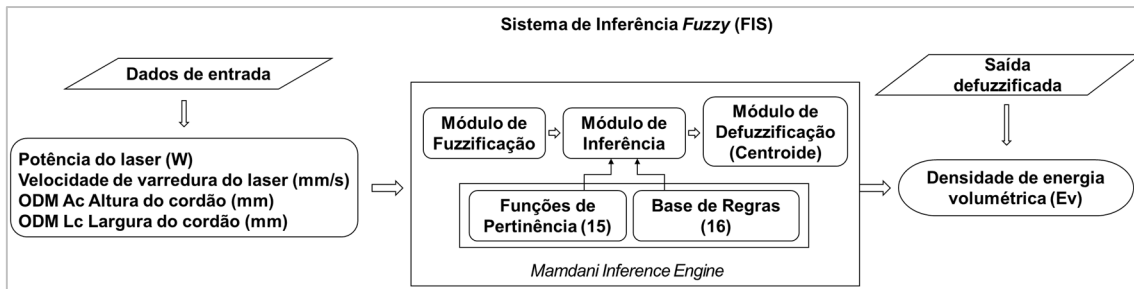


FIGURA 37. CONFIGURAÇÃO DO FIS 2

ATIVIDADE 1.2.1 - CONFIGURAÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA DENSIDADE VOLUMÉTRICA DE ENERGIA (EV)

Conforme explicado anteriormente na Aplicação 1, o motor de inferência ativa de forma simultânea o módulo de fuzzificação, o módulo de inferência e o módulo de defuzzificação, para gerar uma saída defuzzificada que é o valor numérico (*crisp*) da variável que está sendo simulada (Figura 37). Nesta Aplicação 2, a estrutura do motor de inferência do FIS configurado é apresentado na Figura 38.

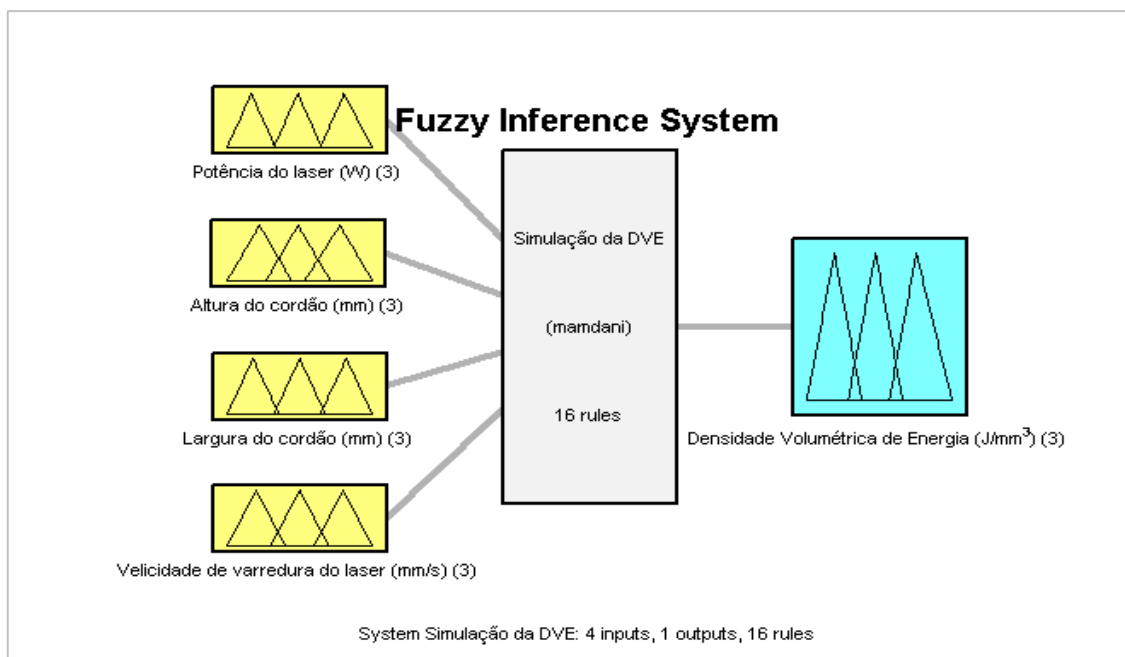


FIGURA 38. MOTOR DE INFERÊNCIA MAMDANI PARA A VARIÁVEL SIMULADA DENSIDADE DE ENERGIA EV (J/MM³)

O desenvolvimento deste FIS preditivo, ao igual que o da Aplicação 1, envolve quatro subsistemas (Figura 37). O primeiro são os dados de entrada (Tabela 10), que são os conjuntos de dados não *fuzzy* correspondentes aos níveis operacionais da potência do laser (PL) e velocidade de varredura do laser

(v) previamente definidos, e as observações simuladas da Ac (mm) e Lc (mm) (ODM).

TABELA 10. PARÂMETROS DE ENTRADA DO FIS

Exp.	PL (W)	v (mm/s)	Ac ODM (mm)	Lc ODM (mm)
1	225	5	0,252	0,514
2	225	5	0,417	0,590
3	250	5	0,250	0,590
4	250	5	0,385	0,700
5	275	5	0,252	0,650
6	275	5	0,424	0,745
7	225	5	0,210	0,540
8	225	5	0,405	0,635
9	250	5	0,250	0,640
10	250	5	0,385	0,650
11	275	5	0,252	0,680
12	275	5	0,448	0,650
13	225	5	0,250	0,540
14	225	5	0,380	0,635
15	250	5	0,210	0,635
16	250	5	0,417	0,635
17	275	5	0,250	0,680
18	275	5	0,413	0,650

O segundo, é o módulo de *fuzzificação* (Figura 37), que transforma os dados não *fuzzy* em conjuntos *fuzzy* (para entradas e saídas) para que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas de entrada e saída. Então, é possível estruturar os conjuntos *fuzzy* e as funções de pertinência tanto para as entradas quanto para as saídas.

As funções de pertinência configuradas nesta aplicação foram do tipo triangular e foram estruturadas também no *Toolbox* do Matlab® *Membership Functions Editor*. Os 15 conjuntos *fuzzy* e suas funções de pertinência estruturados para esta aplicação estão representados na Figura 39.

Os 12 conjuntos *fuzzy* de entrada e suas funções de pertinência de entrada correspondem aos parâmetros de entrada (Figura 39 (a)-(d)), e os outros três conjuntos *fuzzy* e suas funções de pertinência de saída correspondem à densidade de energia volumétrica simulada (Ev), Figura 39 (e).

As 12 variáveis linguísticas de entrada correspondentes a cada conjunto *fuzzy* e suas funções (entradas e saídas) foram classificadas em baixa, média e elevada para PL (W); baixa, média e adequada para ODM Ac (mm); baixa, média e adequada para Lc (mm) e baixa, adequada e elevada para v (mm/s), como

visto na Figura 39 (a)-(d), respectivamente. As variáveis linguísticas de saída para Ev (J/mm^3) foram classificadas em baixa, média e elevada conforme a Figura 39 (e).

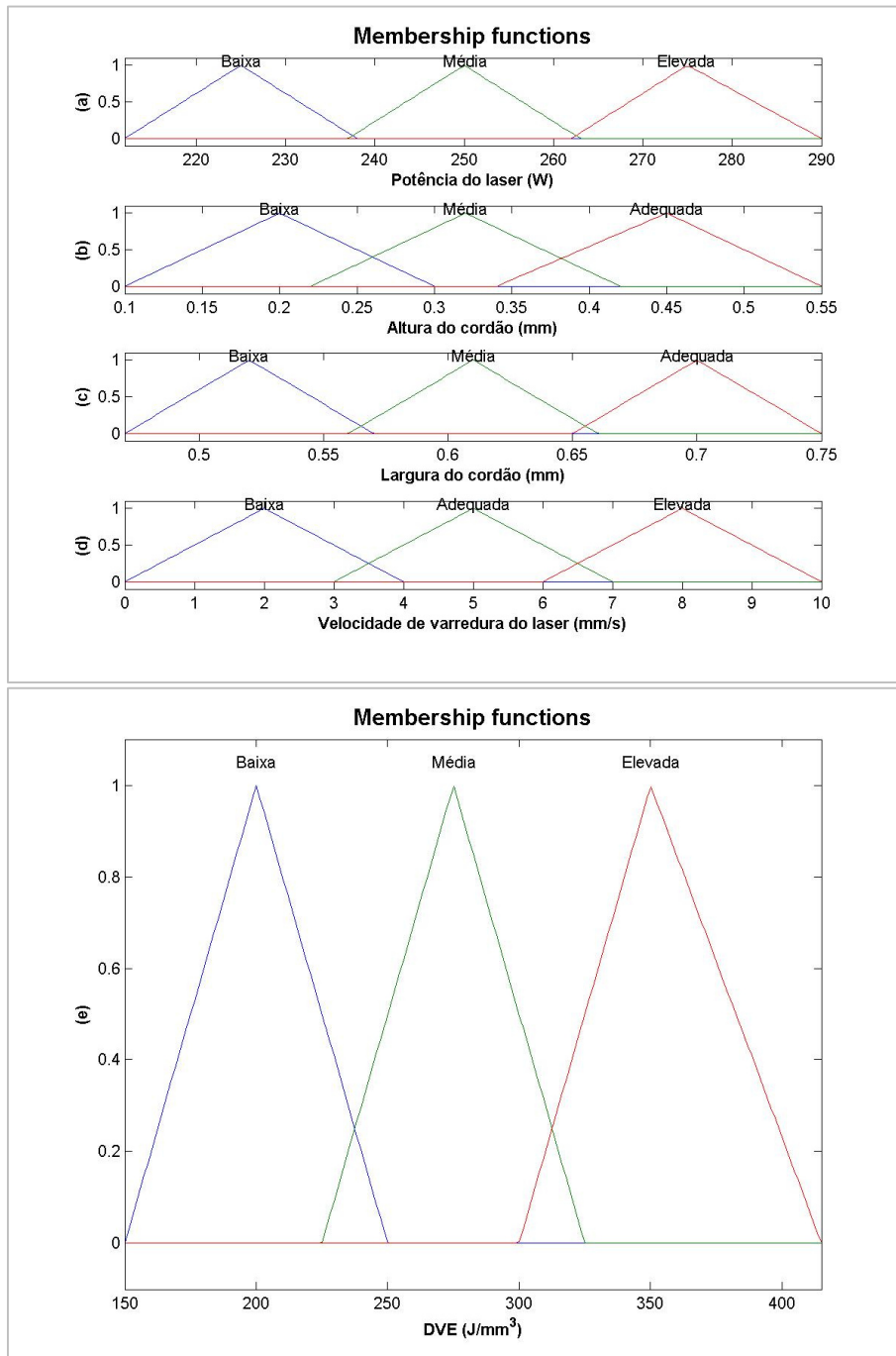


FIGURA 39. FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E CONJUNTOS FUZZY PARA CADA PARÂMETRO DE ENTRADA (A-D), E DE SAÍDA PARA A VARIÁVEL SIMULADA Ev (J/mm^3) (E)

O terceiro subsistema é o módulo de Inferência Fuzzy (Figura 37), implementado nesta aplicação usando o método de inferência *Mamdani* (Mamdani e Assilian 1975). O módulo de inferência realiza um “raciocínio fuzzy”

a partir da base de regras definida para gerar um valor *fuzzy*. O mecanismo de inferência *Mamdani* determina como as regras previamente definidas seguindo as restrições “se”-“então” são ativadas para uma determinada situação, combinadas, e junto com os dados *fuzzy* de entrada, o módulo infere as ações de controle e gera o valor *crisp* esperado. A Base de regras (16) estruturadas nesta aplicação são apresentadas na Figura 40.

Base de Regras para a variável simulada DVE (J/mm ³)	
1.	1 1 1 2, 3 (1) : 1
2.	1 2 1 2, 3 (1) : 1
3.	1 2 2 2, 1 (1) : 1
4.	1 3 2 2, 1 (1) : 1
5.	2 1 2 2, 2 (1) : 1
6.	2 2 2 2, 3 (1) : 1
7.	2 2 3 2, 1 (1) : 1
8.	2 3 3 2, 1 (1) : 1
9.	3 1 3 2, 2 (1) : 1
10.	3 2 3 2, 3 (1) : 1
11.	3 3 3 2, 1 (1) : 1
12.	2 1 2 2, 3 (1) : 1
13.	2 2 2 2, 1 (1) : 1
14.	2 3 2 2, 1 (1) : 1
15.	3 1 3 2, 3 (1) : 1
16.	3 2 3 2, 1 (1) : 1

FIGURA 40. BASE DE REGRAS PARA A VARIÁVEL DE SAÍDA SIMULADA Ev (J/MM³)

O método de *defuzzificação* utilizado também nesta simulação foi o método do centro de gravidade (COG), seguindo a Eq. 5, previamente definida na Aplicação 1, que retorna como saída mensurável (saída *defuzzificada*) o valor do centro da área da função de pertinência inferida da variável simulada:

$$y_0 = \frac{\sum y \mu_x(y)}{\sum \mu_x(y)} \quad (5)$$

em que: y_0 é a saída defuzzificada da variável simulada Ev (J/mm³); y é o valor central da variável nas regiões *fuzzy* e $\mu_x(y)$ as funções de pertinência agregadas.

ATIVIDADE 1.2.2 - EXECUÇÃO DO FIS PARA PREVISÃO DA EV (J/MM³)

Após a simulação realizada no *Toolbox Rule Viewer* do Matlab foram compilados os dados resultantes da simulação.

A Figura 41 apresenta o visualizador de regras que é usado para determinar a saída esperada de acordo com cada interação das entradas. As quatro primeiras colunas mostram os quatro parâmetros de entrada do processo de simulação e a quinta coluna indica o ODM da variável de saída E_v (J/mm^3). O experimento 13 é simulado para exemplificar como se obtêm os registros da simulação.

A linha vermelha central em cada parâmetro de entrada é o “parametrizador” por meio do qual é possível selecionar o valor de cada condição experimental, resultando no valor simulado da variável de saída E_v .

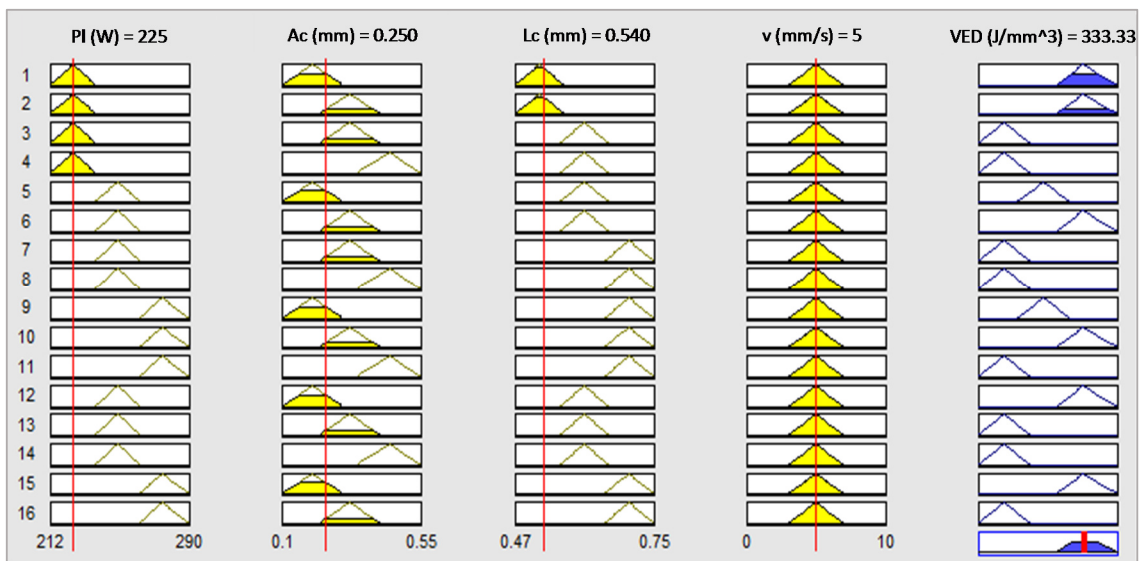


FIGURA 41. VISUALIZADOR DE REGRAS PARA A VARIÁVEL DE SAÍDA SIMULADA E_v (J/mm^3)

Os mapas 3D da Figura 42 auxiliam na visualização da interação dos parâmetros de entrada e a variável simulada. Na Figura 42 (a) se apresenta a interação entre a altura do cordão (mm) e a potência do laser (W), e (b) interação entre a largura do cordão (mm) e a potência do laser (W). Como a velocidade de varredura do laser é constante não se plotou sua interação com os outros parâmetros.

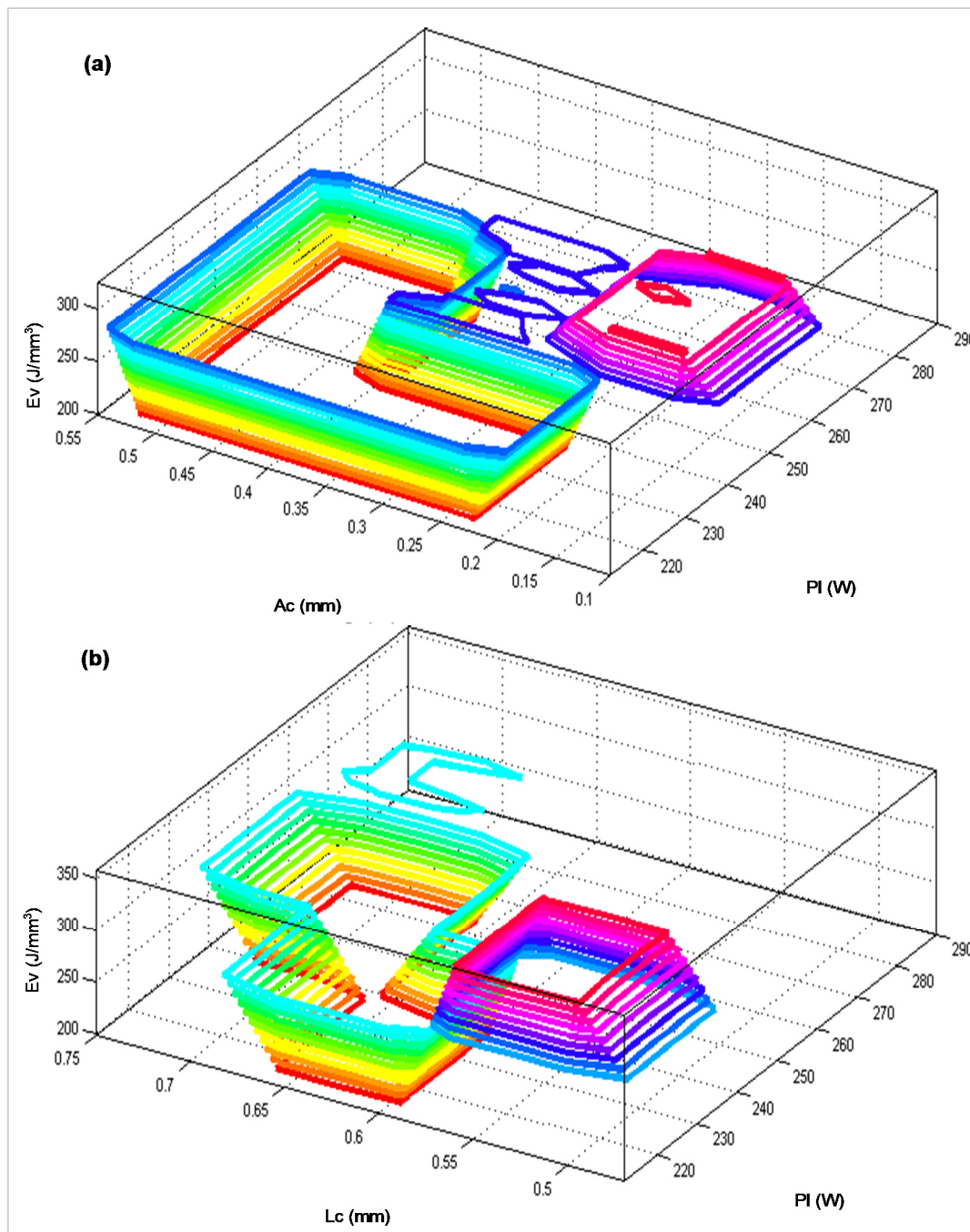


FIGURA 42. MAPAS 3D DA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E A VARIÁVEL SIMULADA Ev (J/mm^3)

ETAPA 2. EXECUÇÃO DO PROCESSO

ATIVIDADE 2.1 - DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

Nesta aplicação, os experimentos se desenvolveram conforme o descrito na Atividade 1.1 Procedimento experimental da Etapa 1 Planejamento do processo desta Aplicação 2. Os valores preditos pelo FIS para Ev conforme cada

condição de deposição estudada foram comparados com os resultados da análise experimental após as medições das variáveis da Aplicação 1 e cálculo da E_v real. Por último foram gerados gráficos 2D que representam a relação comparativa entre os valores simulados e reais de E_v (J/mm^3).

ETAPA 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

ATIVIDADE 3.1 - AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E A SIMULAÇÃO

Levando-se em consideração os resultados da análise de significância que têm alguns dos parâmetros do processo na geometria da deposição (Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5), e pela proporcionalidade do efeito que a variação destas variáveis e parâmetros têm na geração da densidade volumétrica de energia procedeu-se a representar esquematicamente esta interação na Figura 43.

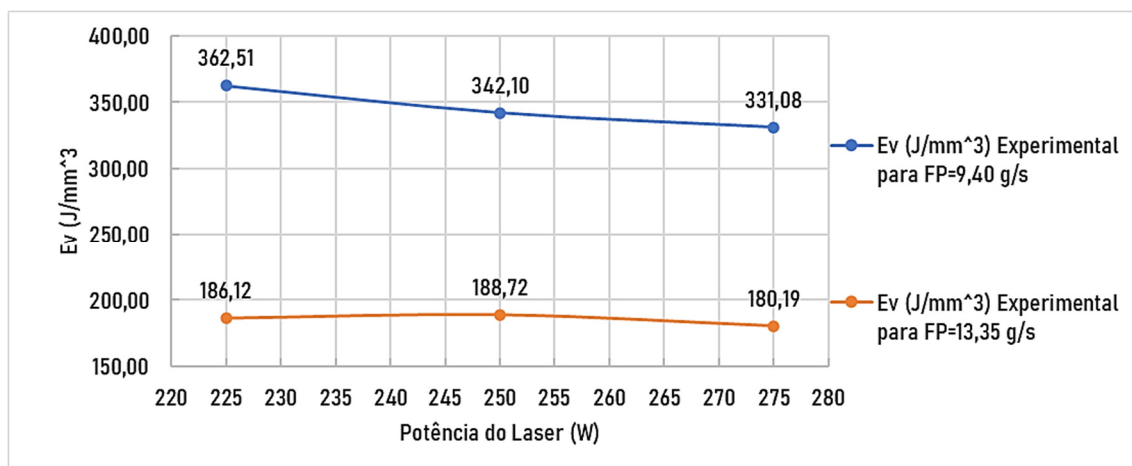


FIGURA 43. VALORES MÉDIOS DA E_v (J/mm^3) PARA CADA INTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PL (W) E FP (G/S)

Na Figura 43 verifica-se que para uma velocidade de avanço do laser mantida constante ($v = 5$ mm/s) com fluxo de pó (FP) menor (9,40 g/s) a densidade média de energia é maior ($345,23$ J/mm^3) e o contrário ocorre para um fluxo maior (13,35 g/s), diminuindo o fluxo médio de energia ($185,01$ J/mm^3). Estes resultados coincidem com o trabalho de Li *et al.* (2019). Estes autores indicaram que a densidade de energia linear (J/mm) e a energia específica (J/g) aumentaram com velocidade de varredura do laser constante (mm/s) reduzindo a taxa de alimentação do pó de (g/s). Verificaram também que quando se aumenta a potência do laser (W) também aumenta a energia específica (J/g).

Também observa-se na Figura 43 que com fluxo de pó menor (9,40 g/s) e a potência do laser aumentando de 225 W para 250 W e 275 W, a E_v média diminui de 362,51 J/mm³ para 342,10 J/mm³ e 331,08 J/mm³, respectivamente. Maior fluxo de pó, nos três níveis de potência do laser, o E_v médio apresenta uma variação decrescente entre 186,12 J/mm³ e 180,19 J/mm³, porém foi medido um aumento mais leve em 250 W (188,72 J/mm³). Essas variações ocorrem porque na fórmula de E_v foi utilizada a L_c (mm) ao invés do espaçamento lateral entre cordões (mm) quando há sobreposição, pois foi depositado apenas um único cordão e não múltiplas cordões sobrepostos para gerar uma ou múltiplas camadas como em Li *et al.* (2019).

Pelo que foi verificado anteriormente, além dos resultados obtidos na Aplicação 1, verificando-se que o aumento da PL (W) tem influência direta no aumento da L_c (mm) (Tabela 4), e o aumento do FP (g/s) influencia no aumento das A_c (Tabela 3), havendo uma relação de proporcionalidade com relação à E_v (J/mm³), confirma-se, como verificado por Ma *et al.* (2015) e Li *et al.* (2019), que a densidade de energia reflete a relação entre energia de entrada (W) e o fluxo de pó do material depositado (g/s), que por sua vez impacta na geometria da deposição.

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos dos procedimentos experimentais desenvolvidos e do FIS para previsão da densidade de energia E_v (J/mm³) indicadas nas colunas ODM, e o erro relativo percentual para cada condição experimental e simulação.

A avaliação comparativa entre os resultados obtidos do FIS e os dados experimentais é apresentada na Figura 44. Pode-se observar que existe uma boa correlação entre os resultados. O erro relativo (Tabela 11) calculado a partir dos dados experimentais e do ODM indica que o modelo fuzzy apresenta alta precisão para a previsão da densidade de energia E_v (J/mm³). O erro total foi 7 %, enquanto o erro médio resultou em 0,39 %.

TABELA 11. VALORES EXPERIMENTAIS VS. ODM PREVISTO E ERRO (%)

Exp.	PL (W)	v (mm/s)	Ac (mm)	Lc (mm)	Ev (J/mm ³) Experimental	Ac ODM (mm)	Lc ODM (mm)	Ev (J/mm ³) ODM	Erro (%)
1	225	5	0,266	0,516	327,85	0,252	0,514	347,42	5,97
2	225	5	0,414	0,593	183,30	0,417	0,590	182,90	-0,21
3	250	5	0,259	0,603	320,15	0,250	0,590	338,98	5,88
4	250	5	0,383	0,712	183,35	0,385	0,700	185,53	1,19
5	275	5	0,260	0,662	319,54	0,252	0,650	335,78	5,08
6	275	5	0,436	0,743	169,78	0,424	0,745	174,12	2,55
7	225	5	0,199	0,551	410,40	0,210	0,540	396,83	-3,31
8	225	5	0,400	0,626	179,71	0,405	0,635	174,98	-2,63
9	250	5	0,253	0,613	322,40	0,250	0,640	312,50	-3,07
10	250	5	0,392	0,657	194,14	0,385	0,650	199,80	2,91
11	275	5	0,248	0,679	326,62	0,252	0,680	320,96	-1,73
12	275	5	0,454	0,688	176,08	0,448	0,650	188,87	7,26
13	225	5	0,244	0,528	349,29	0,250	0,540	333,33	-4,57
14	225	5	0,377	0,611	195,36	0,380	0,635	186,49	-4,54
15	250	5	0,215	0,606	383,76	0,210	0,635	374,95	-2,29
16	250	5	0,418	0,634	188,67	0,417	0,635	188,83	0,08
17	275	5	0,231	0,686	347,08	0,250	0,680	323,53	-6,78
18	275	5	0,416	0,679	194,72	0,413	0,650	204,88	5,22

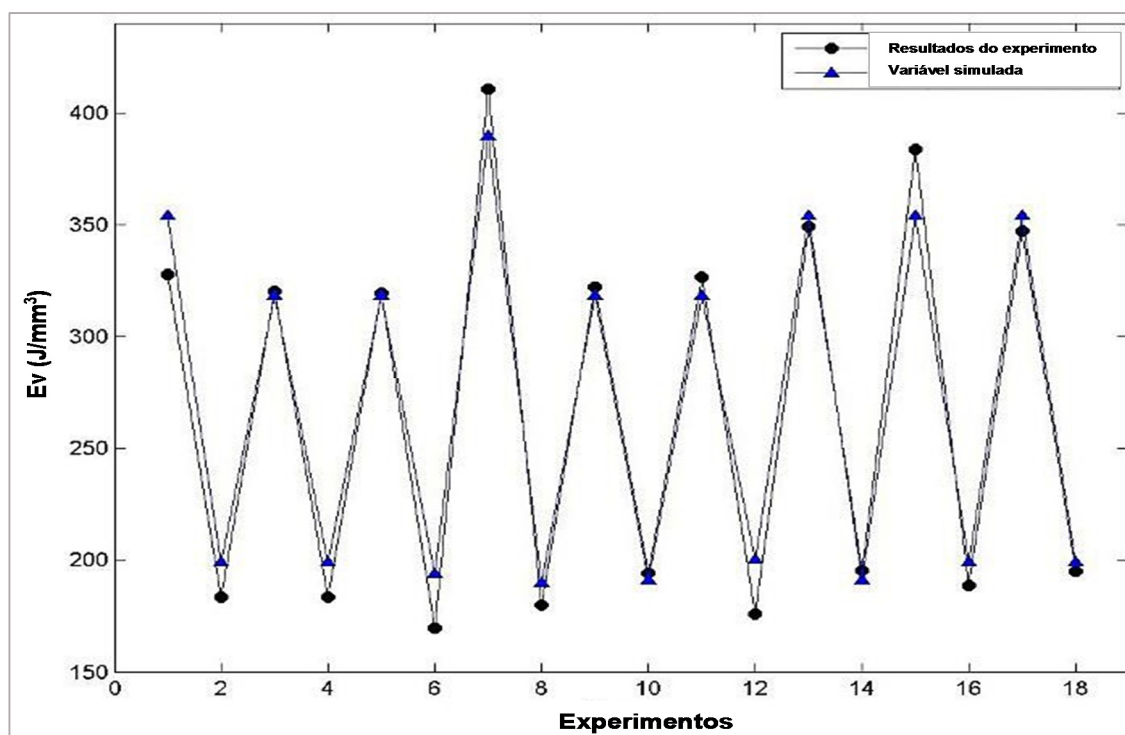


FIGURA 44. CORRELAÇÃO ENTRE VALORES SIMULADOS PARA A DENSIDADE DE ENERGIA E_v (J/mm^3) E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados do modelo fuzzy preditivo apresentaram alto índice de correlação quando comparados com os dados experimentais. O erro total foi de até 7 % e o erro médio de 0.39 %. O modelo fuzzy desenvolvido pode ser melhorado e integrado a um ambiente de processo automatizado para reduzir a complexidade das atividades de planejamento de processo híbrido e aumentar a estabilidade dele.

Os resultados mostram que o modelo de inferência fuzzy baseado no método *Mamdani* fornece uma previsão precisa da variável simulada e boa confiabilidade e estabilidade da abordagem.

6 CONCLUSÕES

As tecnologias híbridas de manufatura permitem combinar processos e máquinas com flexibilidade e possibilitam melhor utilização de recursos, materiais e redução dos tempos e custo de fabricação das peças e componentes produzidos. Para uma execução bem-sucedida de um processo híbrido é de fundamental importância a elaboração de um planejamento adequado que permita uma visualização integral e proativa da operação.

Os modelos de planejamento do processo de manufatura híbrida encontrados na literatura não contemplam todas as atividades requeridas pelo processo. Adicionalmente, não permitem simular o desempenho de múltiplos parâmetros do processo híbrido para avaliar o efeito de sua interação nas características geométricas da deposição, antes que o processo seja executado.

O objetivo desta pesquisa foi propor um Modelo de Planejamento do Processo de Manufatura Híbrida com Abordagem Preditiva que agrupa as principais atividades para garantia da estabilidade do processo, e que inclui uma etapa de simulação multiparamétrica.

A estruturação do modelo apoiou-se na metodologia Design Science Research (DSR) por meio do desenvolvimento de seus três ciclos, combinando um método de apoio à tomada de decisão baseado na configuração de um Sistema de Inferência Fuzzy para simulação multiparamétrica do processo híbrido.

O modelo contempla cinco etapas principais e considera as atividades inerentes a cada uma delas. A primeira etapa contempla a modelagem CAD que implica no projeto do componente a ser fabricado. Na segunda etapa é realizado o planejamento do processo, de acordo com as atividades definidas. A terceira etapa refere-se à simulação multiparamétrica que inclui uma atividade decisória a partir do resultado da simulação desta etapa. A quarta etapa trata da execução do processo e a quinta etapa é o controle metrológico das variáveis de saída (controle dimensional).

O modelo proposto é de ampla abrangência, pois reúne as principais atividades para garantir a estabilidade do processo, e inclui a etapa de

simulação, por meio da qual pode-se controlar a variação dos múltiplos parâmetros do processo e seu possível efeito nas características geométricas previamente definidas. Permite estabelecer e identificar as relações de significância entre os parâmetros do processo a partir das possíveis combinações, indicando seus efeitos nas variáveis geométricas, possibilitando sugerir a melhor estratégia de fabricação segundo os requisitos e critérios de aceitação.

Na aplicação em dois experimentos, o modelo mostrou-se adequado apresentando resultados satisfatórios com um erro menor do que 8 % na simulação preditiva em ambos os casos, coincidindo com as propostas analisadas na literatura sobre o tema. O modelo permitiu estabelecer e identificar as relações de significância entre os parâmetros do processo a partir das possíveis combinações indicando seus efeitos nas variáveis geométricas, possibilitando, assim, sugerir a melhor estratégia de fabricação segundo os requisitos e critérios de aceitação do modelo.

O modelo desenvolvido nesta tese é uma importante ferramenta no auxílio à tomada de decisão quando da proposta de estratégias de manufatura empregando o sistema híbrido que integra a LMD e a usinagem. Por conseguinte, o objetivo geral desta tese foi atendido. Vale ainda ressaltar que o modelo apresentado, assim como seus métodos para desenvolvimento de cada atividade, pode ser adaptado a outros processos, e ainda, definir em cada uma das etapas outras atividades que o usuário considere adequadas para sua inclusão.

O modelo proposto apresenta como máximo três parâmetros variáveis do processo híbrido, especificamente relacionados ao processo aditivo, e os demais parâmetros com faixa de operação constante. Isso implica que a análise fatorial combinatória para analisar o efeito da interação dos parâmetros do processo híbrido na geometria gerada seja reduzida, o que se apresenta como limitação. No entanto, uma quantidade mais elevada de parâmetros variáveis inserida em uma análise combinatória pode levar à necessidade de realização de uma extensa experimentação, provocando maior uso de materiais, tempo e custo, o que pode ser uma estratégia inviável do ponto de vista técnico. Desta forma, é importante continuar a estudar, entender e definir os parâmetros críticos do processo híbrido, que na sua maior parte provêm do processo aditivo. Outra das

principais dificuldades que se identificam hoje para a disseminação e comercialização da tecnologia e conseqüentemente o modelo aqui proposto é a falta de capacitação do capital humano e o elevado custo da tecnologia laser usada.

A pesquisa desenvolvida nesta tese contribui para a teoria sobre PPMH, uma vez que identifica e sistematiza as etapas, atividades, técnicas e ferramentas, requisitos e critérios fundamentais para seu desenvolvimento. A principal contribuição prática é que ela apresenta um modelo que permite identificar uma estratégia de fabricação segura, estável e com menos desperdício de material pela experimentação excessiva, para compreensão do princípio de operação do processo híbrido. Outra implicação prática refere-se à possibilidade de avaliar a influência que a interação de múltiplos parâmetros do processo tem na geometria da deposição com reduzido grau de incerteza. Cabe acrescentar que o modelo é passível de ajustes e abre caminhos para pesquisas futuras.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como oportunidades para trabalhos futuros se citam as seguintes:

- Adaptar ao modelo outras técnicas aditivas e subtrativas, ou ainda em combinações diferentes para verificar a aplicabilidade com diferentes escopos.
- Aplicar o modelo inserindo mais parâmetros do processo híbrido com faixas de operação variáveis, não limitados ao processo aditivo, assim como outras variáveis geométricas a serem avaliadas.
- Realizar os devidos ajustes do método preditivo para reduzir o erro relativo obtido nas aplicações desta tese em concordância com a literatura sobre o tema.
- Aplicar o modelo para diferentes tipos de materiais incluindo outros parâmetros relacionados ao processo subtrativo, e a sequência de uso do processo subtrativo, incluindo o pós-processamento e não limitado à pré-usinagem.

- Verificar quais os parâmetros subtrativos críticos que devem ser relacionados ao processo híbrido para garantia da confiabilidade dimensional da peça ou objeto fabricado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDULHAMEED, O.; AL-AHMARI, A. M.; AMEEN, W.; MIAN, S. H. Novel dynamic CAPP system for hybrid additive–subtractive–inspection process. **Rapid Prototyping Journal**, v.24, n.6, p.988–1002, 2018.
2. ABDULRAHMAN, K.O. Laser metal deposition technique: Sustainability and environmental impact. **Procedia Manufacturing**, v.21, p.109–116, 2018.
3. ADNAN, M.M.; SARKHEYLI, A.; ZAIN, A.M.; HARON, H. Fuzzy logic for modeling machining process: A review. **Artificial Intelligence Review**, v.43, p.345–379, 2015.
4. AGGARWAL, K.; URBANIC J.; SAQIB, S. Development of predictive models for effective process parameter selection for single and overlapping laser clad bead geometry. **Rapid Prototyping Journal**, v.24, n.1, p.214-228, 2018.
5. ALAM, M.K.; URBANIC, R.J.; NAZEMI, N.; EDRISY, A. Predictive modeling and the effect of process parameters on the hardness and bead characteristics for laser-cladded stainless steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.94, p.397–413, 2018.
6. AMAITIK, S.M. Fuzzy logic models for selection of machining parameters in CAPP systems. **International Journal of Computer and Information Technology**, v.2, n.2, p.279–285, 2013.
7. ANNAMARIA, G.; MASSIMILIANO, B.; FRANCESCO, V. Laser polishing: a review of a constantly growing technology in the surface finishing of components made by additive manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.120, p.1433–1472, 2022.
8. ANSARI, M.; MOHAMADIZADEH, A.; HUANG, Y.; PASERIN, V.; TOYSERKANI, E. Laser directed energy deposition of water-atomized iron powder: Process optimization and microstructure of single-tracks. **Optics & Laser Technology**, v.112, p.485-493, 2019.
9. ARAGHI, B.; MANCO, G.; BAMBACH, M.; HIRT, G. Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, v.58, n.1, p.225-228, 2009.
10. ARRIZUBIETA, J.; AITZOL, L.; MAGDALENA, C.; ENEKO, U.; AMAIA, A. Hardness, grainsize and porosity formation prediction on the Laser Metal Deposition of AISI 304 stainless steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.135, p.53–64, 2018.

11. ASPINWALL, D.K.; DEWES, R.C.; BURROWS, J.M.; MA, P. Hybrid high speed machining (HSM): System design and experimental results for grinding/HSM and EDM/HSM. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, v.50, n.1, p.145-148, 2001.
12. ATTARAN, M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. **Business Horizons**, v.60, n.5, p.677—688, 2017.
13. BARD J.F.; FEO, T.A. The cutting path and tool selection problem in computer aided process planning. **Journal of Manufacturing Systems**, v.8, n.1, p.17–26, 1989.
14. BARRAGAN, G.; FERREIRA, R.J.; MARIANI, F.E.; SILVA, E.J.; COELHO, R.T. The Remanufacture of a Complex Part Using Hybrid Manufacturing (HM). **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Preprint. 2021.
15. BASINGER, K. L.; KEOUGH, C. B.; WEBSTER, C. E.; WYSK, R. A.; MARTIN, T. M.; HARRYSSON, O. L. Development of a modular computer-aided process planning (CAPP) system for additive-subtractive hybrid manufacturing of pockets, holes, and flat surfaces. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.96, n.5–8, p.2407–2420, 2018.
16. BEHANDISH, M.; NELATURI, S.; DE KLEER, J. Automated process planning for hybrid manufacturing. **CAD Computer Aided Design**, v.102, p.115–127, 2018.
17. ÇAĞDAŞ, V.; STUBKJÆR, E. Design research for cadastral systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 35, p. 77-87, 2011.
18. CAIAZZO, F. Laser-aided Directed Metal Deposition of Ni-based superalloy powder. **Optics and Laser Technology**, v.103, p.193–198, 2018.
19. CALLEJA, A.; TABERNERO, I.; FERNÁNDEZ, A.; CELAYA, A.; LAMIKIZ, A.; LÓPEZ DE LACALLE, L.N. Improvement of strategies and parameters for multi-axis laser cladding operations. **Optics and Lasers in Engineering**, v.56, p.113-120, 2014.
20. CHEN, L.; LAU, T. Y.; TANG, K. Manufacturability analysis and process planning for additive and subtractive hybrid manufacturing of Quasi-rotational parts with columnar features. **Computer-Aided Design**, v.118, p.102759, 2020.
21. CHEN, L.; XU, K.; TANG, K. Optimized sequence planning for multi-axis hybrid machining of complex geometries. **Computers and Graphics (Pergamon)**, v.70, p.176–187, 2018.
22. CHEN, N.; BARNAWAL, P.; FRANK, M. C. Automated post-machining process planning for a new hybrid manufacturing method of additive

- manufacturing and rapid machining. **Rapid Prototyping Journal**, v.24, n.7, p.1077–1090, 2018.
23. CHEN, N.; FRANK, M. Process planning for hybrid additive and subtractive manufacturing to integrate machining and directed energy deposition. **Procedia Manufacturing**, v.34, p.205–213, 2019.
 24. CHEN, W.; XU, L.; ZHAO, L.; HAN, Y.; WANG, X.; HU, C.; JING, H. Application of hybrid additive manufacturing technology for performance improvement of martensitic stainless steel. **Additive Manufacturing**, v.51, p.102648, 2022.
 25. CHERRY, J. A.; DAVIES, H. M.; MEHMOOD, S.; LAVERY, N. P.; BROWN, S. G. R.; SIENZ, J. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.76, n.5-8, p.869–879, 2014.
 26. CHONG, L.; RAMAKRISHNA, S.; SINGH, S. A review of digital manufacturing-based hybrid additive manufacturing processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.95, n.5–8, p.2281–2300, 2018.
 27. CIRP. The International Academy for Production Engineering [online]. Available from: www.cirp.net/com/blob/354972/caef73fe2f4d3e0baff239006d465164/pl0us-lasertec-65-3dpdf-. 2011
 28. CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J. I.; RUÍZ, J. E.; UKAR, E.; LAMIKIZ, A. Study of the porosity generated by the use of cutting fluid in hybrid processes combining machining and Laser Metal Deposition (LMD). **Procedia CIRP**, v.74, p.733–737, 2018b.
 29. CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J. I.; RUÍZ, J.; UKAR, E.; LAMIKIZ, A. Latest developments in industrial hybrid machine tools that combine additive and subtractive operations. **Materials**, v.11, p.1-27, 2018c.
 30. CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J. I.; UKAR, E.; LAMIKIZ, A. Analysis of the influence of the use of cutting fluid in hybrid processes of machining and Laser Metal Deposition (LMD). **Coatings**, v.8, n.2, p.1-10, 2018a.
 31. CREESE, R. **Introduction to Manufacturing Processes and Materials**, 1st ed. CRC Press, 1999. <https://doi.org/10.1201/9781315274256>
 32. CURTIS, D.; SOO, S.; ASPINWALL, D.; SAGE, C. Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aeroengine alloy using mounted grinding points. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, v 58, n.1, p.173-176, 2009.
 33. DANDEKAR C.R.; SHIN Y.C.; BARNES, J. Machinability improvement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) via lam and hybrid machining. **International**

Journal of Machine Tools and Manufacture, v.50, n.2, p.174-182, 2010.

34. DAS, B.; ROY, S.; RAI, R.N.; SAHA, S.C. Application of grey fuzzy logic for the optimization of CNC milling parameters for Al–4.5%Cu–TiC MMCs with multi-performance characteristics. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v.19, p.857-865, 2016.
35. DÁVILA, J.L.; NETO, P.I.; NORITOMI, P.Y.; COELHO, R. T.; SILVA, L. V. L. Hybrid manufacturing: a review of the synergy between directed energy deposition and subtractive processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.110, p.3377–3390, 2020.
36. DEBROY, T.; WEI, H.L.; ZUBACK, J.S.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J.W.; MILEWSKI, J.O.; BEESE, A.M.; WILSON-HEID, A.; ZHANG, A. DE, W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v.92, p.112-224, 2018.
37. DERIMOW, N.; SCHWALBACH, E.J.; BENZING, J.T.; KILLGORE, J.P.; ARTUSIO-GLIMPSE, A.B.; HRABE, N.; SIMONDS, B.J. In situ absorption synchrotron measurements, predictive modeling, microstructural analysis, and scanning probe measurements of laser melted Ti-6Al-4V single tracks for additive manufacturing applications. **Journal of Alloys and Compounds**, v.900, p.163494, 2022.
38. DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H.; LARKIN, N.; VAN DUIN, S. Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v.37, p.130–50, 2016.
39. DRAGOMATZ, D.; MANN, S. A classified bibliography of literature on NC milling path generation. **Computer-Aided Design**, v.29, n.3, p.239–47, 1997.
40. DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.
41. DUTTA, B.; PALANISWAMY, S.; CHOI, J.; SONG, L.J.; MAZUMDER, J. Additive manufacturing by direct metal deposition. **Advanced Materials & Processes**, v.169, p.33–36, 2011.
42. EIAMSA-ARD, K.; NAIR, H.; REN, L.; RUAN, J.; SPARKS, T.; LIOU, F. Part Repair using a Hybrid Manufacturing System. **SFF Symposium**, Texas, EE.UU., 2005.
43. ELDAKROURY, M. A.; CHEN, N.; FRANK, M. C. A new method for locating candidate substrates for multi axis hybrid manufacturing systems. **Rapid Prototyping Journal**, v.24, n.2, p.237–248, 2018.

44. FARAHMAND, P.; KOVACEVIC, R. Parametric study and multicriteria optimization in laser cladding by a high-power direct diode laser. **Lasers in Manufacturing and Materials Processing**, v.1, p.1–20, 2014.
45. FLAUDI, J.; BAYLY, C.; BHOGAL, S.; IRIBARNE, M. Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs. traditional machining via life-cycle assessment. **Rapid Prototyping Journal**, v.21, n.1, p.14-33, 2015.
46. FLYNN, J.; SHOKRANI, A.; NEWMAN, S. T.; DHOKIA, V. Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.101, p.79–101, 2016.
47. GAO, S.; LIU, R.; HUANG, R.; SONG, X.; SEITA, M. A Hybrid Directed Energy Deposition Process to Manipulate Microstructure and Properties of Austenitic Stainless Steel. **Materials and Design**, v.213, p.110360, 2022.
48. GASSER, A. **Laser Metal Deposition**. In: Tailored light 2. RWTH Edition: Springer, 2011.
49. GENNA, S., LAMBIASE, F.; PONTICELLI, G.S. Fuzzy decision-making in laser-assisted joining of polymer-metal hybrid structures. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.108, p.61–72, 2020.
50. GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies**. Springer, 2010.
51. GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisas**. 10ª. tir. São Paulo: Atlas, 2008.
52. GOECKS, L. S.; DE SOUZA, M.; LIBRELATO, T. P.; TRENTO, L. R. Design Science Research in practice: review of applications in Industrial Engineering. **Gestão & Produção**, v.28, n.4, p.e5811, 2021.
53. GOMIDE, F.C.; GUDWIN, R.; TANSCHKEIT, R. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações**. In: Proc. 6th IFSA Congress-Tutorials, p.1–38, 1995.
54. GRAF, B., AMMER, S., GUMENYUK, A., RETHMEIER, M. Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and overhaul applications. **Procedia CIRP**, v.11, p245–248, 2013.
55. GUESSASMA, S.; ZHANG, W.; ZHU, J.; BELHABIB, S.; NOURI, H. Challenges of additive manufacturing technologies from an optimization perspective. **International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization**, v.6, n.A9, 2015.
56. HÄLLGREN, S.; PEJRYD, L.; EKENGREN, J. (Re)Design for Additive Manufacturing. **Procedia CIRP**, v.50, p.246–251, 2016.

57. HANSEL, A.; MORI, M.; FUJISHIMA, M.; ODA, Y.; HYATT, G.; LAVERNIA, E.; DELPLANQUE, J.P. Study on Consistently Optimum Deposition Conditions of Typical Metal Material Using Additive/Subtractive Hybrid Machine Tool. **Procedia CIRP**, v.46, p.579-582, 2016.
58. HATNA, A.; GRIEVE, R.J.; BROOMHEAD P. Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v.11, n.4, p.309-30, 1998.
59. HEVNER, A. R. A three-cycle view of design science research. **Scandinavian journal of information systems**, v.19, n.2, p.4, 2007.
60. HEVNER, A., MARCH, S. T., PARK, J., RAM, S. Design science research in information systems. **MIS Quarterly**, v.28, n.1, p.75-105, 2004.
61. HODONOU, C.; KERBRAT, O.; BALAZINSKI, M.; BROCHU, M. Process selection charts based on economy and environment: subtractive or additive manufacturing to produce structural components of aircraft. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, v.14, p.861-873, 2020.
62. HUANG, Y., ANSARI, M., ASGARI, H., HOSSEIN, M., FARSHIDIANFAR, M.H., SARKER, D., KHAMESEE, M.B., TOYSERKANI, E. Rapid prediction of real-time thermal characteristics, solidification parameters and microstructure in laser directed energy deposition (powder-fed additive manufacturing). **Journal of Materials Processing Technology**, v.274, p.116286, 2019.
63. ISO/ASTM 52900:2015. (2015). **Additive manufacturing - General principles - Terminology**. International Organization for Standardization (ISO) and American Society for testing and materials (ASTM).
64. IVARI, J. A. A Paradigmatic Analysis of Information Systems as a Design Science. **Scandinavian Journal of Information Systems**, v.19, n.2, p. 39-64, 2007.
65. JAFARIAN, M.; VAHDAT, S. EBRAHIM. A fuzzy multi-attribute approach to select the welding process at high pressure vessel manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v.14, n.3, p.250-256, 2012.
66. JENSEN CG, ANDERSON DC. A review of numerically controlled methods for finish-sculptured-surface machining. **IIE Transactions**, v.28, n.1, p.30-9, 1996.
67. JHAVAR, S. Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. **Engineering Failure Analysis**, v.34, p.519-535, 2013.
68. JIMÉNEZ, A.; BIDARE, P.; HASSANIN, H.; TARLOCHAN, F.; DIMOV, S.; ESSA, K. Powder-based laser hybrid additive manufacturing of

- metals: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.114, p.63–96, 2021.
69. JOSHI, A.; ANAND, A. Geometric Complexity Based Process Selection for Hybrid Manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v.10, n.513, p.578–89, 2017.
 70. KAPIL, A.; SUGA, T.; TANAKA, M.; SHARMA, A. Towards hybrid laser-arc based directed energy deposition: Understanding bead formation through mathematical modeling for additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v.76, p.457-474, 2022.
 71. KARUNAKARAN, K.P.; SURYAKUMAR, S.; PUSHPA, V.; AKULA, S. Low Cost Integration of Additive and Subtractive Processes for Hybrid Layered Manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v.26, n.5, p.490–99, 2010.
 72. KERBRAT, O.; MOGNOL, P.; HASCOËT, J.Y. A New DFM Approach to Combine Machining and Additive Manufacturing. **Computers in Industry**, v.62, n.7, p.684–92, 2011.
 73. KOVAC, P., RODIC, D., PUCOVSKY, V., SAVKOVIC, B., GOSTIMIROVIC, M. Application of fuzzy logic and regression analysis for modeling surface roughness in face milling. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.24, p.755–762, 2012.
 74. KULKARNI, P., MARSAN, A.; DUTTA, D. A review of process planning techniques in layered manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, v.6, n.1, p.18-35, 2000.
 75. KUMAR, L.J. Laser metal deposition repair applications for Inconel 718 alloy. **Materials Today: Proceedings**, v.4, p.11068–11077, 2017.
 76. KUMAR, S.P.L. State of The Art-Intense Review on Artificial Intelligence Systems Application in Process Planning and Manufacturing. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v.65, p.294-329, 2017.
 77. LACERDA, D.P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J.A.V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, v.20, n.4, p.741-761, 2013.
 78. LASEMI, A., XUE, D., GU, P. Accurate identification and compensation of geometric errors of 5-axis CNC machine tools using double ball bar. **Measurement Science and Technology**, v.27, n.5, p.055004, 2016.
 79. LASEMI, A.; XUE, D.; GU, P. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. **Computer Aided Design**, v.42, n.7, p.641–657, 2010.

80. LATHA, B.; SENTHILKUMAR, V.S. Modeling and analysis of surface roughness parameters in drilling GFRP composites using fuzzy logic. **Materials and Manufacturing Processes**, v.25, n.8, p.817–827, 2010.
81. LAUWERS, B.; KLOCKE, F.; KLINK, A.; TEKKAYA, A.E.; NEUGEBAUER, R.; MCINTOSH, D. Hybrid processes in manufacturing. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v.63, n.2, p.561-583, 2014.
82. LE, V. T., PARIS, H., MANDIL, G. Environmental impact assessment of an innovative strategy based on an additive and subtractive manufacturing combination. **Journal of Cleaner Production**, v.164, n. June, p.508–523, 2017a.
83. LE, V. T., PARIS, H., MANDIL, G. Extracting features for manufacture of parts from existing components based on combining additive and subtractive technologies. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, v.12, n.2, p.525–536, 2018a.
84. LE, V. T., PARIS, H., MANDIL, G. Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context. **Journal of Manufacturing Systems**, v.44, p.243–254, 2017c.
85. LE, V. T., PARIS, H., MANDIL, G. The development of a strategy for direct part reuse using additive and subtractive manufacturing technologies. **Additive Manufacturing**, v.22 (July), p.687–699, 2018b.
86. LE, V. T., PARIS, H., MANDIL, G. Using additive and subtractive manufacturing technologies in a new remanufacturing strategy to produce new parts from End-of-Life parts. **22nd Conference of French Mechanics (CFM2015)**, 24th-28th August, Lyon, France, p.1–8, 2015.
87. LE, V. T., PARIS, H., MANDIL, G., BRISSAUD, D. A direct material reuse approach based on additive and subtractive manufacturing technologies for manufacture of parts from existing components. **Procedia CIRP**, v.61, p.229–234, 2017b.
88. LEINO, M.; PEKKARINEN, J.; SOUKKA, R. The Role of Laser Additive Manufacturing Methods of Metals in Repair, Refurbishment and Remanufacturing—Enabling Circular Economy. **Physics Procedia**, v.83, p.752–760, 2016.
89. LI, J.; REN, H.; LIU, C.; SHANG, S. The Effect of Specific Energy Density on Microstructure and Corrosion Resistance of CoCrMo Alloy Fabricated by Laser Metal Deposition. **Materials**, v.12, n.8, p.3-15, 2019.
90. LIN, J.L., LIN, C.L. The use of grey-fuzzy logic for the optimization of the manufacturing process. **Journal of Materials Processing Technology**, v.160, n.1, p.9-14, 2005.
91. LIOU, F., LANDERS, R., CHOI, J., AGARWAL, S., JANARDHAN, V., BALAKRISHNAN, S. N. **Research and development of a hybrid rapid**

- manufacturing process.** In: Proceedings of the Twelfth Annual Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, August 6-8, 138-45, 2001.
92. LIOU, F., SLATTERY, K., KINSELLA, M., NEWKIRK, J., CHOU, H. N., LANDERS, R. Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication and repair of metallic structures. **Rapid Prototyping Journal**, v.13, n.4, p.236-244, 2007.
 93. LIU, R.; WANG, Z.; SPARKS, T.; LIOU, F.; NEDIC, C. Stereo Vision-Based Repair of Metallic Components. **Rapid Prototyping Journal**, v.23, n.1, p.65–73, 2017.
 94. LIU, S., KOVACEVIC, R. Statistical analysis and optimization of processing parameters in high-power direct diode laser cladding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.74, p.867–878, 2014.
 95. MA, M.; WANG, Z.; ZENG, X. Materials Characterization Effect of Energy Input on Microstructural Evolution of Direct Laser Fabricated IN718 Alloy. **Materials Characterization**, v.106, p.420–27, 2014.
 96. MAHAMOOD, R. M. **Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials.** Springer International Publishing AG 2018. Ed. 1
 97. MAMDANI, E.; ASSILIAN S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v.7, p.1–13, 1975.
 98. MANOGHARAN, G.; WYSK, R.; HARRYSSON, O.; AMAN, R. AIMS - A Metal Additive-hybrid Manufacturing System: System Architecture and Attributes. **Procedia Manufacturing**, v.1, p.273–286, 2015.
 99. MANSON, N. J. Is operations research really research? **Orion**, v.22, n.2, p.155-180, 2006.
 100. MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision support systems**, v.15, n.4, p.251-266, 1995.
 101. MARDANI, A.; JUSOH, A.; ZAVADSKAS, E.K. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications –two decades review from 1994 to 2014. **Expert Systems with Applications**, v.42, p.4126–4148, 2015.
 102. MASINELLI, G.; SHEVCHIK, S.A.; PANDIYAN, V.; QUANG-LE, T.; WASMER, K. Artificial Intelligence for Monitoring and Control of Metal Additive Manufacturing. In: **Meboldt, M., Klahn, C. (eds) Industrializing Additive Manufacturing.** AMPA 2020. Springer, Cham. 2021.

103. MAZUMDER, J. Laser assisted surface coatings. **In Metallurgical and Ceramic Protective Coatings**. Stern, K.H., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 1996.
104. MENZIES, I.; KOSHY, P. Assessment of abrasion-assisted material removal in wire EDM. **CIRP Annals- Manufacturing Technology**, v.57, n.1, p.195-148, 2008.
105. MOGNOL, P.; LOIC, J.; RIVETTE, M.; FURET, B. High Speed Milling, Electro Discharge Machining and Direct Metal Laser Sintering: A Method to Optimize These Processes in Hybrid Rapid Tooling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.29, n.1–2, p.35–40, 2006.
106. MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **Annals of Internal Medicine**, v.151, n.4, p.264-269, 2009.
107. MÜLLER, M.; WINGS, E. An Architecture for Hybrid Manufacturing Combining 3D Printing and CNC Machining. **International Journal of Manufacturing Engineering**, v.2016, p.1–12, 2016.
108. NAGESH, D.S.; DATTA, G.L. Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal arc welding using artificial neural networks. **Journal of Materials Processing Technology**, v.123, p.303–312, 2002.
109. NALLUSAMY, S.; GANESAN, M.; BALAKANNAN, K.; SHANKAR, C. Environmental sustainability evaluation for an automobile manufacturing industry using multi-grade fuzzy approach. **International Journal of Engineering Research in Africa**, v.19, p.123–129, 2015.
110. NASSEHI, A.; NEWMAN, S.; DHOKIA, V.; ZHU, Z.; ASRAI, R.I. Using formal methods to model hybrid manufacturing processes. **In: 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011)**, Montreal, Canada 2011, p.52–56.
111. NAU, B.; RODERBURG, A.; KLOCKE, F. Ramp-up of hybrid manufacturing technologies. **CIRP-Journal of Manufacturing Science and Technology**, v.4, n.3, p.313 – 316, 2011.
112. NEWMAN, S. T.; ZHU, Z.; DHOKIA, V.; SHOKRANI, A. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.64, p.467–470, 2015.
113. NEWMAN, S. T.; ZHU, Z.; DHOKIA, V.; SHOKRANI, A. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, n.64, p.467–470, 2016.
114. PRODANOV, C. C.; DE FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.

115. PUPO, Y.; DELGADO, J.; SERENÓ, L.; CIURANA, J. Scanning space analysis in selective laser melting for CoCrMo powder. **Procedia Engineering**, v.63, p.370–378, 2013.
116. RAJURKAR, K.P.; ZHU, D.; MCGEOUGH, J.A.; KOZAK, J.; DE SILVA A. New developments in electro-chemical machining. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v.48, n.2, p.567-579, 1999.
117. RAO, P.S.; GUPTA, O.P.; MURTY, S.S.N.; RAO, A.B.K. Effect of process parameters and mathematical model for the prediction of bead geometry in pulsed GMA welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.45, p.496–505, 2009.
118. REN, L.; PANACKAL, A.; RUAN, J.; SPARKS, T. E.; LIOU, F. W. Three Dimensional Die Repair Using a Hybrid Manufacturing System. **Solid Freeform Fabrication Proceedings 2006**, University of Texas Press, Jan. 2006.
119. REN, L.; SPARKS, T.; RUAN, J.; LIOU, F. Process planning strategies for solid freeform fabrication of metal parts. **International Journal of Industrial and Manufacturing Systems Engineering**, v.27, p.158–65, 2008.
120. ROMI. ROMI DCM 620-5X HYBRID Technical specifications. Available in: https://www.romi.com/wp-content/uploads/2017/10/foI_romi_dcm_hybrid_po_aa_052017_baixa.pdf.
121. ROSSI, A.; LANZETTA, M. Integration of Hybrid Additive/Subtractive Manufacturing Planning and Scheduling by Metaheuristics. **Computers and Industrial Engineering**, v.144, (November), 2020.
122. RUAN, J.; EIAMSA-ARD, K.; LIOU, F. W. Automatic process planning and toolpath generation of a multiaxis hybrid manufacturing system. **Journal of Manufacturing Processes**, v.7, n.1, p.57–68, 2005.
123. RUIZ, J.E.; GONZÁLEZ, H.; CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J.I.; LAMIKIZ, A. IBR manufacturing by hybrid combination of laser metal deposition and machining process. In **Proceedings of the 26th International Conference on Advanced Nanotechnology**, Moscow, Russia, 4–5 October 2018; v.4, p.62–63.
124. SAADE, J.J., DIAB, H.B. Defuzzification methods and new techniques for fuzzy controllers. **Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering**, v.3, p.161-174, 2004.
125. SABOORI, A.; GALLO, D.; BIAMINO, S.; FINO, P.; LOMBARDI, M. An overview of additive manufacturing of titanium components by directed energy deposition: microstructure and mechanical properties. **Applied Science**, v.7, p.883, 2017.

126. SAHU, R.K.; MAHAPATRA, S.S.; SOOD, A.K. A study on dimensional accuracy of fused deposition modelling (FDM) processed parts using fuzzy logic. **Journal for Manufacturing Science and Production**, v.13, n.3, p.183–197, 2013.
127. SAI, T., PATHAK, V.K.; SRIVASTAVA, A. Modeling and optimization of fused deposition modeling (FDM) process through printing PLA implants using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model and whale optimization algorithm. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v.42, p.617, 2020.
128. SALONITIS, K.; ZARBAN, S.A. Redesign Optimization for Manufacturing Using Additive Layer Techniques. **Procedia CIRP**, v.36, p.193–198, 2015.
129. SAQIB, S.; URBANIC, R. J.; AGGARWAL, K. Analysis of laser cladding bead morphology for developing additive manufacturing travel paths. **Variety Management in Manufacturing. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems**, v.17, p.824–829, 2014.
130. SCHMIDT, M.; MERKLEIN, M.; BOURELL, D.; DIMITROV, D.; HAUSOTTE, T.; WEGENER, K.; OVERMEYER, L.; VOLLERTSEN, F.; LEVY, G. N. Laser based additive manufacturing in industry and academia. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, n.66, p.561–583, 2017.
131. SIBISI, P.N.; POPOOLA, A.P.I.; ARTHUR, N.K.K.; PITYANA, S.L. Review on direct metal laser deposition manufacturing technology for the Ti-6Al-4V alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.107, p.1163–1178, 2020.
132. SIMON, H. A. **The Sciences of the Artificial**. 3rd ed. Cambridge: MIT Press, 1996.
133. SINGH, P; DUTTA, D. Multi-direction slicing for layered manufacturing. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, v.1, p.129, 2001.
134. SINGH, R. K.; SINGH, D. K.; GANGWAR, S. Fuzzy logic optimization of process parameters affecting surface temperature in MAF. **IOP Conference Series. Materials Science and Engineering**, Bristol v.404, 2018.
135. SINGH, S.; RAMAKRISHNA, S.; SINGH, S. Issues in additive manufacturing: A review. **Journal of Manufacturing Processes - Review Material**, n.25, p.185–200, 2017.
136. SRIVASTAVA, M.; RATHEE, S.; MAHESHWARI, S.; KUNDRA, T.K. Multi-objective optimisation of fused deposition modelling process parameters using RSM and fuzzy logic for build time and support material. **International Journal of Rapid Manufacturing**, v.7, p.25–42, 2018.

137. SUN, Y.; HAO, M. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd: YAG laser. **Optics and Lasers in Engineering**, v.50, n.7, p.985–995, 2012.
138. SUPRIADI, S.; MANABE, K. Enhancement of dimensional accuracy of dieless tube-drawing process with vision-based fuzzy control. **Journal of Materials Processing Technology**, v.213, n.6, p.905-912, 2013.
139. SUSILAWATI, A.; TAN, J.; BELL, D.; SARWAR, M. Fuzzy logic based method to measure degree of lean activity in manufacturing industry. **Journal of Manufacturing Systems**, v.34, p.1–11, 2015.
140. SWAMIDASS, P.M. **Process Planning**. In: Encyclopedia of Production and Manufacturing Management. Springer, Boston, MA. 2000.
141. SWIFT, K.G.; BOOKER, J.D. **Process Selection: From Design to Manufacture**. Second Edition, Butterworth-Heinemann, p. 316, 2003.
142. TAN, H.; TARASOV, V.; JARFORS, A.E.W.; SEIFEDDINE, S. A design of fuzzy inference systems to predict tensile properties of as-cast alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.113, p. 1111–1123, 2021.
143. THOMPSON, M. K.; MORONI, G.; VANEKER, T.; FADEL, G.; CAMPBELL, R. I.; GIBSON, I.; MARTINA, F. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. **CIRP Annals**, v.65, n.2, p.737-760, 2016.
144. TOFAIL, S. A. M.; KOUMOULOS, E. P.; BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S.; O'DONOGHUE, L.; CHARITIDIS, C. Additive manufacturing scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. **Materials Today**, v.21, n.1, p.22-37, 2018.
145. URBANIC, R. J.; HEDRICK, R. W.; SAQUIB, S.; NAZEMI, N. Material Bead Deposition with 2 + 2 ½ Multi-Axis Machining Process Planning Strategies with Virtual Verification for Extruded Geometry. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.95, n.9–12, p.3167–84, 2018.
146. URBANIC, R.J.; SAQIB, S.M.; AGGARWAL, K. Using predictive modeling and classification methods for single and overlapping bead laser cladding to understand bead geometry to process parameter relationships. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v.138, n.5, p.051012, 2016.
147. WANG, Z., LIU, R., SPARKS, T., LIU, H., LIOU, F. Stereo vision-based hybrid manufacturing process for precision metal parts. **Precision Engineering**, v.42, p.1–5, 2015.
148. WILSON, J.M.; PIYA, C.; SHIN, Y.C.; ZHAO, F.; RAMANI, K. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its

- energy and environmental impact analysis. **Journal of Cleaner Production**, v.80, p.170–178, 2014.
149. WU, B.H.; WANG, J-J.J., A neuro-fuzzy approach to generating mold/die polishing sequences. **Journal of Materials Processing Technology**, v.209, n.7, p.3241-3250, 2009.
 150. WU, J.; LIU, T.; CHEN, H.; LIA, F.; WEI, H.; ZHANG, Y. Simulation of laser attenuation and heat transport during direct metal deposition considering beam profile. **Journal of Materials Processing Technology**, v.270, p.92–105, 2019.
 151. XIAO, Z.; YANG, Y.; XIAO, R.; BAI, Y.; SONG, C.; WANG, D. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting. **Materials & Design**, v.143, p.27-37, April 5, 2018.
 152. XU, X.; WANG, L.; NEWMAN, S. T. Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v.24, n.1, p.1-31, 2011.
 153. YU, T., ZHAO, Y., SUN, J., CHEN, Y., QU, W. Process parameters optimization and mechanical properties of forming parts by direct laser fabrication of YCF101 alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v.262 (May), p.75–84, 2018.
 154. YUSOF, Y.; LATIF, K. Survey on computer-aided process planning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.75, n.1-4, p.77–89, 2014.
 155. ZADEH, L.A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v.8, p.338-353, 1965.
 156. ZEKOVIC, S.; DWIVEDI, R.; KOVACEVIC, R. Numerical simulation and experimental investigation of gas–powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.47, p.112–123, 2007.
 157. ZELINSKI, P. **Panel Discusses Promise and Challenges of Both Additive and Hybrid Machines**. Additive Manufacturing Magazine. 2015. Available online: <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/panel-discusses-promise-and-challenges-of-both-additive-and-hybrid-machines> - (Acesso em Fev., 2018).
 158. ZHANG, D.; XU, J.; LI, Z.; LI, K.; WANG, C.; SHAN, C.; GUO, B. Removal mechanism of blue paint on aluminum alloy substrate during surface cleaning using nanosecond pulsed laser. **Optics & Laser Technology**, v.149, 2022
 159. ZHANG, W.; SOSHI, M.; YAMAZAKI, K. Development of an additive and subtractive hybrid manufacturing process planning strategy of planar

- surface for productivity and geometric accuracy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.109, n.5–6, p.1479–1491, 2020.
160. ZHANG, Y.; BERNARD, A.; GUPTA, R.K.; HARIK, R. Feature based building orientation optimization for additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, v.22, p.358–76, 2016.
 161. ZHENG, Y.; LIU, J.; AHMAD, R. A cost-driven process planning method for hybrid additive–subtractive remanufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v.55 (March), p.248–263, 2020.
 162. ZHU, Z.; DHOKIA, V.; NASSEHI, A.; NEWMAN, S. T. A review of hybrid manufacturing processes - State of the art and future perspectives. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v.26, n.7, p.596–615, 2013a.
 163. ZHU, Z.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. The development of a novel process planning algorithm for an unconstrained hybrid manufacturing process. **Journal of Manufacturing Processes**, v.15, n.4, p.404–413, 2013b.
 164. ZIMMERMANN, H.-J. **Fuzzy set theory and its applications**. 4th ed. Springer Science + Business Media New York, 2001.

ANEXO**ANEXO 1. MÁQUINA HÍBRIDA ROMI DCM 620-5X HYBRID**

FIGURA 45. VISTA FRONTAL E LATERAL DO SISTEMA HÍBRIDO USADO NOS EXPERIMENTOS

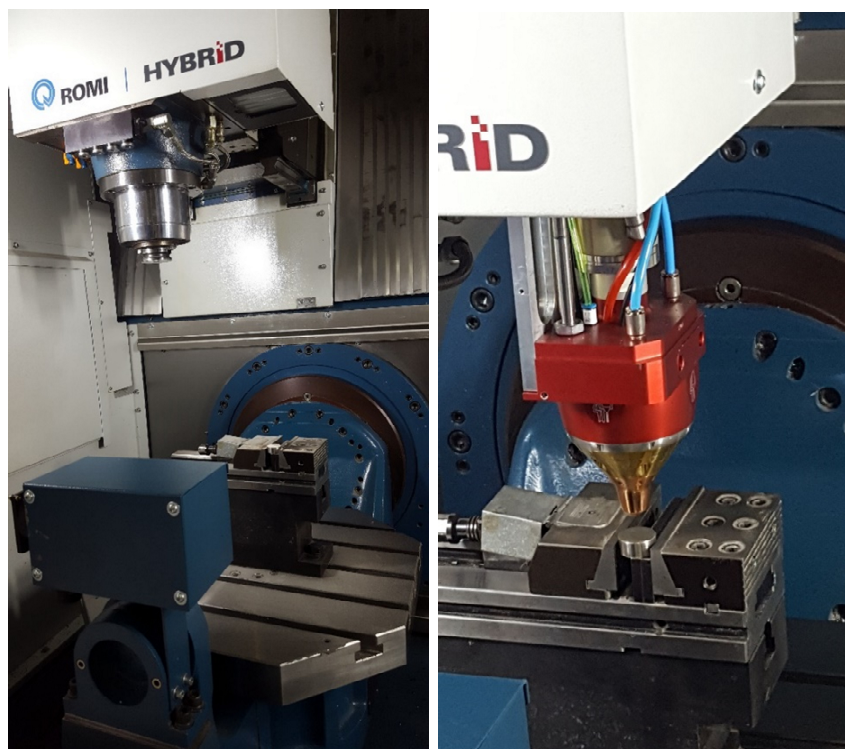


FIGURA 46. CABEÇOTE DE USINAGEM E MESA ROTATIVA (EZQ.) E CABEÇOTE DO LASER E AMOSTRA ANTES DE EXECUTAR A DEPOSIÇÃO DE METAL (DIR.)



FIGURA 47. MÓDULO DO CABEÇOTE LASER E O CABEÇOTE DE USINAGEM



FIGURA 48. MÓDULO DE FORNECIMENTO DO PÓ