UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JÚLIA FORNAZIERO DE ALMEIDA

Título: Adoção de Manufatura Aditiva (MA) para Metais em Empresas:
Identificação de Barreiras e Proposta de Roteiro para Implementação

São Carlos

2021

JÚLIA FORNAZIERO DE ALMEIDA

Título: Adoção de Manufatura Aditiva (MA) para Metais em Empresas:
Identificação de Barreiras e Proposta de Roteiro para Implementação

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como requisito para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira
Coelho

Versão corrigida
(Versão original disponível no Programa alojado pela Unidade)

São Carlos

2021

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

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

A447a Almeida, Júlia Fornaziero de
Adoção de Manufatura Aditiva (MA) para Metais em Empresas: Identificação de Barreiras e Proposta de Roteiro para Implementação / Júlia Fornaziero de Almeida; orientador Reginaldo Teixeira Coelho. São Carlos, 2021.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Manufatura aditiva. 2. Metais. 3. Impressão 3D. 4. Barreiras. 5. Roteiro. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenharia **JÚLIA FORNAZIERO DE ALMEIDA.**

Título da dissertação: "Adoção de manufatura aditiva (MA) para metais em empresas: identificação de barreiras e proposta de roteiro para implementação".

Data da defesa: 11.05.2021

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Titular **Reginaldo Teixeira Coelho**

APROVADA

(Orientador)

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

Prof. Dr. **Eduardo de Senzi Zancul**

APROVADA

(Escola Politécnica/EP-USP)

Prof. Dr. **Leandro João da Silva**

APROVADA

(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:

Profa. Dra. **Janaina Mascarenhas Hornos da Costa**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação: Prof.

Titular **Murilo Araujo Romero**

*Dedico este trabalho aos meus pais
Mário e Vani e irmãos Gabriela e
João pelo apoio, incentivo e carinho
ao longo desta jornada.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por sempre guiar os meus passos e me ajudar a enfrentar os obstáculos que surgem no meu caminho, me dando forças e fé para continuar.

Meus agradecimentos a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, em especial:

A minha família, por sempre estarem ao meu lado, me incentivando a buscar o novo e crescer como pessoa e profissional.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho, por me guiar nestes primeiros passos no mundo acadêmico, me auxiliando e apoiando como orientador.

Aos professores Dr. Eduardo de Senzi Zancul, Dr. Daniel Capaldo Amaral, Dr. Mateus Cecilio Gerolamo, e Dr. Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti, pelo auxílio, possibilitando a união de diferentes áreas de conhecimento no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos especialistas que participaram das entrevistas e preencheram o questionário, por se disponibilizarem a ajudar e por todo o conhecimento compartilhado.

A equipe do laboratório LAPRAS, pela amizade, pelos conselhos e auxílio na pesquisa. Assim com aos colegas de disciplinas e projetos, pelo compartilhamento de conhecimentos que foram de grande ajuda.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço pela bolsa de mestrado que permitiu a ampliação dos meus conhecimentos e o desenvolvimento desta pesquisa.

“Aprender é a única coisa que a mente
nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se
arrepende”

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

ALMEIDA, J. F. **Adoção de Manufatura Aditiva (MA) para Metais em Empresas:** Identificação de Barreiras e Proposta de Roteiro para Implementação. 2021. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

A Manufatura Aditiva (MA) para metais é uma tecnologia que vem se destacando e mostrando um potencial capaz de revolucionar os processos produtivos e eliminar muitas limitações dos processos tradicionais, normalmente baseados em remoção e conformação de metais. Mostra-se como um dos principais aspectos relevantes de transição para a Indústria 4.0. No entanto, como se trata de uma nova tecnologia, poucos estudos sobre a adoção da MA para metais dentro das empresas têm sido realizados, o que pode gerar diversas dificuldades na implementação, tais como a definição do processo adequado, a escolha da tecnologia e da máquina de MA, desenvolvimento do produto e do processo, dentre outros fatores essenciais para essa evolução industrial. Neste cenário, este estudo busca identificar as barreiras da adoção da MA para metais, dando destaque para os processos Powder Bed Fusion (PBF) e Directed Energy Deposition (DED), apresentar uma proposta de superação das barreiras, assim como desenvolver um roteiro genérico para a implementação desta tecnologia nas empresas. As barreiras foram identificadas através de uma revisão bibliográfica sistemática, e utilizando a metodologia Design Research o roteiro de adoção foi desenvolvido para auxiliar a superação das barreiras, tendo com base modelos de gestão tradicional e gestão ágil. Após a identificação das barreiras e desenvolvimento do roteiro, estes foram apresentados aos especialistas da área para a avaliação através de um questionário. As barreiras mais críticas atualmente foram destacadas, e as não identificadas na literatura realçadas. O roteiro apresentando as etapas para a adoção da MA e as práticas para gestão foram avaliados positivamente, sendo visto como modelo que pode orientar a adoção da MA para metais nas empresas. Por fim, este estudo busca auxiliar a implementação da MA para metais em empresas de diversos setores. Trazendo cada vez mais esta tecnologia para o sistema produtivo nacional, revolucionando os processos de fabricação, rumo à Indústria 4.0.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Metais. Impressão 3D. Barreiras. Roteiro.

ABSTRACT

ALMEIDA, J. F. **Adoption of Additive Manufacturing (MA) for Metals in Companies: Identification of Barriers and Roadmap Proposal for Implementation.** 2021. 98 p. Dissertation (Master in Production Engineering) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2021.

Additive Manufacturing (AM) for metals is a technology that has been increasingly standing out and showing a potential capable of revolutionizing the manufacturing process and eliminating many limitations of traditional processes, usually based on removal and forming of metals. It is one of the main relevant aspects of the transition towards Industry 4.0. However, as a new technology, relatively few studies addressing the implementation of metal AM in companies have been conducted. Consequently, few significant difficulties, such as the definition of the appropriate process, the choice of AM technology and which machines, product and process development, amongst other essential factors, may present in the way for such industrial revolution. In such scenario, the present study intends to identify the barriers of AM for metals adoption, highlighting two processes, Powder Bed Fusion (PBF) and Directed Energy Deposition (DED), present a proposal to overcome barriers, as well as develop a generic roadmap for the implementation of this technology in companies. The barriers were identified through a systematic literature review, and using the Design Research methodology the roadmap for adoption was developed to support and help to overcome the barriers, based on traditional and agile management models. After identifying the barriers and developing the roadmap, these were presented to experts in the field for evaluation through a questionnaire. The most critical barriers today have been highlighted and those not identified in the literature emphasized. The roadmap presenting the steps to AM adoption and the management practices were positively evaluated, being seen as a model that can guide the adoption of AM for metals in companies. Finally, this study aims to assist the implementation of MA for metals in companies from different sectors, increasingly bringing this technology to the national production system, revolutionizing the manufacturing processes, on the road to Industry 4.0.

Keywords: Additive Manufacturing. Metals. 3D Printing. Barriers. Roadmap.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Tipos de processo de MA e aplicações	7
Figura 2: Princípios do processo PBF	9
Figura 3: Esquema de um típico processo DED para laser em pó	10
Figura 4: Aplicações da MA para metais	12
Figura 5: Diferentes níveis de adoção da MA	14
Figura 6: Benefícios da adoção da MA	15
Figura 7: Modelo de Referência para o Desenvolvimento de Produtos	19
Figura 8: Padrão de Iteração da Gestão Ágil	20
Figura 9: DRM <i>Framework</i>	22
Figura 10: Esquema da Metodologia da Pesquisa	24
Figura 11: Típica tela da ferramenta de RBS, primeiro filtro	26
Figura 12: Protocolo PRISMA adaptado para a metodologia de Conforto, Amaral e Silva (2011)	27
Figura 13: Quantidade de publicações na base de dados <i>Scopus</i>	30
Figura 14: Quantidade de publicações na base de dados <i>Web of Science</i>	31
Figura 15: Classificação das Barreiras identificadas na literatura.....	31
Figura 16: Sequência de superação das barreiras	46
Figura 17: Roteiro para a adoção da MA	47
Figura 18: Estrutura das normas de MA para ASTM e ISO	57
Figura 19: Ambiente de atuação dos entrevistados	58
Figura 20: Avaliação das Classes de Barreiras (Questão 1)	59
Figura 21: Barreiras Organizacionais (Questão 2)	60
Figura 22: Barreiras Educacionais (Questão 4)	61
Figura 23: Barreiras Tecnológicas Relacionadas ao Design (Questão 6)	63
Figura 24: Barreiras Tecnológicas Relacionadas ao Processo (Questão 8).....	64
Figura 25: Barreiras Financeira (Questão 10)	65
Figura 26: Barreiras de Qualidade (Questão 12)	67
Figura 27: Barreiras de Projeto (Questão 14)	68
Figura 28: Barreiras Normativas (Questão 16).....	69
Figura 29: Barreiras Ambientais (Questão 18).....	70
Figura 30: Análise da Questão 20.....	74

Figura 31: Análise da Questão 22.....	76
---------------------------------------	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Definição dos Pilares da Indústria 4.0	5
Quadro 2: Tipos de Design Research	23
Quadro 3: Barreiras Identificadas na RBS	41
Quadro 4: Cotação de máquina DED	50
Quadro 5: Barreiras mais críticas de acordo com a avaliação de especialistas	71
Quadro 6: Barreiras destacadas pelos especialistas, não identificadas na literatura	72
Quadro 7: Artigos aceitos na revisão sistemática	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMF	–	Additive Manufacturing File
AMSC	–	Additive Manufacturing Standardization Collaborative
ANSI	–	National Additive Manufacturing Innovation Institute
APM	–	Agile Project Management
ASTM	–	American Society for Testing and Materials
AWS	–	American Welding Society
CAD	–	Computer-Aided Design
CAM	–	Computer-Aided Manufacturing
CNC	–	Computer Numeric Control
DED	–	Directed Energy Deposition
DfAM	–	Design for AM
DMD	–	Direct Metal Deposition
DMLS	–	Direct Metal Laser Sintering
DOCS	–	Denison Organizational Culture Survey
DPd	–	Desenvolvimento do Produto
DPc	–	Desenvolvimento do Processo
DRM	–	Design Research Methodology
EB	–	Electron Beam
EBAM	–	Electron Beam Additive Manufacturing
EBF3	–	Electron Beam Freeform Fabrication
EBM	–	Electron Beam Melting
I4.0	–	Indústria 4.0
ICTs	–	Instituições de Ciência e Tecnologia
IoT	–	Internet of Things
ISO	–	International Organization for Standardization

LaPES	–	Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software
LENS	–	Laser Engineered Net Shape
LMD	–	Laser Metal Deposition
LPBF	–	Laser Powder Bed Fusion
MA	–	Manufatura Aditiva
MH	–	Manufatura Híbrida
MLCPM	–	Multi-Layer Classifier for Process Monitor
OCAI	–	Organizational Culture Assessment Instrument
OCI	–	Organizational Culture Inventory
OCP	–	Organizational Culture Profile
PA-DED	–	Plasma arc based systems
PBF	–	Powder Bed Deposition
PMEs	–	Pequenas e Média Empresas
RBS	–	Revisão Bibliográfica Sistemática
SHS	–	Selective heat sintering
SLM	–	Selective Laser Melting
SLS	–	Selective Laser Sintering
StArt	–	State of the Art through Systematic Review
STL	–	Standard Tessellation Language
WHASPs	–	Workstations for Hybrid Additive and Subtractive Processes

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. INDÚSTRIA 4.0 (I4.0).....	4
2.2. MANUFATURA ADITIVA (MA).....	6
2.2.1. <i>Manufatura Aditiva para Metais</i>	7
2.2.1.1. Processo Powder Bed Fusion (PBF)	8
2.2.1.2. Processo Directed Energy Deposition (DED)	9
2.2.1.3. Manufatura Híbrida (MH).....	11
2.2.2. <i>Áreas de aplicação</i>	12
2.2.3. <i>Nível de Adoção da MA</i>	14
2.2.4. <i>Benefícios da MA nas empresas</i>	15
2.2.5. <i>Barreiras da MA</i>	17
2.3. MODELOS DE GESTÃO.....	18
2.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS)	21
2.5. METODOLOGIA <i>DESIGN RESEARCH</i>	21
3. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	24
3.1. PARTE I - IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS NA ADOÇÃO DA MA PARA METAIS	24
3.1.1. <i>Entradas</i>	25
3.1.2. <i>Processamento</i>	25
3.1.3. <i>Saída</i>	27
3.2. PARTE II - DESENVOLVIMENTO DE ROTEIRO PARA ADOÇÃO DA MA NAS EMPRESAS...28	
3.2.1. <i>Esclarecimento da Pesquisa</i>	28
3.2.2. <i>Estudo Descritivo I</i>	28
3.2.3. <i>Estudo Prescritivo</i>	28
3.2.4. <i>Estudo Descritivo II</i>	29
3.3. PARTE III – ENTREVISTA COM ESPECIALISTAS PARA AVALIAÇÃO DO CONTEÚDO DESENVOLVIDO.....	29
4. RESULTADOS.....	30
4.1. PARTE I: IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS	30
4.1.1. <i>Barreiras Organizacionais</i>	32
4.1.2. <i>Barreiras Educacionais</i>	33

4.1.3.	<i>Barreiras Tecnológicas</i>	34
4.1.4.	<i>Barreiras Financeiras</i>	36
4.1.5.	<i>Barreiras da Qualidade</i>	36
4.1.6.	<i>Barreiras de Projeto</i>	38
4.1.7.	<i>Barreiras Normativas</i>	39
4.1.8.	<i>Barreiras Ambientais</i>	41
4.2.	PARTE II: ROTEIRO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MA	45
4.2.1.	<i>Fase de Pré-desenvolvimento</i>	47
4.2.1.1.	Análise Cultural	48
4.2.1.2.	Estudo da Tecnologia	48
4.2.1.3.	Identificação de Oportunidades	48
4.2.1.4.	Estudo de viabilidade	49
4.2.2.	<i>Fase de Desenvolvimento</i>	51
4.2.2.1.	Desenvolvimento do Produto (DPd)	51
4.2.2.1.1.	Design para a MA (DfAM)	51
4.2.2.1.2.	Construção da Peça	52
4.2.2.1.3.	Testes	52
4.2.2.1.4.	Avaliação pelo cliente	53
4.2.2.2.	Desenvolvimento do processo (DPc)	53
4.2.2.2.1.	Ajuste do processo	54
4.2.2.2.2.	Tryout	54
4.2.2.2.3.	Gestão da qualidade	54
4.2.2.2.3.1.	Monitoramento	55
4.2.2.2.3.2.	Estudo de Normas	55
4.2.3.	<i>Fase de Pós-desenvolvimento</i>	57
4.2.3.1.	Supervisão do Processo	58
4.3.	PARTE III: ENTREVISTA COM ESPECIALISTAS	58
4.3.1.	<i>Avaliação das Barreiras</i>	59
4.3.1.1.	Questão 1: Das classes de barreiras apresentadas (Figura 15), quais acredita serem as mais críticas na adoção da MA para metais?	59
4.3.1.2.	Questão 2: Das barreiras organizacionais quais acredita serem as mais críticas?	60
4.3.1.3.	Questão 3: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras organizacionais?	60

4.3.1.4. Questão 4: Das barreiras educacionais quais acredita serem as mais críticas?.....	61
4.3.1.5. Questão 5: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras educacionais?..	62
4.3.1.6. Questão 6: Das barreiras tecnológicas relacionadas ao design quais acredita serem as mais críticas?	62
4.3.1.7. Questão 7: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras tecnológicas relacionadas ao design?	63
4.3.1.8. Questão 8: Das barreiras tecnológicas relacionadas ao processo quais acredita serem as mais críticas?	64
4.3.1.9. Questão 9: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras tecnológicas relacionadas ao processo?.....	65
4.3.1.10. Questão 10: Das barreiras financeiras quais custos são mais críticos?.....	65
4.3.1.11. Questão 11: Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras financeiras?..	66
4.3.1.12. Questão 12: Das barreiras de qualidade quais acredita serem as mais críticas?.....	66
4.3.1.13. Questão 13: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras de qualidade?..	66
4.3.1.14. Questão 14: Das barreiras de projeto quais acredita serem as mais críticas? ..	68
4.3.1.15. Questão 15: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras de projeto? ...	68
4.3.1.16. Questão 16 : Das barreiras normativas quais acredita serem as mais críticas?.....	69
4.3.1.17. Questão 17: Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras normativas?..	70
4.3.1.18. Questão 18: Das barreiras Ambientais quais acredita serem as mais críticas?.....	70
4.3.1.19. Questão 19: Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras ambientais? ..	70
4.3.2. Parte 2: Avaliação da viabilidade do roteiro.....	74
4.3.2.1. Questão 20: Acha que o roteiro apresentado poderia auxiliar a adoção da MA dentro das empresas?	74
4.3.2.2. Questão 21: Das etapas apresentadas teria algumas que gostaria de destacar, como sendo de maior importância?	74
4.3.2.3. Questão 22: Teria alguma etapa que acha desnecessária?	75
4.3.2.4. Questão 23: O uso das ferramentas da gestão ágil apresentadas (backlog, daily meeting, iterações) seriam interessantes para a adoção da MA?.....	75
4.3.2.5. Questão 24: Teria alguma outra ferramenta de gestão que adicionaria ao modelo?	76

4.3.2.6. Questão 25: Sugere alguma modificação interessante a fazer no modelo?	76
4.3.2.7. Questão 26: Acha que esta pesquisa beneficiaria a aplicação da MA em todos os setores industriais ou em algum setor mais específico?.....	77
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	79
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A – QUADRO DE ARTIGOS ACEITOS NA RBS	88
APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO PREENCHIDO POR ESPECIALISTAS (GOOGLE FORMS)	93

1. INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA), ainda muito conhecida como impressão 3D, é um dos nove pilares da quarta revolução industrial conhecida com indústria 4.0 (I4.0). Essa nova era digital permitiu que a MA evoluísse e modelos desenvolvidos em softwares CAD fossem produzidos camada a camada em uma impressora 3D, usando principalmente polímeros como matéria-prima.

A Manufatura Aditiva (MA) é mais que apenas um novo processo de fabricação, pois muda a forma como os produtos são distribuídos (cadeia de suprimentos e logística), projetados (otimização topológica e consolidação da peça), permitindo a produção de lotes pequenos, de até uma única peça, de forma econômica, com um mínimo de desperdícios, e em tempo de fabricação muito menor do que os processos tradicionais (WANG, 2018). A MA é uma tecnologia disruptiva, que pode ser combinada com outras tecnologias e gerar novos negócios (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Porém sua implementação requer várias mudanças nos sistemas de produção existentes (MCGUIRE; RICE, 2019).

Grande parte dos agentes de mudança em empresas, ainda hoje veem a manufatura como os sistemas produtivos do passado, tornando assim um grande desafio a mudança da sua "imagem" mental de fabricação (WANG, 2018). Strong et al. (2017) ao entrevistar pessoas em empresas, destacou um dos comentários feito pelos entrevistados de que há uma necessidade de educar os clientes sobre o potencial do processo e da tecnologia, uma vez que a MA é algo emergente e que passa por um processo de adoção muito lento no mercado.

Hoje a gama de materiais utilizados para processar peças em MA tem ampliado e peças metálicas já podem ser criadas e produzidas usando-se os conceitos de MA. A possibilidade de produzir peças em metal, mais leves, complexas e para protótipos funcionais em menor tempo que aquelas produzidas de forma tradicional, têm chamado à atenção da indústria, de forma que o desejo pela adoção desta tecnologia já tem sido realizado por algumas empresas.

Tecnologias de MA baseadas em laser, como fonte de energia, foram descobertas na década de 1980, sendo *Powder Bed Deposition* (PBF) e *Directed Energy Deposition* (DED) os dois métodos mais conhecidos e comercializados atualmente (VARTANIAN; MCDONALD, 2016). Em poucas décadas a MA passou de processos para prototipagem à fabricação completa de peças funcionais (SACCO; MOON, 2019).

Implementar uma nova tecnologia como a MA pode ser um desafio para as empresas. Cada setor interno pode visualizar o desenvolvimento de um projeto usando MA a partir do ponto de vista de suas próprias atividades. A área de marketing, por exemplo, avalia o processo como perfeitamente realizável, desde a estimativa de mercado até a obtenção do produto final. A engenharia se concentra mais na superação de dificuldades técnicas, como um desafio tecnológico. O sistema de produção fica apreensivo mediante o impacto que deve sofrer com as modificações, buscando garantir a entrega sem dar atenção ao como produzir. E a área financeira se preocupa mais com o impacto monetário do projeto e não com as razões tecnológicas (ROZENFELD et al., 2006).

Segundo uma análise realizada por Niaki e Nonino (2017) a MA para metais está entre os casos de maior sucesso da tecnologia. A MA tem potencial para se tornar uma tecnologia essencial para a produção em série (SIEBOLD, 2019). Segundo Jiménez et al. (2019) a MA é “um dos principais processos industriais revolucionários dos próximos anos”.

1.1.Objetivos

Este estudo tem como objetivos, identificar por meio de uma revisão sistemática da literatura (RBS) as barreiras encontradas pelas organizações na adoção da MA para metais, e utilizando a metodologia *Design Research* propor um roteiro que apresente uma visão geral e completa do processo de implementação da MA. Assim, todos os setores conhecerão a tecnologia, facilitando a comunicação entre eles. O roteiro desenvolvido nesta pesquisa tem um aspecto geral, mas poderá ser adaptado de acordo com as necessidades particulares de cada empresa. As questões que guiam este trabalho são:

Q1: Quais barreiras na adoção da MA são identificadas na literatura?

Q2: Como orientar as equipes, que implementarão MA em empresas, na superação das barreiras para adoção da tecnologia?

O caminho para implementar a MA não é único e o roteiro desenvolvido nesta pesquisa representa um território incerto entre dois pontos: a) onde a empresa está e b) onde quer chegar com a MA. No entanto o roteiro é um meio para se alcançar a implementação. A maneira como introduzir a MA faz a diferença, e este trabalho busca auxiliar estes primeiros passos, para orientar a equipe que vai estudar e implementar a MA.

Por fim, com a conclusão deste trabalho, espera-se estimular o desenvolvimento de pesquisas futuras para superar as barreiras identificadas e auxiliar a implementação da MA na

indústria, a fim de unir a academia e empresas, favorecendo a evolução tecnológica rumo a indústria 4.0.

A presente dissertação tem caráter exploratório, utilizando como métodos de pesquisa a revisão bibliográfica sistemática (RBS), e o Design Research (*Design Research Methodology* - DRM). O roteiro desenvolvido foi apresentado individualmente a especialistas (de empresas, da academia e de instituições de pesquisa), seguido da aplicação de um questionário para a avaliação das barreiras identificadas e do roteiro desenvolvido.

1.2.Estrutura da Dissertação

No capítulo 1 foi apresentado o contexto, os objetivos e o método utilizado na pesquisa. O capítulo 2 fornece uma revisão da literatura para dar estrutura à dissertação, tendo como base uma revisão exploratória. O capítulo 3 demonstra a elaboração da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), explica a proposta de superação das barreiras identificadas na RBS, a metodologia Design Research é apresentada explicando a elaboração do roteiro desenvolvido, relatando também a forma como as entrevistas foram realizadas. No capítulo 4 os resultados são apresentados e as barreiras encontradas são classificadas, o roteiro desenvolvido e suas etapas são descritos, assim como os resultados das entrevistas são discutidos. No capítulo 5 a conclusão é retratada, retomando os objetivos e demonstrando como foram atingidos, apresentando as limitações encontradas. E no capítulo 6 são propostos trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão exploratória inicial foi realizada para apresentar os tópicos relacionados à pesquisa, trazendo os conceitos de indústria 4.0 (I4.0), Manufatura Aditiva (MA), e Manufatura Aditiva para metais com foco nos processos PBF, DED e Manufatura Híbrida (MH). São apresentadas algumas áreas de aplicação, os níveis de adoção da MA, os benefícios da MA nas empresas, as barreiras da MA e modelos de gestão.

2.1. Indústria 4.0 (I4.0)

Antes de apresentar a MA e suas características é preciso compreender o contexto em que essa tecnologia está inserida, ou seja, é necessário primeiro se familiarizar com a quarta revolução industrial, conhecida como Indústria 4.0 (I4.0).

Desde a primeira revolução industrial, no século XIX, em que as fábricas eram movidas por máquinas a vapor, os avanços tecnológicos tem revolucionado a produtividade industrial. Atualmente na segunda década do século XXI, a indústria se encontra em meio à quarta revolução industrial, com a ascensão das novas tecnologias digitais lideradas por nove avanços tecnológicos fundamentais (RÜSSMANN et al., 2015). Esses são os nove pilares da I4.0, reconhecidos na literatura: Análise dos dados e Big Data (*Big Data and Analytics*); Robôs autônomos (*Autonomous Robots*); Simulação (*Simulation*); Integração de Sistemas (*System Integration*); Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*); Cibersegurança (*Cybersecurity*); Computação em Nuvem (*Cloud Computing*); Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing*) e Realidade aumentada (*Augmented Reality*) (ERBOZ, 2017; RÜSSMANN et al., 2015; VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018). Ao longo do presente texto alguns termos no idioma inglês serão mantidos, uma vez que ainda não há uma normalização, nem consenso, sobre sua tradução, embora já se proponham algumas.

Erboz (2017) em seu artigo descreve os pilares da I4.0 a fim de mostrar como essas tecnologias podem auxiliar as empresas a atingirem seus objetivos, assim a autora elaborou um quadro, que é reproduzida no Quadro 1, resumindo a definição dos pilares da quarta revolução industrial.

Quadro 1: Definição dos Pilares da Indústria 4.0

Pilares	Definição	Exemplos
Análise dos dados e Big Data	Grande e complexo conjunto de dados que afetam a tomada de decisão das empresas.	Análise de big data, algoritmos, programas de software.
Robôs Autônomos	Resolvem tarefas complexas que não podem ser resolvidas por humanos.	Robôs Kuka Iwaa tem a capacidade de aprender para realizar algumas tarefas.
Simulação	Modelagem matemática, algoritmos que otimizam o processo.	Programas de software.
Integração de Sistemas	Integração de departamentos, funções e recursos dentro da fábrica.	Fábricas inteligentes.
Internet das Coisas	Conexão dos objetos físicos e sistemas. Permite que os dispositivos de campo se comuniquem e interajam entre si e com controladores mais centralizados, conforme necessário (RÜSSMANN et al., 2015).	Rede inteligente
Computação em Nuvem	Plataformas compartilhadas que servem para vários usuários.	Google Drive, BlueCloud, Windows Azur
Manufatura Aditiva	Tecnologia de impressão 3D, produção de produtos customizados em massa. Produção de pequenos lotes personalizados que ofereçam vantagens de construção, como projetos complexos e leves (RÜSSMANN et al., 2015).	Projetos para reduzir o peso de aeronaves, diminuindo seus gastos com matérias-primas como titânio (RÜSSMANN et al., 2015).
Realidade aumentada	Interação homem-máquina em tarefas de manutenção.	Google Glass.
Cibersegurança	Sistemas de segurança contra ataques cibernéticos ao ambiente de negócios.	Sistemas nacionais de defesa para evitar ataques.

Fonte: Adaptado de Erboz (2017).

A quarta revolução industrial permite que máquinas de trabalho e sistemas de TI estejam conectados ao longo da cadeia de valor, permitindo também a conexão entre várias empresas. Na I4.0 as tecnologias tornam os processos rápidos, flexíveis e mais eficientes, produzindo itens de maior qualidade a custos reduzidos (RÜSSMANN et al., 2015). A I4.0 tem a capacidade de transformar os processos de fabricação, tornando empresas tradicionais em fábricas inteligentes (ERBOZ, 2017). Assim a MA está inserida na quarta revolução

industrial como um dos nove pilares, trazendo promessas de revolucionar os sistemas produtivos.

2.2.Manufatura Aditiva (MA)

A Manufatura Aditiva (MA), inicialmente aplicada como prototipagem rápida, hoje comercialmente mais conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia que produz objetos sólidos a partir de modelos digitais criados em programas CAD (*Computer-Aided Design*). Tecnologia utilizada, a princípio, apenas para a criação de protótipos, hoje a MA tem muitos outros propósitos (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

A norma ASTM F2792 - 10 (2010) define MA como “processo de união de materiais para criar objetos a partir dos dados virtuais do modelo 3D, geralmente camada sobre camada, em oposição às metodologias de fabricação subtrativas”, sendo os processos de fabricação subtrativos aqueles que removem o material como a usinagem (furação, fresamento, entre outros).

O termo Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing*) foi empregado para descrever a tecnologia como um todo, porém outros termos como *Desktop Manufacturing*; *Rapid Prototyping* (Prototipagem Rápida); *Rapid tooling*; *3D Printing* (Impressão 3D) e *Freeform Fabrication* também se referem a tecnologias de adição de materiais (JIMÉNEZ et al., 2019).

O processo de fabricação por MA envolve uma série de etapas que variam de acordo com o tipo de máquina. Genericamente as etapas são: Modelagem em CAD; Conversão em formato STL; Transferência para a máquina MA e manipulação do arquivo STL; Ajustes da máquina; Impressão (deposição); Remoção da peça; Pós-processamento; e por fim a Aplicação (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

A norma ASTM F2792 - 12a (2012) com o subcomitê F42, responsáveis pelas tecnologias de MA, apresentam as seguintes categorias de processos de MA: *Binder jetting*; *Directed energy deposition* (DED); *Material extrusion*; *Material jetting*; *Powder-bed fusion* (PBF); *Sheet lamination*; e *Vat photopolymerization*, os quais são mostrados na Figura 1, juntamente com algumas aplicações.

Figura 1: Tipos de processo de MA e aplicações

Fonte: Adaptado de Gisario et al. (2019, p. 126)

Pela Figura 1, adaptado de Gisario et al. (2019), é possível observar que os processos PBF e DED são os mais destacados em aplicações industriais e por esse motivo são os explorados neste trabalho.

2.2.1. Manufatura Aditiva para Metais

Desde a antiguidade, adornos, símbolos de poder e ferramentas de conquistas fabricados em metais tem sido objetos de fascínio, uma vez que criar itens de geometria complexa com esses elementos sempre foi de alto custo e necessita capacidades e habilidades que poucos possuem. Com o passar dos séculos vários processos de produção foram desenvolvidos para trabalhar com estes materiais, em geral subtrativos. Foi somente entre as décadas de 1980 e 1990, que processos de MA para metais, como é conhecido hoje, começaram a serem desenvolvidos. Tal acontecimento tornou possível, por meio de um computador, acesso a um modelo 3D e um sistema de deposição de MA, a criação de objetos metálicos complexos (MILEWSKI, 2017).

Grandes investimentos corporativos estão sendo realizados na produção de máquinas de MA para metal e na adoção desta tecnologia. A cada ano que passa há mais desenvolvimentos tecnológicos significativos (MILEWSKI, 2017). Das sete tecnologias de MA listadas na Figura 1, quatro já são utilizadas para a fabricação em metais: *Powder Bed*

Fusion (PBF); *Directed Energy Deposition* (DED); *binder jetting* e *sheet lamination* (STRONG et al., 2018), sendo os processos PBF e DED os mais avançados em termos de desenvolvimento e aplicações (BOURELL et al., 2017; CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019).

2.2.1.1. Processo Powder Bed Fusion (PBF)

Powder Bed Fusion (PBF) foi um dos primeiros processos de MA comercializados, desenvolvido na Universidade do Texas em Austin, EUA. Trabalha com uma ampla gama de materiais, sendo o *Selective Laser Sintering* (SLS) a primeira vertente do processo PBF a ser criada, uma vez que o metal era sinterizado e não ainda fundido, como atualmente (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). No processo PBF a fonte de energia pode ser Laser (L) ou Feixe de Elétrons - *Electron beam* (EB), que fundem uma região específica de uma camada de pó espalhada sobre outra (*Powder bed*) de acordo com um modelo digital da peça, criada em um software CAD 3D. Quando uma camada é concluída, a plataforma é baixada em uma distância equivalente à espessura da camada. Uma nova camada de pó é espalhada e o processo é repetido até obter-se a geometria 3D desejada. Os processos PBF também são conhecidos como SLM (*selective laser melting*), EBM (*electron beam melting*) (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019), DMLS (*Direct metal laser sintering*); SHS (*Selective heat sintering*); SLM (*Selective laser melting*); e SLS (*Selective Laser Sintering*) (ADEKANYE et al., 2017). A Figura 2 representa um esquema geral do processo PBF.

O processo PBF é, atualmente, o mais indicado para a fabricação de peças menores com detalhes complexos, apresentando um bom acabamento superficial (VARTANIAN; MCDONALD, 2016). É possível reutilizar parte do material não consumido (pó), o que resulta em um processo mais econômico e sustentável (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019).

Os processos PBF com fonte de energia a laser é a tecnologia de MA para metais mais aplicada, e possivelmente a mais evoluída até o presente (MILEWSKI, 2017).

Figura 2: Princípios do processo PBF

Fonte: Adaptado de Gebhardt e Hötter (2016)

2.2.1.2. Processo Directed Energy Deposition (DED)

O processo DED evoluiu nos últimos 20 anos como resultado de avanços em revestimento metálico a laser e tecnologia de movimentação automatizada, como o CNC (MILEWSKI, 2017). Embora esta tecnologia funcione com polímeros, cerâmicas e compósitos com matriz metálica, é principalmente usada para metais (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015).

Assim como o processo PBF, a fonte de energia é normalmente laser, ou feixe de elétrons, embora já se explore o arco elétrico ou plasma também. O processo é utilizado para fundir pós, ou arames, metálicos (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). No processo DED com pós, o material é adicionado continuamente através de um bocal, sendo seu ponto focal direcionado a um feixe laser de alta potência. A peça é construída camada a camada em espaço livre, sendo possível visualizar a construção da peça, diferente do processo PBF em que a peça fica dentro da cama de pó até sua conclusão (VARTANIAN; MCDONALD, 2016).

O processo tem sido mais explorado para a adição de detalhes em peças existentes, para reparos em Manufatura Híbrida (MH), assim como para a fabricação de peças maiores. O processo DED produz peças com propriedades mecânicas no mínimo iguais, ou até mesmo

superiores, ao material equivalente obtido por fundição, por exemplo (VARTANIAN; MCDONALD, 2016). A Figura 3 representa um esquema de um típico processo DED para laser em pó.

Fonte: Adaptado de Gibson; Rosen e Stucker (2015)

Os processos DED usando laser como fonte de energia (L-DED) são amplamente mencionados na literatura por nomes como LENSTM (*Laser Engineered Net Shape*), DMD (*direct metal deposition*), e LMD (*laser metal deposition*), utilizando arame e pó metálico. Os processos com feixe de elétrons (EB-DED) são conhecidos também como EBF3 (*electron beam freeform fabrication*) e EBAM (*electron beam additive manufacturing*) e utilizam somente arame como matéria-prima, devido à necessidade de vácuo. Existem também sistemas de arco elétrico, conhecidos como PA-DED (*Plasma arc based systems*) (MILEWSKI, 2017) que podem utilizar arame ou pó metálico com apenas uma proteção local, sem a necessidade de uma câmara com atmosfera inerte.

Os processos PBF oferecem melhor acabamento superficial e menor espessura de camada em comparação às tecnologias DED, porém a taxa de deposição dos processos PBF é inferior à proporcionada por DED. Desta forma o PBF é mais adequado para objetos mais precisos, complexos e pequenos, sendo o DED mais adequado para a construção de peças relativamente maiores e com maior rugosidade superficial permitida (DUTTA; (SAM) FROES, 2015), embora possa ser associado a outros processos de acabamento.

2.2.1.3. Manufatura Híbrida (MH)

Processos híbridos combinam, processos de adição de material por MA e processos de subtração (processos de usinagem). Estes dois processos podem ser utilizados de diversas formas, como por exemplo: a peça pode ser construída por MA e posteriormente usinada, a MA pode ser usada para adicionar material nessa mesma peça ou em outra já existente que posteriormente será usinada, entre outras aplicações que envolvam processos de adição e subtração em qualquer ordem (MILEWSKI, 2017).

Flynn et al. (2016) se referem aos processos híbridos como WHASPs (*Workstations for Hybrid Additive and Subtractive Processes*), e ressalta que as universidades e a indústrias já estavam investindo em pesquisas e aplicações com essas tecnologias para ultrapassar algumas barreiras, como obter um acabamento superficial adequado entre outras, que a MA não conseguia como única tecnologia para a fabricação. Os WHASPs geralmente são projetados em plataforma de máquinas-ferramentas existentes. Por exemplo, em uma máquina de usinagem CNC é adicionado um cabeçote de deposição de DED (FLYNN et al., 2016). As máquinas híbridas produzidas comercialmente têm sido limitadas a sistemas DED/CNC (MILEWSKI, 2017).

Os processos híbridos possibilitam que matérias-primas sejam transformadas em peças acabadas usando uma única máquina-ferramenta. Todas as etapas de construção, acabamento e inspeção podem ser realizadas no mesmo equipamento, produzindo peças geometricamente complexas com alta precisão dimensional e melhor qualidade superficial (FLYNN et al., 2016).

A MA não deve substituir inteiramente a manufatura subtrativa. Para atingir as propriedades desejadas, produtos manufaturados em metais necessitam, em sua maioria, de pós-processamento, o que indica que a MH será a mais recomendada (KRÓLIKOWSKI; KRAWCZYK, 2019; STRONG et al., 2017).

Strong et al. (2017) declaram que em um futuro próximo as principais características dos sistemas produtivos das indústrias de fabricação tradicional serão readequados para a implementação da MH. As fábricas do futuro serão compostas de sistemas híbridos, nos quais os processos aditivos e subtrativos trabalharão em colaboração com uma distribuição equilibrada (WANG, 2018).

2.2.2. Áreas de aplicação

Impulsionada, inicialmente, pelas indústrias automotiva, aeroespacial e médica, a MA tem encontrado aplicações em diversos produtos em quase todos os setores (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Milewski (2017) em seu livro apresenta as áreas que estão realizando pesquisa para a aplicação da MA para metais, a Figura 4 mostra as áreas destacadas pelo autor.

Figura 4: Aplicações da MA para metais

Fonte: Adaptado de Milewski (2017)

É possível notar que muitas áreas de grande importância econômica já estão investindo na tecnologia MA e posteriormente, necessitarão de MH, como uma das alternativas para o pós-processamento necessário para atender exigências específicas. Desta forma, o presente trabalho se alinha com essas perspectivas futuras. Algumas áreas de aplicação apresentam maior destaque pela sua importância e pelo acelerado número de trabalhos já publicados.

As aplicações na indústria aeroespacial vêm crescendo aceleradamente nos últimos anos. O principal benefício da MA nessas aplicações é a capacidade de gerar geometrias de engenharia complexa com um número limitado de passos de processamento, possibilitando também a produção de peças mais leves com materiais que suportam grandes variações de temperatura (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). A MA permite a produção de peças em materiais como ligas à base de níquel ou titânio sem grande desperdício de material. Porém, devido ao alto risco de falhas dessas peças, as aplicações exigem procedimentos e certificação rigorosos (MILEWSKI, 2017). Todos os segmentos da indústria aeroespacial estão investindo

na MA, tais como, fabricantes de aviões comerciais, helicópteros militares, foguetes e satélites, e à medida que a tecnologia evoluir e a qualidade e velocidade de processamento melhorarem, a MA será viável para inúmeras aplicações nessa área (WEBER, 2016).

Na indústria médica o principal benefício é a capacidade de incluir dados geométricos específicos dos pacientes. O uso da MA contribui em diversas aplicações como auxílio em cirurgias e diagnósticos, desenvolvimento de próteses, manufatura de produtos médicos e na engenharia de tecidos (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Os materiais que oferecem resistência mecânica e biocompatibilidade suficientes, como ligas de CrCo e ligas de Ti, são atualmente usados em dispositivos médicos facilmente fabricados com MA. Metais especiais, como o tântalo, também podem ser utilizados em dispositivos produzidos em MA (MILEWSKI, 2017). Na medicina e saúde o desenvolvimento em MA está especialmente destinado à produção de implantes dentários, implantes ósseo, desenvolvimento de hardware para imagens médicas, produção de ferramentas cirúrgicas personalizadas, e acessórios (MILEWSKI, 2017). O trabalho de Gao et al. (2018) mostra uma revisão em MA de metais para o *design* de estruturas microporosas para a confecção de próteses ortopédicas customizadas, apresentando os desafios encontrados nesta área de aplicação.

Muitos protótipos (protótipos de design, protótipos funcionais) são desenvolvidos na indústria automotiva utilizando a MA para identificar potenciais problemas antes do início da produção, evitando que esses problemas ocorram, gerando grandes perdas. Para carros especiais com baixa produção a confecção de peças em MA pode ser mais econômica, da mesma forma que para carros de competição, da Fórmula 1 e da NASCAR, por exemplo, essa tecnologia é de grande auxílio (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). A MA também está sendo ativamente explorada para confecção de peças especiais e difíceis de encontrar, por exemplo, para a restauração de automóveis antigos (MILEWSKI, 2017). O trabalho de Cooper et al. (2012) realiza testes em um componente hidráulico produzido em MA, evidenciando que a tecnologia tem capacidade de fornecer precisão geométrica e propriedades mecânicas ideais para aplicações no setor automobilístico.

Outras aplicações como para produções artísticas, confecção de moldes e ferramentas, remanufatura e reparo de peças de alto valor, engenharia reversa para recriar um objeto, manufatura de artigos esportivos customizados, brinquedos, joalheria, entre outras estão sendo exploradas (MILEWSKI, 2017). A utilização da MA para a construção de componentes de transferência de calor é amplamente estudada, como no trabalho realizado por Neugebauer et al. (2011), no qual foi confeccionado um trocador de calor para obter a máxima eficiência com tamanho e peso mínimos.

2.2.3. Nível de Adoção da MA

O nível de adoção da MA depende das características de cada empresa, características dos líderes em relação à inovação e riscos, intensidade de regulamentação, entre outros fatores (SAUNDERS, 2018). A empresa Renishaw™ que trabalha especificamente com o processo PBF, propôs um modelo mostrando os diferentes níveis de adoção da MA, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Diferentes níveis de adoção da MA

Fonte: Adaptado de Saunders (2018, p. 1)

É possível observar na Figura 5 que subir os níveis exigirá maior maturidade e comprometimento da organização com o desenvolvimento e qualificação de novos produtos manufaturados por MA, assim como todas as dificuldades de um novo processo de fabricação. Por outro lado os benefícios tendem a aumentar, pois quanto maior o nível de adoção da tecnologia, mais disruptivo o produto pode se tornar (SAUNDERS, 2018).

O primeiro nível de adoção, prototipagem rápida e o emprego em ferramentais, pode ser o investimento inicial para a maioria das empresas. No segundo nível, as peças podem deixar de ser produzidas por processos tradicionais e passarem a ser produzidos por MA. Isso pode eliminar etapas de produção e tornar a produção mais ágil. Nesse nível ainda não há modificações significativas no projeto das peças, apenas o processo de fabricação é alterado (SAUNDERS, 2018). O terceiro nível, Consolidação de peças, é o primeiro no qual as peças são modificadas e as vantagens do processo de MA aproveitadas, tais como, construir formas complexas, mais leves e com a possibilidade de pequenas customizações, além de substituir várias peças por uma única. O quarto e último nível, *Design para MA (Design for AM -*

DfAM) otimizado, representa o máximo aproveitamento da tecnologia, de forma que tudo pode ser aprimorado, como modificações de topologia para tornar a peça mais leve, aumento de áreas superficiais e transferência de calor para trabalhar com materiais resistentes mecanicamente, permitindo a customização em massa sem aumento de custo e tempo (SAUNDERS, 2019). Cabe a cada empresa identificar em que estágio se enquadra, ou deseja atingir.

Cada nível de adoção de MA, pode fornecer um benefício financeiro adicional para a empresa. A Figura 6 mostra alguns benefícios obtidos em cada nível, sendo possível observar que os benefícios de produção não modificam consideravelmente de um nível para o outro, porém os benefícios vitalícios aumentam significativamente à medida que se elevam os níveis de adoção.

Fonte: Adaptado de Saunders (2018)

A utilização da MA para a produção de peças acabadas permite a expansão do mercado potencial no qual a MA pode ser adotada, partindo de um processo de prototipagem em aplicações quase ilimitadas (BAUMERS et al., 2016).

2.2.4. Benefícios da MA nas empresas

Segundo Bland e Conner (2015) vários fatores devem ser avaliados para definir o processo de fabricação mais adequado. Primeiramente deve-se avaliar a complexidade do produto. Dependendo do nível de complexidade um processo tradicional seria muito

demorado ou inviável tecnologicamente para a fabricação da peça. Outro fator a ser analisado é o nível de customização que a peça exige, dependendo do processo quanto menor o lote de produção, maior o custo devido ao processo adotado. Por último, deve ser estudado o volume de produção, a quantidade de um produto a ser produzido em um período de tempo. A partir dessa visão inicial, pode-se iniciar a avaliação da viabilidade de se adotar uma das tecnologias existentes de MA.

A MA tem a capacidade de criar modelos “sob encomenda” que podem ser aplicados à produção de peças de reposição, eliminando a necessidade de estoques e permitindo o reaproveitamento de peças desgastadas, quebradas ou danificadas (STRONG et al., 2017), assim como elimina etapas de produção necessárias na manufatura convencional (DUDA; RAGHAVAN, 2018).

No trabalho de Strong et al. (2017) os resultados obtidos pelos autores mostram que 82% das empresas estudadas tinham produção de baixo volume, o que torna a MA, ou híbrida, uma opção viável.

Dentre as vantagens da MA pode-se destacar redução de desperdícios e número necessário de operações manuais, customização em massa e resposta rápida a oportunidades de negócio, permite a produção local de produtos altamente customizados facilitando a gestão de logística, apresenta flexibilidade e potencial queda de custos de produção, e reduz significativamente o tempo para iniciar a comercialização (NIAKI; NONINO, 2017). Por ser uma tecnologia flexível permite a aplicação em diferentes tipos de produtos, indústrias e locais (MCGUIRE; RICE, 2019).

Atualmente, a MA de metais dentro das empresas está sendo amplamente estudada para a fabricação de ferramentas, punções e matrizes, modelos de fundição, trocadores de calor, remanufatura e reparo além de fabricação de pequenos lotes (MILEWSKI, 2017). Estudos como o desenvolvido por Simons (2018) buscam avaliar como a MA pode se disseminar nas empresas para ir além da prototipagem, rumo à produção de peças metálicas finais.

A fabricação de peças em grandes lotes usando MA ainda apresenta custos elevados comparados com processos tradicionais, porém a redução de custos de processamento e do pó para a fabricação pode reduzir esta lacuna (SIMONS, 2018). Universidades, indústrias e empresas privadas estão investindo no desenvolvimento e adoção da MA, em busca de soluções para as barreiras que impedem a maior e contínua difusão desta tecnologia nas empresas (MILEWSKI, 2017).

O estudo de Niaki e Nonino (2017) revela que a implementação da MA na manufatura de produtos em metal aumenta a produtividade. Por outro lado a MA pode se tornar em um sistema *kanban*, uma forma de repor peças *just-in-time*, auxiliando o gerenciamento de estoque (KIETZMANN; PITT; BERTHON, 2015). A MA para metais dentro das empresas proporcionará novas oportunidades de negócios à medida que a taxa de deposição de material aumentar e os custos de produção forem reduzidos (SIMONS, 2018). Combinada com outras tecnologias emergentes como a internet das coisas (IoT – *Internet of Things*), a MA tem um grande potencial, que ainda não foi amplamente explorado, de inovação de produtos e entrega de valor, fornecendo novas perspectivas para os modelos de negócios (HÄMÄLÄINEN; OJALA, 2016).

2.2.5. Barreiras da MA

Como qualquer nova tecnologia que ainda está em estágio de desenvolvimento, a MA apresenta diversas barreiras que serão superadas com pesquisas e aplicações promovidas pela academia e empresas, tornando possível o amadurecimento desta.

Dentre as pesquisas mais recentes sobre barreiras Thomas-seale et al. (2018) realizaram um estudo em empresas do Reino Unido para identificar as barreiras relacionadas à produção de peças finais em MA em um contexto industrial. Os autores identificaram dezoito barreiras: educação, custo, design, software, materiais, rastreabilidade, restrições da máquina, monitoramento em processo, propriedades mecânicas, repetibilidade, escalabilidade, validação, padrões, qualidade, inspeção, tolerâncias, acabamento e esterilização. Da amostra utilizada na pesquisa, mais de 50% foi representado pelas barreiras em educação, custo, software, materiais, propriedades mecânicas, validação e acabamento. Mostrando a necessidade de maiores estudo para a superação principalmente destas barreiras.

No livro de Dietrich; Kenworthy e Cudney (2019) as barreiras apresentadas estão principalmente relacionadas à certificação, custos e especialização da mão de obra. Os autores também destacam a importância da cultura para implementar a MA de forma adequada dentro da empresa, ressaltando a necessidade de uma cultura com foco na mudança, sendo assim, desenvolvem os passos de Kotter (1996) para promover as mudanças necessárias dentro das empresas para dotarem a MA de forma mais eficiente.

Os estudos realizados sobre as barreiras para a adoção da MA foram capazes de identificá-las, mas nenhum foi tão amplo para gerar um roteiro que guie uma equipe que

busca implementar a MA. O estudo desenvolvido nesta dissertação apresenta as barreiras de adoção de forma mais abrangente (Capítulo 4), considerando as diversas etapas para a adoção desta tecnologia, identificando quais obstáculos as empresas encontrarão e propondo sugestões de como estes podem ser superados. A superação de barreiras passa pela gestão da empresa, a qual deve estar em sintonia com novos modelos e aspectos evolutivos propostos pela I4.0.

2.3. Modelos de Gestão

Modelos de gestão são desenvolvidos para auxiliar a empresa e podem também guiar uma equipe no desenvolvimento de projetos. A proposição de um roteiro para implantação de MA em uma empresa passa pelos modelos de gestão no desenvolvimento de produtos. A evolução de um modelo de manufatura convencional para outro com base em MA certamente implicará em acentuadas modificações nos produtos, otimizações diversas, criação e fusão de peças, criação de novos modelos, exploração de novas oportunidades, etc. conforme o nível de adoção almejado, de acordo com a Figura 5.

O modelo proposto por Rozenfeld et al. (2006), esquematizado na Figura 7, foi desenvolvido para gerenciar o desenvolvimento de produtos, de maneira geral em uma empresa. Ele foi escolhido por ser um modelo de gestão para o desenvolvimento de produtos, abrangendo desde o planejamento estratégico até o final da vida de um produto. Assim, este modelo servirá de guia para a implantação de MA, uma vez que haverá necessidade de desenvolvimento dos produtos da empresa, nesta evolução para MA, visando os conceitos de I4.0. A adoção de MA por uma empresa pode ser comparada ao desenvolvimento dos vários novos produtos da empresa.

O modelo elaborado neste trabalho busca fornecer uma estrutura que transmita a visão de um “projeto de adoção de MA”, desde o desenvolvimento dos produtos até a implementação do processo de fabricação MA, considerando todas as atividades que devem ser desenvolvidas.

Figura 7: Modelo de Referência para o Desenvolvimento de Produtos

Fonte: Adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

Seguindo com a ideia de que adotar MA em uma empresa deve ser visto como um “projeto”, buscou-se também um modelo inovador para a gestão desse projeto. O gerenciamento ágil de projetos (*Agile Project Management* - APM) surgiu como um complemento à teoria tradicional, para gerenciar projetos inovadores com elevados índices de incerteza que apresentavam dificuldades se gerenciados de forma tradicional (AMARAL et al., 2011), e implementar a MA é desenvolver um projeto para adotar uma tecnologia inovadora.

A APM permite um desenvolvimento flexível, adaptativo, iterativo, promovendo a autogestão das equipes (AMARAL et al., 2011). Algumas práticas de gestão ágil podem auxiliar o desenvolvimento do projeto de implantação de MA, guiando a equipe de implementação de forma mais eficiente, são elas: as iterações o *Backlog* e as reuniões diárias.

As iterações são etapas planejadas em curtos períodos de tempo, gerando ciclos de iteração dentro do projeto, que serão modificados constantemente até se obter os resultados desejados (AMARAL et al., 2011). Leffingwell (2010), propõe um padrão de iteração, mostrado na Figura 8, como uma prática da gestão ágil que pode otimizar e agilizar o projeto de implementação de MA.

Figura 8: Padrão de Iteração da Gestão Ágil

Fonte: Adaptado de Leffingwell (2010)

O *backlog* é amplamente adotado em projetos de gestão ágil. Trata-se de uma lista de atividades contendo todo o trabalho a ser realizado pela equipe. É a fonte onde todo o conteúdo é colocado de acordo com as necessidades da equipe (LEFFINGWELL, 2010). Para a sua criação, pequenas histórias são geradas, ou seja, pequenas declarações da atividade que deve ser executada, sendo estas ordenadas e atribuídas aos integrantes da equipe (LEFFINGWELL, 2010). Para muitas equipes o *backlog* é o artefato principal de gerenciamento de projetos (SEDANO; RALPH; PERAIRE, 2019), de forma que pode ser ajustado de acordo com a demanda da equipe e dos objetivos da iteração. É uma lista informal que permite o desenvolvimento mais eficiente do projeto. Sedano; Ralph e Peraire (2019) apresentam 13 práticas para o desenvolvimento do *Backlog* que, de acordo com os autores, cria uma visão geral do que deve ser realizado e guia a equipe nas tarefas. Geralmente o *Backlog* é ajustado a cada ciclo de iteração (SEDANO; RALPH; PERAIRE, 2019).

As reuniões diárias são rápidas, com duração de aproximadamente 15 minutos, realizadas com o intuito de compartilhar informações importantes, discutir o que foi executado pela equipe e quais serão os próximos passos (STRAY; SJØBERG; DYBÅ, 2016). Estas reuniões permitem maior comunicação entre os membros do time e a visualização do que já foi desenvolvido. Estas práticas podem auxiliar a equipe que está implementando a MA, de forma que esta obtenha resultados de forma mais eficaz.

Com todas essas informações e os dois modelos pesquisados, Gestão de desenvolvimento de produtos e Gestão ágil, um roteiro para implantação de MA será proposto à frente neste texto, para que possa auxiliar a equipe que esteja introduzindo a MA na

empresa. Antes, porém, apresenta-se a revisão sistemática da literatura para identificar as barreiras a serem vencidas na implantação de MA.

2.4.Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)

Segundo Conforto, Amaral e Silva (2011) uma RBS constitui uma revisão que permite um amplo entendimento do assunto pesquisado, por ser conduzida de uma forma rigorosa permitindo que o pesquisador desenvolva uma base sólida de conhecimento, facilitando o desenvolvimento de novas teorias e análises com base em pesquisas realizadas na área que auxiliam a identificação de novas oportunidades de estudos. Os autores apresentam em seu trabalho um roteiro para a execução de uma RBS, que é organizado em três fases: entrada, processamento e saída.

Na fase entrada da RBS define-se o problema, objetivos, fontes primárias, *strings* de busca, critérios de inclusão, critérios de qualificação, método e ferramenta, assim como o cronograma. Na etapa seguinte, processamento, são realizadas as buscas, análise dos resultados e documentação. Na última etapa são criados os alertas, cadastro e arquivo, síntese de resultados e para finalizar a construção de modelos teóricos como resultado da RBS (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011). A diretriz PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) utilizada para RBS (MOHER et al., 2009), apresenta uma ideologia semelhante à utilizada por Conforto, Amaral e Silva (2011), assim como o modelo apresentado por Sampaio e Mancini (2007). Esta técnica de RBS foi utilizada no presente trabalho para identificar as principais barreiras encontradas pelas empresas, na implantação de MA, segundo as publicações pesquisadas.

2.5.Metodologia *Design Research*

A metodologia *Design Research* (*Design Research Methodology* - DRM) foi inicialmente desenvolvida para auxiliar pesquisas multidisciplinares. É utilizada em estudos complexos, que envolvem não apenas ferramentas e processos, mas também organizações, pessoas e o ambiente em que são desenvolvidos. É uma metodologia que busca aumentar a compreensão de um determinado fenômeno e sua complexidade, buscando o sucesso no mundo acadêmico e em aplicações práticas e comerciais (BLESSING; CHAKRABARTI, 2009).

Esta metodologia exige não apenas os conhecimentos da área em que está inserida a pesquisa, mas de variadas outras, como gestão, psicologia, economia, etc. que apoiem seu o desenvolvimento. Se o conhecimento necessário não é encontrado, suposições para minimizar riscos, ou realizar novas pesquisas, são necessárias para gerar esse conhecimento (BLESSING; CHAKRABARTI, 2009). Por definição todo projeto de *design research* é único, principalmente pela juventude da tecnologia estudada na pesquisa aqui apresentada (BLESSING; CHAKRABARTI, 2009).

O DRM é desenvolvido em quatro etapas: Esclarecimento da Pesquisa, Estudo Descritivo I, Estudo Prescritivo e Estudo Descritivo II. A Figura 9 mostra um *framework* das etapas, sendo que as setas claras representam as iterações que podem existir entre as fases.

Figura 9: DRM Framework

Fonte: Adaptado de Blessing e Chakrabarti (2009)

Seguindo a metodologia proposta, primeiramente o objetivo é definido, ou seja, Esclarecimento da Pesquisa. Em seguida a literatura é consultada para elaborar uma descrição inicial do estudo, caso a literatura não seja o suficiente, outras fontes e áreas de conhecimento devem ser exploradas, passando-se então para o Estudo Descritivo I. Como no conhecimento adquirido é elaborada uma descrição inicial da situação desejada, desenvolve-se agora uma forma de suporte chamada de Estudo Prescritivo. Por fim, tudo o que foi desenvolvido é avaliado e como se pode alcançar a situação desejada, passando-se para o Estudo Descritivo II (BLESSING; CHAKRABARTI, 2009).

O DRM não foi criado para ser seguido de forma rígida, assim Blessing e Chakrabarti (2009) determinaram sete tipos de *Design Research*, como o ilustrado no Quadro 2.

Quadro 2: Tipos de Design Research

Tipo	Esclarecimento da Pesquisa	Estudo Descritivo I	Estudo Prescritivo	Estudo Descritivo II
1	Com base em revisão	Compreensivo		
2	Com base em revisão	Compreensivo	Inicial	
3	Com base em revisão	Com base em revisão	Compreensivo	Inicial
4	Com base em revisão	Com base em revisão	Com base em revisão	Compreensivo
5	Com base em revisão	Compreensivo	Compreensivo	Inicial
6	Com base em revisão	Com base em revisão	Compreensivo	Compreensivo
7	Com base em revisão	Compreensivo	Compreensivo	Compreensivo

Fonte: Adaptado de Blessing e Chakrabarti (2009)

Observando-se o Quadro 2, para os tipos com base em revisão, apenas o conteúdo da literatura é considerado na elaboração da pesquisa. Para um estudo mais abrangente deve-se incluir a revisão da literatura, assim como outros estudos produzidos pelo pesquisador, para desenvolver formas de suporte ou avaliar estes suportes. Por fim o estudo inicial finaliza o projeto, mostrando os resultados para que possa ser utilizado por outros pesquisadores. A pesquisa realizada seguiu o tipo 3 do DRM, segundo o Quadro 2.

O tipo 3, também chamado de Desenvolvimento de Suporte, é utilizado quando a literatura apresenta conteúdo suficiente para a análise, porém não apresenta uma forma de suporte para o objetivo da pesquisa, existindo uma necessidade de desenvolver meios para auxiliar e melhorar a situação atual (BLESSING; CHAKRABARTI, 2009). Desta forma, constatou-se que a literatura tem bases para o desenvolvimento de pesquisas em MA, inclusive é notável o crescimento do número de pesquisas, porém falta uma forma eficaz de auxiliar as empresas na adoção desta tecnologia. Por essa razão decidiu-se na presente Dissertação, propor um roteiro para superar barreiras encontradas na implementação de MA.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia aplicada neste trabalho foi dividida em três partes: Parte I - Identificação das barreiras na adoção da MA para metais por meio de uma revisão bibliográfica sistemática (RBS); Parte II - Desenvolvimento de roteiro para adoção da MA nas empresas para superar as barreiras utilizando a metodologia *Design Research*; Parte III – Entrevista com especialistas para avaliação do conteúdo desenvolvido. A figura 10 apresenta um esquema desta metodologia.

Figura 10: Esquema da Metodologia da Pesquisa

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

3.1. Parte I - Identificação das barreiras na adoção da MA para metais

Para identificar as diversas barreiras para a adoção da MA para metais em empresas, com foco nos processos *Powder Bed Fusion* (PBF) e *Directed Energy Deposition* (DED), uma revisão bibliográfica sistemática (RBS) foi realizada. Como o trabalho de Conforto; Amaral e Silva (2011) foi desenvolvido para a área de desenvolvimento de produto e gerenciamento de projetos, mais relacionado à pesquisa em questão, este foi escolhido como referência.

O roteiro proposto por Conforto, Amaral e Silva (2011) foi seguido com o auxílio de uma ferramenta gratuita de revisão sistemática, StArt (*State of the Art through Systematic Review*), desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), ferramenta esta, que auxiliou a organização dos artigos extraídos das bases de dados.

3.1.1. Entradas

Na primeira fase procura-se resposta para a questão 1: Quais barreiras na adoção da MA são identificadas na literatura? Foram buscados documentos nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. A escolha destas duas bases de dados foi devido ao amplo conteúdo fornecido e a possibilidade de exportação dos metadados, o que viabiliza a utilização da ferramenta StArt. A revisão foi iniciada no dia dezoito de junho de 2019, sendo a última verificação na base de dados realizada no dia vinte e oito de janeiro de 2020.

Os *strings* de busca utilizados nas bases de dados foram criados, pelas palavras chaves “Manufatura aditiva” (*Additive Manufacturing*) e “Metais” (*Metals*), limitando a trabalhos completos em forma de artigos, livros e capítulos de livros, produzidos na língua inglesa ou portuguesa. Foram identificados 3.475 artigos na *Scopus* e 2.617 na *Web of Science* (WoS).

Os dados foram exportados em formato BIBTEX e transferidos para a ferramenta de RBS, sendo criado um protocolo da pesquisa, para auxiliar a seleção dos artigos. Os arquivos duplicados foram removidos, sendo 3.714 o total de arquivos. Mesmo com a grande quantidade de artigos, optou-se pela realização da RBS com o mesmo *string* de busca para abranger todo o conteúdo pesquisado relacionando a MA e a metais.

3.1.2. Processamento

Para a fase de processamento realizada na ferramenta StArt a leitura dos artigos passou por três filtros. No primeiro filtro foi examinado título resumo e palavras chaves. Cada documento foi classificado como aceito ou rejeitado, no caso de aceito um grau de importância foi determinado (muito alta, alta, baixa ou muito baixa). A Figura 11 mostra a uma tela típica dessa análise inicial dos dados, sujeitos ao primeiro filtro.

Figura 11: Típica tela da ferramenta de RBS, primeiro filtro

778 - Current state and potential of additive - Hybrid manufacturing for metal parts

Study Data | Selection Data | Data Extraction Form | Quality Form | Similar Studies | References

Displayed Fields: ☒ Keywords ☒ Abstract ☒ Wordcloud

Author: Strong, D. and Sirichakwal, I. and Manogharan, G.P. and Wakefield, T.

Title: Current state and potential of additive - Hybrid manufacturing for metal parts

Keywords: 3D printers; Grinding (machining); Industrial research; Machine tools; Machining; Metals; Product design; Quality control; Supply chains; Surveys, 3-D printing; Advanced manufacturing technologies; Design/methodology/approach; Hybrid manufacturing systems; Machine availability; Original equipment manufacturers; Quality control tool; Standard products,

Journal: Rapid Prototyping Journal

Font: Tahoma Size: 16

Abstract: Purpose: This paper aims to investigate the extent to which traditional manufacturers are equipped and interested in participating in a hybrid manufacturing system which integrates traditional processes such as machining and grinding with additive manufacturing (AM) processes. Design/methodology/approach: A survey was conducted among traditional metal manufacturers to collect data and evaluate the ability of these manufacturers to provide hybrid - AM post-processing services in addition to their standard product offering (e.g. mass production). Findings: The original equipment manufacturers (OEMs) surveyed have machine availability and an interest in adopting hybrid manufacturing to additionally

Year: 2017 Type: Article

Comment:

Status: Accepted Search session: SEARCH0 *This paper is in Summarization step*

Reading Priority: Very high Score: 50

Full text

save & previous save & next

previous next

Save Cancel

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

No segundo filtro foi feita a leitura da introdução e conclusão dos artigos. Restaram para esse filtro 377 publicações, considerando a disponibilidade dos artigos, foram analisados título, resumo, introdução e conclusão. No terceiro e último filtro foi feita a leitura integral dos 54 trabalhos que passam pelo segundo filtro. O artigo de Bourell; Leu e Rosen (2009) foi identificado na leitura dos trabalhos, sendo adicionado manualmente após o terceiro filtro. A Figura 12 apresenta a adaptação do protocolo prisma, o qual é normalmente utilizado para revisões sistemáticas, para se adequar à metodologia utilizada no trabalho de Conforto, Amaral e Silva (2011).

Figura 12: Protocolo PRISMA adaptado para a metodologia de Conforto, Amaral e Silva (2011)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Muitos artigos foram rejeitados, no primeiro e segundo filtros, por não apresentarem foco condizente com a implantação de MA para metais, dentro da indústria, como pesquisas sobre testes de processos MA, análise de propriedades (resistência mecânica, fadiga, microestrutura, etc.) de diferentes metais, estudos sobre software de CAD e CAM para MA, entre outros.

3.1.3. Saída

Os artigos foram selecionados e as barreiras identificadas foram classificadas. Após essa classificação estas foram apresentadas a especialistas para a seleção das mais críticas e identificação de barreiras adicionais, que não foram destacadas na literatura. O Quadro 7 que reúne os artigos aceitos e seus objetivos esta ilustrado no apêndice A.

3.2. Parte II - Desenvolvimento de roteiro para adoção da MA nas empresas

Na segunda parte da pesquisa foi desenvolvida uma proposta de superação das classes de barreiras identificadas na RBS e elaborado um roteiro no qual essas barreiras possam ser superadas. O roteiro para auxiliar as empresas na adoção da MA, foi desenvolvido utilizando a metodologia *Design Research*. A seguir são explicadas as etapas deste desenvolvimento.

3.2.1. Esclarecimento da Pesquisa

Para responder a segunda pergunta “Como orientar as equipes, que implementarão MA em empresas, na superação das barreiras para adoção da tecnologia?” Para orientar propõe-se desenvolver um roteiro que auxilie as empresas na adoção da MA e superação das barreiras identificadas na RBS. A literatura foi analisada para se obter os conhecimentos necessários e em seguida o roteiro foi proposto.

3.2.2. Estudo Descritivo I

Nesta etapa novas áreas de conhecimento foram exploradas com o intuito de identificar conhecimentos que agregassem valor ao roteiro idealizado. Foram analisados elementos que pudessem contribuir com o desenvolvimento do roteiro nas áreas da gestão ágil, gestão de mudanças e de desenvolvimento de produtos, assim como foram considerados os estudos da RBS com o intuito de superar as barreiras identificadas. Também foram agregados conceitos e teorias indicados por especialistas. Assim, o contexto que o roteiro estava sendo desenvolvido foi mais bem compreendido e mais detalhes foram explorados.

3.2.3. Estudo Prescritivo

Com o conhecimento adquirido nas etapas anteriores o roteiro pôde ser aprimorado, de forma que sua estrutura pudesse ser avaliada por especialista da área de MA. A estrutura do modelo proposto no livro de Rozenfeld et al. (2006), esquematizado na Figura 7, e do padrão de iteração apresentado no livro de Leffingwell (2010), ilustrado na Figura 8 foram considerados para a melhoria do roteiro. A ideia de fazer um roteiro geral e não específico para uma aplicação foi escolhido, pois buscou-se uma compreensão completa de todos os

possíveis passos que a empresa pudesse necessitar, de forma que o roteiro possa ser adaptado a diversas situações particulares. Assim, partindo de uma compreensão geral das etapas da implementação da MA é possível ajustar para aplicações específicas em diversos setores da indústria (aeronáutica, médica, automotiva, entre outros) e para diversos níveis de adoção (fabricação de protótipos, modificações de processos, consolidação de peças, ou produção customizada de peças finais).

3.2.4. Estudo Descritivo II

Esta etapa tem como foco a forma de avaliação do roteiro. Após a estruturação, este foi apresentado para especialistas da área (que atuam em empresas, na academia e em instituições de pesquisa) para avaliar seu potencial em uma aplicação real. Devido ao tempo limitado para o desenvolvimento da pesquisa, optou-se pela avaliação por meio de entrevistas seguidas pelo preenchimento de um questionário, para analisar a viabilidade do roteiro desenvolvido. As entrevistas foram realizadas para avaliar tanto as barreiras da RBS quanto esta etapa do DRM. Assim são descritas na Parte III.

3.3. Parte III – Entrevista com especialistas para avaliação do conteúdo desenvolvido

Com o intuito de avaliar as barreiras identificadas na literatura e a viabilidade do roteiro desenvolvido, foram realizadas 14 entrevistas com especialistas, em dezembro de 2020, com a aplicação de um questionário. Cada participante da pesquisa foi selecionado segundo um conhecimento aprofundado em uma área específica (materiais, tecnologia, design, entre outros). Sendo assim, cada um pôde contribuir de forma mais significativa em seu contexto, por esse motivo, especialistas de diversas áreas foram buscados.

As entrevistas foram realizadas individualmente com duração entre 40 minutos à 1 hora e meia. O conteúdo (barreiras e roteiro) foi apresentado inicialmente. Após a apresentação os entrevistados manifestavam suas opiniões quanto ao material, sendo ao final da entrevista compartilhado um link para o preenchimento do questionário desenvolvido na plataforma Google Forms™. O questionário se encontra no Apêndice B.

4. RESULTADOS

Os resultados de cada parte (identificação das barreiras, desenvolvimento de roteiro e entrevista com especialistas) são apresentados a seguir.

4.1. Parte I: Identificação das Barreiras

A Figura 13 mostra a quantidade de publicações na base de dados Scopus.

Figura 13: Quantidade de publicações na base de dados *Scopus*

Fonte: Elaborado pela autora, adaptação de dados obtidos pela Scopus.

Analisando os resultados obtidos nas bases de dados, pode-se observar que na *Scopus* embora a publicação mais antiga sobre MA que incluía metais seja de 1993, foi em 2014 que o número de publicações começou a ficar significativo e vem crescendo desde então. Em apenas 28 dias em 2020 já havia sido publicados mais trabalhos que em todo o ano de 2014, e a tendência é que novas pesquisas em diversas áreas sejam realizadas com essa nova tecnologia.

A Figura 14 mostra a quantidade de publicações na base de dados *Web of Science*.

Figura 14: Quantidade de publicações na base de dados *Web of Science*

Fonte: Elaborado pela autora, adaptação de dados obtidos pela Web of Science.

Pode-se observar na Figura 14 que o cenário é semelhante ao apresentado pela base *Scopus*.

Por meio da leitura dos artigos selecionados na revisão sistemática, diversas barreiras foram identificadas e destacadas pelos autores, porém houve a necessidade de classificar as encontradas, uma vez que muitas se correlacionavam. Poderiam estar relacionadas à organização como um todo, a educação, a tecnologia, aos custos, a qualidade da peça, ao projeto, as normas, ou ao meio ambiente. Assim as barreiras foram divididas em oito classes mostradas esquematicamente na Figura 15.

Figura 15: Classificação das Barreiras identificadas na literatura

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Diversas são as barreiras encontradas na literatura, porém muitas delas não estão relacionadas à tecnologia da MA, e sim em questões relacionadas ao ser humano (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009). Nesta pesquisa estas barreiras também foram consideradas.

4.1.1. Barreiras Organizacionais

Sob as barreiras organizacionais estão aquelas relacionadas à cultura da organização, seu tamanho e segurança dos dados digitais. Segundo Bourell; Leu e Rosen (2009) as diferenças culturais são grandes barreiras não relacionadas à tecnologia, mas que dificultam que MA seja incorporada. A cultura das empresas pode ser dividida em quatro tipos, segundo Tharp (2009): Clã, adocracia, hierarquia e mercado. Cada um dos tipos de cultura apresenta maior ou menor facilidade de absorver mudanças no ambiente corporativo. Algumas empresas apenas buscam estabilidade e controle, enquanto outras se ariscam e buscam inovação. A MA pode representar mais que uma inovação tecnológica, o que pode parecer uma ameaça, dependendo da cultura da organização. Adotar a MA traz riscos imprevisíveis e demanda uma sequência de projetos internos para avaliar as vantagens e desvantagens dessas tecnologias (YI; GLÄSSNER; AURICH, 2019). A transição da manufatura convencional para a MA representa um grande desafio para as organizações (STRONG et al., 2018), pois boa parte dos seus membros ainda a vê como similar às fábricas do passado (WANG, 2018). Essa visão pode fortemente impedir que grandes inovações sejam realizadas, pois não está claro ainda para muitos que a MA tem um grande potencial para inovar os produtos, mudar a forma como eles são projetados e construídos, agregando valor à empresa.

O tamanho da organização também diferencia a implementação de MA, pois pequenas e média empresas (PMEs) podem ter maiores dificuldades (KRETZSCHMAR et al., 2018). O tempo para a implantação pode ser longo (STRONG et al., 2017), o que pode não ser viável para a maioria das indústrias, em uma primeira avaliação (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009).

A tecnologia MA permite que terceiros digitalizem e imitem um produto (KIETZMANN; PITT; BERTHON, 2015), e isso pode trazer grandes prejuízo às empresas, prejudicando as vendas e todo o seu ramo de atuação.

Não são todas as empresas que enfrentam barreiras organizacionais, mas muitas não consideram a adoção da MA devido a algumas dessas barreiras. A MA pode significar uma transformação organizacional, e nesses casos a cooperação com universidades pode ser de grande importância (YI; GLÄSSNER; AURICH, 2019).

4.1.2. Barreiras Educacionais

Sob as barreiras educacionais estão aquelas relacionadas ao conhecimento, treinamento de recursos humanos e mudanças de paradigmas em projeto e desenvolvimento de produtos. Bourell; Leu e Rosen (2009) e o de Yi; Glässner e Aurich (2019) apontam que a falta de conhecimento em MA pode dificultar sua adoção. É necessário compreender, pelo menos de forma básica, os processos de MA (HARRIS, 2012) para ser capaz de explorar a tecnologia. Operadores têm apresentado dificuldades em aprender a trabalhar com esses novos equipamentos (VARTANIAN; MCDONALD, 2016), uma vez que são necessárias pessoas habilitadas capazes de dominar várias áreas de conhecimento (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009; NIAKI; NONINO, 2017). Há ainda escassez de especialistas capazes de projetar, definir corretamente os parâmetros e fabricar produtos em MA (DUDA; RAGHAVAN, 2018). Conhecimentos e experiência de operadores são de grande importância, de forma que o fator humano e sua educação e treinamento têm papel significativo na produção de peças de qualidade (GIRDWOOD et al., 2017).

Empresas produtoras dos equipamentos de MA devem educar seus clientes sobre os potenciais do processo e da tecnologia (STRONG et al., 2017). Muitas empresas não conhecem os procedimentos estatísticos de controle e qualificação (SHAPIRO et al., 2016), não sabem identificar os tipos de defeitos nos produtos e que causam falhas nas diferentes aplicações. Assim, não conseguem estabelecer uma estratégia adequada para a detecção de defeitos em peças produzidas por MA (O'BRIEN, 2019; SEIFI et al., 2017). Por uma escassez de conhecimento e de sua difusão, os defeitos dos processos de MA não são ainda totalmente compreendidos (O'BRIEN, 2019).

Outra barreira educacional está na criatividade de seus projetistas (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009). Mesmo com pessoal treinado e com conhecimento em MA, sem criatividade e imaginação pode ser que muitas empresas não atinjam os resultados esperados com essa nova tecnologia. Por outro lado há situações em que os interesses da instituição sufocam a inovação (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009), e isso também pode impedir maiores aproveitamentos da tecnologia.

Sendo assim, as empresas devem investir constantemente em educação, ou seja, treinar o pessoal, participar de cursos de especialização e fazer *benchmark* para conhecer e extrair o melhor da tecnologia. Para disseminar integralmente a MA em uma organização tão abrangente quanto um país, este precisa contar com um número significativo de especialistas que possam projetar, modelar, e fabricar produtos inovadores (DUDA; RAGHAVAN, 2018).

De acordo com Collins; Leen e Gibson (2016) o requisito mais importante para impulsionar a adoção da MA é ter usuários motivados, além de pessoas qualificadas, principalmente em pequenas e médias empresas. A educação constituirá um papel importante na adoção da MA, em escolas técnicas, universidades e na indústria. Essa transferência de conhecimento foi identificada por Bourell; Leu e Rosen (2009) como meta fundamental para a adoção da MA nos 10 a 12 anos seguintes, ou seja, no ano de 2021 e com os avanços realizados desde 2009 este é um momento em que a educação para promover a MA se torna de suma importância.

4.1.3. Barreiras Tecnológicas

Estas são barreiras ligadas ao estado de desenvolvimento das tecnologias de MA. Atualmente, a maioria delas é lenta, isto é, produzem peças com velocidades ainda abaixo das necessidades (BAUMERS et al., 2016; DUDA; RAGHAVAN, 2018). Embora encurtem tempos por reduzirem a necessidade de ferramentais adicionais, o tempo de fabricação individual ainda pode ser encurtado. As baixas taxas de deposição da maioria dos processos existentes atualmente não possibilitam uma típica produção em série (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009; JIMÉNEZ et al., 2019; SCHMIDT et al., 2017). Muitas máquinas são projetadas para permitir maiores velocidade e peças maiores, sacrificando sua precisão dimensional (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009).

Para a melhor compreensão as barreiras tecnológicas foram divididas em barreiras relacionadas ao *design* para a MA e barreiras relacionadas à tecnologia do processo da MA. As primeiras são as encontradas na fase de desenvolvimento do projeto das peças. Para o desenvolvimento do projeto não há um *software* integrado especializado em MA que abranja design e simulação (SCHMIDT et al., 2017; SRIRAM; SHUKLA; BISWAS, 2019). A qualidade do modelo inicial do computador e a tradução para uma máquina específica de MA pode ser comprometida (SHAPIRO et al., 2016). É necessário um aumento do poder de computação para análises estruturais mais complexas (SCHMELZLE et al., 2015), e muitos erros podem ser proporcionados pelo *software* de modelagem (JIMÉNEZ et al., 2019).

As barreiras tecnológicas relacionadas ao processo são associadas à construção da peça, ou seja, barreiras referentes principalmente às máquinas de MA. Para processar peças complexas com novos materiais, como Rene 95 ou N500, a operação adequada para cada máquina deve ser desenvolvida de acordo com a matéria-prima (PORTOLÉS et al., 2016).

Um processo de MA deve produzir resultados que possam ser replicados (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019), o que ainda é um desafio para diversas dessas tecnologias.

O tamanho da peça é limitado pelo volume de construção da máquina (ATZENI; SALMI, 2012; DUDA; RAGHAVAN, 2018; KRETZSCHMAR et al., 2018; SALMI et al., 2018). Ainda há uma limitação nos tipos de materiais disponíveis para a fabricação em MA (BAUMERS et al., 2016), sendo o titânio um dos materiais mais desafiadores, pois requer uma atmosfera inerte para uma deposição bem sucedida (SACCO; MOON, 2019). Poucas empresas como a Concept Laser™ e Renishaw™ produzem máquinas PBF que possibilitam construções em atmosfera inerte, assim como a BeAM™ para o processo DED.

A limpeza das peças e remoção de materiais de suporte, os quais podem ser necessários, são realizadas manualmente, comprometendo uma produção em série (SIMONS, 2018). Para otimizar o processo, um maior grau de automação deve ser alcançado (KRETZSCHMAR; ITUARTE; PARTANEN, 2018).

A maioria dos processos da MA para metais requer pós-processamento (DUDA; RAGHAVAN, 2018; KRETZSCHMAR et al., 2018; LEAL et al., 2017; SALMI et al., 2018; SCHMIDT et al., 2017), pois os processos ainda não apresentam precisão dimensional, propriedades mecânicas, acabamento superficial, entre outras qualidades muitas vezes exigidas.

Deve-se utilizar processos híbridos, realizando o pós-processamento na mesma plataforma que a MA foi realizada, mas ainda são poucas as alternativas. Muitas máquinas não possuem confiabilidade de hardware (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009) e embora muitos processos sejam capazes de deposição de múltiplos materiais, são poucos que têm implementações de hardware e software que permitem o uso eficaz desses recursos (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009).

Os parâmetros de operação de muitas máquinas ainda não são transferíveis para outras, ou de um laboratório para outro (ZADPOOR, 2018) o que pode impedir a repetitividade do processo, ou seja, uma peça pode apresentar características diferentes de uma máquina ou de um laboratório para outro. Kim et al. (2017) destaca que há uma falta de gestão de dados por meio de sistemas de gerenciamento de informações para auxiliar usuários do processo. Essas barreiras tecnológicas têm sido amplamente estudadas objetivando otimizar o *software de design*, o potencial das máquinas já existentes e auxiliar o projeto de novas.

4.1.4. Barreiras Financeiras

Atualmente é destacado por diversos autores que são elevados os custos de investimento em MA para metais (BAUMERS et al., 2016; DUDA; RAGHAVAN, 2018; VARTANIAN; MCDONALD, 2016; YI; GLÄSSNER; AURICH, 2019). Dentre os custos críticos estão os custos das máquinas (ATZENI; SALMI, 2012; BOURELL; LEU; ROSEN, 2009; MCGUIRE; RICE, 2019; NIAKI; NONINO, 2017), custo da matéria-prima (ATZENI; SALMI, 2012; BOURELL; LEU; ROSEN, 2009; KRETZSCHMAR; ITUARTE; PARTANEN, 2018; SRIRAM; SHUKLA; BISWAS, 2019) e custo de manutenção dos equipamentos (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009). O processo de qualificação também pode ser de alto custo (SHAPIRO et al., 2016), assim como o desenvolvimento de normas internas (SEIFI et al., 2017). Os custos de profissionais qualificados e treinados para trabalhar com o equipamento também podem ser elevados afetando os custos da empresa como um todo (ÖBERG; SHAMS, 2019).

A adoção da MA é de mais alto custo para pequenas empresas (NIAKI; NONINO, 2017), para as quais a relação custo-benefício ainda tem sido pouco favorável (BAUMERS et al., 2016). Devido ao elevado investimento inicial em máquinas, muitas instituições de pesquisa também não têm acesso à tecnologia (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009), o que pode retardar o desenvolvimento do país. As pesquisas podem produzir inovações e assim alavancar a tecnologia. A produção de peças metálicas tem altos custos de processamento e de pó para a maioria das empresas de pequeno e médio porte (SIMONS, 2018). Atualmente a MA é mais indicada para produção de lotes menores com altos índices de customização. Não importa o quanto um produto ou processo seja inovador, a empresa deve vislumbrar o benefício financeiro, senão a nova tecnologia provavelmente será rejeitada até que esse fator deixe de ser uma barreira (WANG, 2018).

4.1.5. Barreiras da Qualidade

Diversos estudos para ultrapassar as barreiras da qualidade estão sendo realizados pela academia e pelas empresas. As barreiras de qualidade põem ser quanto ao material, ao monitoramento, assim como à inspeção e qualidade do produto final.

A qualidade do material produzido por MA, está diretamente relacionado ao desempenho da peça produzida. Em muitos casos não é possível garantir as propriedades do material para um determinado processo de MA (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009). Materiais

anisotrópicos, por exemplo, podem resultar devido à fabricação em camadas, resultando em um desempenho inadequado (JIMÉNEZ et al., 2019). Atualmente, para a maioria dos processos de MA, apenas um número limitado de ligas metálicas foi criteriosamente caracterizado (SHAPIRO et al., 2016), ou seja, é pequeno o portfólio de ligas disponíveis com suas propriedades tabeladas e conhecidas (ATZENI; SALMI, 2012; KRETZSCHMAR et al., 2018; SCHMIDT et al., 2017). Também tem sido um grande desafio a produção do pó, controlando a qualidade das ligas, o tamanho, formato e a distribuição das partículas de pó, sua microestrutura, etc. (SHAPIRO et al., 2016; SRIRAM; SHUKLA; BISWAS, 2019). Assim, a qualidade da matéria-prima interfere diretamente nas propriedades dos materiais produzidos (FLYNN et al., 2016).

O monitoramento dos processos de deposição também é um fator crítico para garantir a qualidade do processo e viabilizar a produção em série de peças em MA. É evidenciado na literatura que há uma necessidade maior de controle do processo para garantir a qualidade (AMINI; CHANG; RAO, 2019; O'BRIEN, 2019; SRIRAM; SHUKLA; BISWAS, 2019; STRONG et al., 2017; VARTANIAN; MCDONALD, 2016) e a repetibilidade do processo. Faltam sistemas de monitoramento dos processos (AMINI; CHANG, 2018) e os parâmetros geralmente não têm sido controlados ao longo da deposição (O'BRIEN, 2019). A qualidade das peças fabricadas apresenta variações, muito embora os principais parâmetros da deposição tenham sido mantidos constantes (HU; MAHADEVAN, 2017; MALEKIPOUR; ELMOUNAYRI, 2018), comprometendo a repetitividade do processo (MALEKIPOUR; ELMOUNAYRI, 2018). Portanto, pode-se afirmar com base na RBS, que falta rastreabilidade para promover a produtividade, a repetibilidade do processo e a reprodutibilidade da qualidade das peças fabricadas (KIM et al., 2017). Mesmo com monitoramento problemas podem surgir nas peças (LEAL et al., 2017), no entanto, esse é um pré-requisito para a garantia da qualidade em qualquer processo de fabricação. Assim sensores, sistemas de controle em malha fechada para manter os parâmetros do processo, como a potência do laser, o tamanho da poça de fusão, manutenção da temperatura uniforme na região de construção da peça, devem ser estudados e adaptados para os processos de MA (SRIRAM; SHUKLA; BISWAS, 2019).

A inspeção das peças, após a deposição também tem sido um desafio extra e é necessário desenvolver esses sistemas para auxiliar a repetitividade da fabricação com tolerâncias dimensionais consistentes sem variações de uma máquina para outra (HARRIS, 2012). O processo de qualificação de uma peça para uso em aeronáutica, por exemplo, pode ser muito demorado (SHAPIRO et al., 2016) e pequenas variações no material ou na

geometria podem afetar as características finais da peça de forma local ou global (KIM et al., 2017), sendo muitas as variações geométricas e de propriedades entre peças “idênticas” quando construídas em máquinas diferentes (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009).

A qualidade do produto final apresenta diversos problemas identificados na literatura. Acabamento superficial inadequado (BAUMERS et al., 2016; FLYNN et al., 2016; JIMÉNEZ et al., 2019; PORTOLÉS et al., 2016; SCHMIDT et al., 2017; SHAPIRO et al., 2016), como rugosidade, efeito *balling*, deformação da superfície oxidação da mesma (MALEKIPOUR; EL-MOUNAYRI, 2018). Tolerâncias em níveis inferiores aos especificados para certas aplicações (ATZENI; SALMI, 2012; KRETZSCHMAR et al., 2018), muitas vezes inferiores àquelas proporcionadas pela manufatura convencional (JIMÉNEZ et al., 2019). A precisão dimensional de algumas tecnologias de MA ainda não é adequada para diversas aplicações já conhecidas em diversas áreas (ATZENI; SALMI, 2012; BAUMERS et al., 2016; DUDA; RAGHAVAN, 2018; FLYNN et al., 2016; KRETZSCHMAR et al., 2018; MALEKIPOUR; EL-MOUNAYRI, 2018; PORTOLÉS et al., 2016). Problemas na microestrutura de materiais fabricados por MA, tais como anisotropia, heterogeneidade e porosidade são grandes problemas dependendo da aplicação (MALEKIPOUR; EL-MOUNAYRI, 2018). A espessura mínima da parede a ser fabricada depende muito do processo adotado (ATZENI; SALMI, 2012). As propriedades mecânicas nem sempre são tão boas quanto às obtidas pelas técnicas de fabricação convencionais (FLYNN et al., 2016; ZADPOOR, 2018) podendo apresentar falhas e tensões residuais não identificadas em outros processos tradicionais (O'BRIEN, 2019). De maneira geral, pode-se afirmar que há diversas dificuldades tecnológicas para que se possa garantir uma qualidade adequada às peças produzidas por MA (AMINI; CHANG, 2018; GALANTUCCI et al., 2019).

4.1.6. Barreiras de Projeto

Desenvolver projetos adotando MA como processo de fabricação pode apresentar diversas barreiras já na fase inicial. A escolha do material é um fator crítico nesta etapa sendo que a variedade, ou a falta, de ligas mais adequadas pode afetar o desenvolvimento do projeto (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009). É menor a disponibilidade de fornecedores de matéria-prima para a MA (SRIRAM; SHUKLA; BISWAS, 2019) e em muitos casos há uma dificuldade de se obtê-lo, principalmente devido à distância dos fornecedores das empresas que estariam usando o material (STRONG et al., 2018). Mesmo com um aumento da variedade de ligas metálicas com o passar dos anos, ainda há uma dificuldade de prever as

propriedades das peças impressas, que sirvam de guia para o projeto (SACCO; MOON, 2019). No projeto de produtos usando MA é necessário realizar o *design* adequado para o material de acordo com o processo utilizado (SCHMIDT et al., 2017), levando-se em conta a sequência de deposição e de acabamento, caso necessário. A escolha dos parâmetros do processo também é de grande importância para produzir material com boas propriedades mecânicas (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019). A disponibilidade dos dados ainda é limitada para os processos de MA (BÖCKIN; TILLMAN, 2019) e muitas empresas fornecem o equipamento em uma arquitetura fechada impedindo que as organizações e pesquisadores realizem alterações nas condições de processamento (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009).

Ao projetar uma peça há uma dificuldade de se visualizar o material de suporte e removê-lo do substrato (ATZENI; SALMI, 2012; SCHMELZLE et al., 2015), para alguns processos de MA. As peças metálicas aderem ao substrato no qual foram depositadas, sendo necessário um pós-processamento para a sua remoção. A necessidade de suportes aumenta o tempo de construção e afeta o acabamento da peça (SALMI et al., 2018). Os projetos devem ser elaborados de forma que não se eleve significativamente o tempo de construção, não afete consideravelmente o acabamento e que seja de fácil separação a peça do substrato. Em muitos casos são necessário suportes internos de difícil remoção (SCHMELZLE et al., 2015), sendo uma das soluções projetar estruturas mais leves que não sejam removidas.

Para casos em que a peça é maior que a área possível de construção da máquina pode-se dividir em partes e montá-la após a produção (SALMI et al., 2018), o que pode ser demorado e um desafio ao desenvolver o projeto. A dificuldade de modelar o processo de fabricação (SACCO; MOON, 2019; SRIRAM; SHUKLA; BISWAS, 2019), a dependência da direção de construção (ATZENI; SALMI, 2012), e em muitos casos a indisponibilidade do modelo 3D de uma peça de reposição que não está disponível para digitalização (KRETZSCHMAR et al., 2018), também podem ser barreiras encontradas pelas empresas ao desenvolver seus projetos.

4.1.7. Barreiras Normativas

Diversos autores destacam que há uma quantidade limitada de normas (HARRIS, 2012; YI; GLÄSSNER; AURICH, 2019) e as existentes não estão bem estabelecidas para MA (PORTOLÉS et al., 2016). Há falta de normas e modelos, padrões de uso da tecnologia, desde o *design* até o pós-processamento, para os diversos processos já consolidados, materiais e classificação de tecnologias existentes (SACCO; MOON, 2019; SRIRAM; SHUKLA;

BISWAS, 2019). Normas gerais foram desenvolvidas, mas o escopo é limitado, e faltam diretrizes abrangentes e completas (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019; SACCO; MOON, 2019). O ritmo acelerado de desenvolvimento da tecnologia dificulta o estabelecimento das normas (O'BRIEN, 2019) e muitos estudos de novos processos e novos materiais exigem novas normas e certificações. Pela RBS realizada constatou-se que faltam parâmetros de processo certificados para uma peça e procedimentos de teste específicos (SRIRAM; SHUKLA; BISWAS, 2019), faltam procedimentos consolidados (GRAZIOSI et al., 2017), e faltam requisitos e normas governamentais (O'BRIEN, 2019). Deve-se ressaltar que o desenvolvimento de normas geralmente é demorado tanto para normas internas quanto em órgão reguladores privados ou governamentais (SEIFI et al., 2017; VARTANIAN; MCDONALD, 2016).

A certificação de fornecedores da matéria-prima assim como os que realizam o pós-processamento, entre outros pode ser uma barreira a mais para as empresas que intenciam adotar MA na sua cadeia de suprimentos (SHAPIRO et al., 2016). Faltam metodologias maduras de certificação e qualificação para garantir que não haja variações no processo, material ou geometria que possam afetar as características da peça (KIM et al., 2017). É necessário que todas as empresas envolvidas na fabricação da peça, desde a matéria-prima até o pós-processamento tenha certificações para garantir a qualidade do produto.

Na busca bibliográfica, notou-se que foram escassas as certificações e qualificações relacionadas ao material produzido por MA, as quais forneçam características e propriedades para um processo específico (SRIRAM; SHUKLA; BISWAS, 2019) e qualificação de materiais para dados de *design* e para o estabelecimento da cadeia de suprimentos que permitam a repetibilidade do produto (HARRIS, 2012). O desenvolvimento de novos materiais e máquinas dificultam a criação de procedimentos padrões para esses processos (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019), sendo necessário criar normas para os novos materiais e equipamento, que muitas vezes não se enquadram nas normas já desenvolvidas, fato que dificulta a criação de um procedimento padrão.

Os testes de avaliação da qualidade da peça estão sendo estudados, porém há a necessidade de identificar testes não destrutivos para a identificação de falhas (O'BRIEN, 2019). Em aplicações críticas, como no setor aeronáutico, em que a consequência de falhas é muito grave, a qualificação das peças por testes não destrutivos pode ser mais difícil (SEIFI et al., 2017). Faltam técnicas avançadas de ensaios não destrutivos capazes de detectar defeitos críticos internos em materiais com alto grau de certeza (PORTOLÉS et al., 2016) o que seria desejável principalmente para deposições por MA. O estudo de Seifi et al. (2017) resume as

atividade que estão sendo realizadas para a criação de normas, assim como as limitações associadas a normas disponíveis para MA de metais. Os autores se concentram em processos de metais devido ao alto nível de criticidade das peças produzida por esses processos e pelos mercados a que se destinam tais produtos.

4.1.8. Barreiras Ambientais

São poucos os estudos sobre as consequências ambientais da adoção de MA. A escolha do material e como isso impacta o ambiente é importante (BÖCKIN; TILLMAN, 2019). Kamps et al. (2018) destaca em seu estudo usando processos PBF, LBM (*Laser Beam Melting*) as significativas perdas de material. Perdas podem ocorrer durante o processo de deposição ou devido à necessidade de suportes que posteriormente serão removidos. A impossibilidade de reciclar o material que não foi fundido durante alguns processos (GALANTUCCI et al., 2019) pode ser uma barreira crítica, trazendo prejuízos financeiros e impacto ambiental.

As barreiras apresentadas poderão ser identificadas, ou não, na migração da tecnologia convencional para MA, variando conforme a empresa, dependendo de seu porte, localização, cultura, área de atuação, entre outros fatores. A indústria e instituições de pesquisas estão realizando diversos trabalhos para vencer essas barreiras. Os desafios serão superados à medida que as organizações iniciantes otimizem a tecnologia e avanços sejam realizados na produção dos materiais, permitindo custos mais baixos e um caminho mais flexível para o desenvolvimento e transição para a MA e/ou híbrida (VARTANIAN; MCDONALD, 2016). O Quadro 3 sumariza as 71 barreiras identificadas na revisão, discutidas até este ponto.

Quadro 3: Barreiras Identificadas na RBS

Nº	Autor	Barreira	Classe
1	Bourell; Leu e Rosen (2009)	Diferenças culturais	Organizacionais
2	Yi; Glässner; Aurich (2019)	Imprevisibilidade dos riscos em adotar a tecnologia	
3	Strong et al. (2018)	Desafio da modificação dos processos tradicionais para os aditivos	
4	Wang (2018)	Dificuldade em ver os benefícios que a MA pode trazer para a empresa	
5	Kretzschmar et al. (2018)	Tamanho e recursos da empresa	
6	Kietzmann; Pitt e Berthon (2015)	Riscos de perda de mercado devido a imitações do produto da empresa	
7	Bourell; Leu e Rosen (2009) Yi; Glässner; Aurich (2019)	Falta de conhecimento da tecnologia de MA e seu potencial	Educacionais

8	Bourell; Leu e Rosen (2009)	Falta de treinamentos e cursos disponíveis para as empresas	
9	Vartanian; McDonald (2016)	Dificuldades em aprender a trabalhar com esses novos equipamentos	
10	Duda e Raghavan (2018)	Escassez de especialistas	
11	Strong et al. (2017)	Necessidade de educar os clientes sobre os potenciais da MA	
12	O'Brien (2019)	Dificuldades para idealizar um produto fabricado por MA	
13	Shapiro et al. (2016)	Falta de conhecimento de procedimentos estatísticos de controle e qualificação	
14	Schmidt et al. (2017) Sriram; Shukla e Biswas (2019)	Falta de software integrado especializado em MA que abranja design e simulação	Tecnológicas
15	Shapiro et al. (2016)	Qualidade do modelo inicial do computador e a tradução para uma máquina específica pode ser comprometida	
16	Schmelzle et al. (2015)	Necessidade de aumento da capacidade de processamento para análises estruturais mais complexas	
17	Jiménez et al. (2019)	Erros podem ser proporcionados pelo software de modelagem.	
18	Portolés et al. (2016)	Parâmetros de processo específicos para cada material	
19	Calignano; Galati; Iuliano (2019)	Dificuldade em garantir a repetibilidade dos resultados	
20	Atzeni e Salmi (2012) Duda e Raghavan, (2018) Kretzschmar et al. (2018) Salmi et al. (2018)	Limitação do tamanho da peça pelo volume de processamento da máquina	
21	Baumers et al. (2016) Duda e Raghavan, (2018)	Elevado tempo de processamento	
22	Baumers et al. (2016)	Restrição de materiais compatíveis com o processo	
23	Simons (2018)	A limpeza das peças e remoção de materiais de suporte, de forma manual	
24	Duda e Raghavan, (2018) Kretzschmar et al. (2018) Leal et al. (2017) Salmi et al. (2018) Schmidt et al. (2017)	A maioria dos processos de MA requer pós-processamento	
25	Bourell; Leu e Rosen (2009)	Muitas máquinas não possuem confiabilidade de hardware	
26	Zadpoor (2018)	Incompatibilidade dos parâmetros de operação entre máquinas distintas	
27	Kim et al. (2017)	Falta de gestão de dados por meio de sistemas de gerenciamento de informações para auxiliar o processo.	

28	Atzeni e Salmi (2012) Bourell; Leu e Rosen (2009) McGuire e Rice (2019) Niaki e Nonino (2017)	Custo Maquinário	Financeiras
29	Atzeni e Salmi (2012) Bourell; Leu e Rosen (2009) Kretzschmar; Ituarte e Partanen (2018) Sriram; Shukla e Biswas (2019)	Custo Matéria prima	
30	Bourell; Leu e Rosen (2009)	Custo Manutenção dos equipamentos	
31	Shapiro et al. (2016)	Custo Processo de qualificação	
32	Seifi et al. (2017)	Custo Desenvolvimento de normas internas	
33	Öberg e Shams (2019)	Custo Profissionais qualificados e treinados	
34	Bourell; Leu e Rosen (2009)	Impossibilidade de garantir as propriedades do material para um determinado processo de MA	De Qualidade
35	Jiménez et al. (2019)	Materiais anisotrópicos podem resultar devido à fabricação em camadas, resultando em um desempenho inadequado	
36	Shapiro et al. (2016)	Apenas um número limitado de ligas metálicas foi criteriosamente caracterizado	
37	Shapiro et al. (2016) Sriram; Shukla e Biswas (2019)	Grande desafio para as empresas produtoras de pó no controle das características das ligas como, microestrutura, tamanho, formato e distribuição das partículas de pó.	
38	Amini; Chang e Rao (2019) O'Brien (2019) Sriram; Shukla e Biswas (2019) Strong et al. (2017) Vartanian; McDonald (2016)	Maior necessidade de controle do processo para garantir a qualidade	
39	Malekipour e El-Mounayri (2018)	Necessidade de controle para garantir a repetibilidade do processo	
40	Amini; Chang e Rao (2019)	Falta de sistemas de monitoramento dos processos de MA	
41	O'Brien (2019)	Falta de controle dos parâmetros ao longo da deposição	
42	Hu e Mahadevan (2017) Malekipour e El-Mounayri (2018)	A qualidade das peças fabricadas apresenta variações	
43	Harris (2012)	A inspeção das peças tem sido um desafio	
44	Kim et al. (2017)	Pequenas variações no processo podem afetar as características finais da peça de forma local ou global	
45	Bourell; Leu e Rosen (2009)	Há variações na peça se construída em máquinas diferentes.	

46	Baumers et al. (2016) Flynn et al. (2016) Jiménez et al. (2019) Portolés et al. (2016) Schmidt et al. (2017) Shapiro et al. (2016)	Acabamento superficial inadequado	
47	Atzeni e Salmi (2012) Kretzschmar et al. (2018)	Tolerâncias em níveis inferiores aos especificados	
48	Atzeni e Salmi (2012) Baumers et al. (2016) Duda e Raghavan, (2018) Flynn et al. (2016) Kretzschmar et al. (2018) Malekipour e El-Mounayri (2018) Portolés et al. (2016)	A precisão dimensional inadequada	
49	Malekipour e El-Mounayri (2018)	Problemas na microestrutura	
50	Flynn et al. (2016) Zadpoor (2018)	As propriedades mecânicas nem sempre são tão boas quanto às obtidas pelas técnicas de fabricação convencionais	
51	Bourell; Leu e Rosen (2009)	Dificuldade na escolha do material, devido a variedade, ou a falta, de ligas mais adequadas	De Projeto
52	Sriram; Shukla e Biswas (2019)	Disponibilidade restrita de fornecedores de matéria-prima para a MA	
53	Sacco e Moon (2019)	Dificuldade de prever as propriedades das peças impressas	
54	Schmidt et al. (2017)	Determinação do design adequado para o material de acordo com o processo utilizado	
55	Böckin e Tillman, (2019)	Disponibilidade dos dados limitada para processos de MA	
56	Atzeni e Salmi (2012) Schmelzle et al. (2015)	Dificuldade de se visualizar o material de suporte e removê-lo do substrato	
57	Salmi et al. (2018)	Peças metálicas aderem ao substrato no qual foram depositadas, sendo necessário um pós-processamento para a sua remoção	
58	Sacco e Moon (2019) Sriram; Shukla e Biswas (2019)	Dificuldade de modelar o processo de fabricação	
59	Kretzschmar et al. (2018)	Indisponibilidade do modelo 3D de uma peça de reposição que não está disponível para digitalização	
60	Harris (2012) Yi; Glässner e Aurich (2019)	Quantidade limitada de normas relacionadas a MA	Normativas
61	Sacco e Moon (2019) Sriram; Shukla e Biswas (2019)	Falta de normas e modelos, padrões de uso da tecnologia, desde o design até o pós-processamento	

62	Sriram; Shukla e Biswas (2019)	Faltam parâmetros de processo certificados para uma peça e procedimentos de teste específicos	
63	Graziosi et al. (2017)	Faltam procedimentos consolidados	
64	O'Brien (2019)	Faltam requisitos e normas governamentais	
65	Seifi et al. (2017) Vartanian; McDonald (2016)	O desenvolvimento de normas geralmente é demorado tanto para normas internas quanto em órgão reguladores privados ou governamentais	
66	Shapiro et al. (2016)	Necessidade de certificar fornecedores da matéria prima assim como os que realizam o pós-processamento	
67	O'Brien (2019)	Necessidade de identificar testes não destrutivos para a identificação de falhas	
68	Portolés et al. (2016)	Falta de técnicas avançadas de ensaios não destrutivos capazes de detectar defeitos críticos internos em materiais com alto grau de certeza	Ambientais
69	Böckin e Tillman (2019)	Falta de estudos que avaliem o impacto ambiental do material selecionado	
70	Kamps et al. (2018)	Perda de material significativa em alguns processos	
71	Galantucci et al. (2019)	Impossibilidade de reciclar o material em alguns processos.	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.2. Parte II: Roteiro para a Implementação da MA

Para a superação das barreiras, dentre as 8 classes apresentadas, um roteiro para a implantação de MA pode guiar a empresa. Na Figura 16 as 8 classes de barreiras foram separadas em estágios de adoção. Inicialmente, a organização deve iniciar pelas barreiras organizacionais, educacionais e financeiras, pois se superadas, parcial ou integralmente, uma equipe interna terá os requisitos fundamentais para prosseguir. No segundo estágio, as barreiras tecnológicas, de projetos e de qualidade serão o foco da equipe. Neste estágio a tecnologia já estará sendo absorvida pela empresa, tanto na criação do produto quanto do processo de fabricação. No terceiro e último estágio, superar as barreiras normativas e ambientais tornará possível a utilização e implementação da tecnologia na empresa. É importante destacar que mesmo divididas em estágios, uma barreira que está em uma classe pode afetar outra classe, sendo importante ter conhecimento dos possíveis obstáculos e se preparar para superá-los.

Figura 16: Sequência de superação das barreiras

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O roteiro proposto nesta pesquisa, Figura 17, busca revelar os principais aspectos necessários para a implementação da MA em uma empresa, e auxiliar na adequação à I4.0. O roteiro propõe um guia geral para a implantação, o qual pode ser adaptado para casos específicos e situações particulares.

O trabalho de Girdwood et al. (2017) apresenta uma estrutura para investigar a eficiência de recursos da adoção da MA, destacando os principais fatores que afetam o *design*, o planejamento e a qualificação do processo MA, os quais abrangem algumas etapas do roteiro desenvolvido neste trabalho. A proposta do roteiro foi dividida em três fases, assim como o modelo de Rozenfeld et al. (2006): Pré-desenvolvimento; Desenvolvimento; e Pós-desenvolvimento, buscando manter a iteração entre as etapas assim como no padrão apresentado por Leffingwell (2010). A fase de Pré-desenvolvimento foi subdividida nas seguintes etapas: Análise cultural; Estudo da tecnologia; Identificação de Oportunidades e; Estudo de Viabilidade, sendo criado ao final desta fase um *backlog*. A fase seguinte, Desenvolvimento, foi subdividida em: Desenvolvimento do Produto (DPd) e Desenvolvimento do Processo (DPc) de MA, cada um contendo um processo de iteração. O DPd é necessário, pois os produtos existentes deverão ser redesenhados adaptando-se a MA. Para o DPd as etapas são: *Design* para a MA (DfAM – *Design for Additive Manufacturing*); Construção da Peça; Testes; e Avaliação pelo Cliente. Estas etapas devem ser seguidas de forma iterativa, de preferência com a participação dos clientes internos (setores dentro da própria organização como marketing, engenharia, produção, setor financeiro, todos que serão

impactados pelo projeto) e externos, até alcançar o produto desejado. Após a obtenção do produto pode-se ter a Produção Terceirizada ou Produção Interna.

Para implementar a Produção Interna com MA é necessário criar uma segunda equipe que iniciará um novo *backlog* com as seguintes etapas: Ajuste do Processo; *Tryout*; e Gestão da Qualidade. Esse ciclo deve ser repetido iterativamente até que se obtenha o processo adequado e o produto com as especificações desejadas.

Na fase de Pós-desenvolvimento as etapas são: Validação do Projeto e a Supervisão do Processo.

Figura 17: Roteiro para a adoção da MA

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.2.1. Fase de Pré-desenvolvimento

Para realizar as primeiras etapas, desta fase, uma equipe deve ser criada, de preferência com integrantes de diversas áreas (compras, produção, desenvolvimento de produtos, etc). É importante criar uma equipe multidisciplinar para obter visões diferentes e gerar diversas ideias nas primeiras etapas. A equipe não deve ser grande (max. 10 pessoas, por exemplo), mas o comprometimento dos integrantes tem grande impacto no tempo de implantação e na qualidade dos resultados. Nesta fase o foco da equipe será superar as barreiras do primeiro estágio de adoção, ou seja, as organizacionais, educacionais e financeiras. Reuniões diárias devem ser realizadas para auxiliar a equipe na evolução pelas etapas do roteiro, para que a equipe saiba quais os próximos passos a serem realizados e como superar as barreiras.

4.2.1.1. Análise Cultural

Em algumas empresas as barreiras culturais são um dos fatores que dificultam a adoção da MA, por ser de alto caráter inovador. A cultura é a ordem social tácita de uma organização, define o que é encorajado, desencorajado, aceito ou rejeitado dentro do grupo (GROYSBERG et al., 2018). Analisar a cultura da empresa é importante para identificar os possíveis obstáculos que os integrantes da organização podem proporcionar. Existem diversas abordagens para avaliar a cultura organizacional, sendo destacadas o Instrumento de Avaliação da Cultura Organizacional (*Organizational Culture Assessment Instrument - OCAI*), a Pesquisa de Cultura Organizacional Denison (*Denison Organizational Culture Survey - DOCS*), o Inventário de Cultura Organizacional (*Organizational Culture Inventory - OCI*); e o Perfil de Cultura Organizacional (*Organizational Culture Profile - OCP*) (CHATMAN; O'REILLY, 2016). O OCAI é apresentado no livro de Cameron e Quinn (2006), que classifica quatro tipos de cultura: Clã, Adhocracia, Hierarquia e Mercado, sendo destacado pelos autores como provavelmente o instrumento mais usado para avaliar a cultura organizacional. O OCAI foi desenvolvido para identificar a cultura atual de uma empresa, e auxiliar os membros de uma organização na identificação da cultura que desejam desenvolver para enfrentar os desafios das novas oportunidades (CAMERON; QUINN, 2006). Utilizar um instrumento como o OCAI pode ajudar a equipe de implantação da MA, evidenciando as possíveis modificações culturais necessárias para facilitar a adoção.

4.2.1.2. Estudo da Tecnologia

Nesta etapa do roteiro de implementação, os conceitos da MA são pesquisados e os diversos processos estudados selecionando-se os mais adequados para o ramo de negócios, campo de atuação e abrangência da empresa. Algumas atividades que podem favorecer essa etapa são: a participação em *workshops* e congressos que tenham a MA como destaque, *benchmark* de casos de implementação da tecnologia no setor de interesse da empresa, e participar de cursos de difusão. Para assim superar algumas das barreiras educacionais.

4.2.1.3. Identificação de Oportunidades

Para identificar as oportunidades, a equipe deve ter um amplo conhecimento dos produtos da empresa e deve determinar qual o nível de adoção da MA (Figura 5) que deseja

alcançar. Analisando o portfólio da empresa e tendo amplo conhecimento das tecnologias de MA e dos potenciais usos desta para os produtos, as oportunidades devem trazer benefícios de produção em relação aos processos convencionais de forma que a empresa gere lucro com a aplicação. Sendo assim a empresa pode fazer uma análise de portfólio para identificar oportunidades, ou explorar oportunidades em novos produtos.

Segundo Niaki e Nonino (2017) os fatores-chave na implementação da MA são: Objetivo da implementação da MA (produção de peças para produtos, protótipos, entre outros); Tipo de material; Tempo de uso; Transição da manufatura tradicional para a MA; e Tamanho da empresa. Os autores destacam que empresas que fizeram a transição da manufatura convencional para a MA atualmente usam as duas técnicas, enquanto que as que iniciaram com MA usam apenas a MA (NIAKI; NONINO, 2017). A escolha da tecnologia depende da aplicação que está sendo planejada (JIMÉNEZ et al., 2019).

Sendo assim, para identificar as oportunidades e implementar a MA dever-se ter bem definido o objetivo do uso da tecnologia, para a produção de peças finais ou de protótipos, tipo de material, o tempo de utilização, a transição necessária (utilizará apenas MA ou MA mais manufatura convencional), para assim em seguida avaliar a viabilidade da aplicação.

4.2.1.4. Estudo de viabilidade

Nesta etapa é realizado um estudo para verificar a viabilidade da adoção da MA na empresa. Nela deve ser definida a tecnologia a ser utilizada, um *design* inicial da peça deve ser elaborado e a análise de custo deve ser desenvolvida. A peça pode ser um novo produto ou um já existente que será adaptado para o processo de MA.

Selecionar o processo MA adequado requer uma ampla compreensão das iterações entre a qualidade, propriedades, custo da peça, volume de deposição, tempo de deposição, entre outros aspectos (CRUZ; BORILLE, 2017). Por exemplo, uma empresa aeronáutica requer alta qualidade da peça e propriedades mecânicas de acordo com a aplicação. Neste caso custo e volume de produção podem não ser fatores críticos. Estes e outros critérios devem ser levados em consideração para a seleção do processo. A escolha do processo de MA pode ser realizada utilizando ferramentas de tomada de decisão, a fim de selecionar o melhor processo de acordo com as necessidades de cada empresa e seu mercado de atuação. O trabalho de Cruz e Borille (2017) utiliza técnicas de tomada de decisão multicritérios para verificar se o processo de MA é melhor que um processo tradicional, e verifica o melhor método para a comparação. Estudos como este podem auxiliar as empresas a escolher o

processo adequado para aplicações específicas e para avaliar se a MA é viável para estes casos.

A adaptação do produto para MA, nesta etapa, deve ser simples para possibilitar a análise de custo da peça e do processo de fabricação. O ideal é que este modelo seja desenvolvido em conjunto com especialistas para que a análise de custo seja mais próxima possível da realidade. O futuro não está apenas em aplicações em projetos existentes, mas no desenvolvimento de projetos com a MA em mente, explorando ao máximo o potencial da tecnologia (SHAPIRO et al., 2016). Por esse motivo a participação de especialista poderá promover um maior benefício do uso da tecnologia, uma vez que estes idealizam o produto integrando todos os benefícios de *design* para MA (DfMA) o que será mais bem detalhado na fase de Desenvolvimento (Figura 17).

Análises de custo são realizadas nos trabalhos de Atzeni e SALMI (2012); Baumers et al. (2016, 2017) e de Kamps et al. (2018), propondo modelos que podem auxiliar as empresas na avaliação dos custos quando usam MA. O estudo de Atzeni e Salmi (2012) conclui que a MA é adequada para produções de pequeno a médio tamanho de lote, mesmo de produtos metálicos para aplicações. O estudo de Baumers et al. (2017) mostra que a adoção da MA leva a uma economia de custo unitário de 36% a 46%, dependendo da configuração do processo e de acordo com Baumers et al. (2016) a produtividade do processo adotado é um fator central do custo de fabricação. O retorno sobre o investimento (ROI – *Return of Investment*) será influenciado pelo tipo de material e objetivo de uso do produto fabricado (NIAKI; NONINO, 2017).

O tamanho da empresa também pode ser um fator importante (NIAKI; NONINO, 2017), pois atualmente os investimentos ainda são elevados e inviáveis para muitas empresas de pequeno e médio porte, no Quadro 4 é apresentada uma cotação realizada em abril de 2018 na empresa BeAM™ para a compra de uma máquina DED. Além disso, é necessária uma equipe focada em desenvolver o projeto de forma ágil e eficiente, e muitas vezes as pequenas empresas não têm pessoal específico para esta tarefa.

Quadro 4: Cotação de máquina DED

Descrição	Valor
Modulo 250 – 5 Eixos Máquina DED	US\$ 704.803,26

Fonte: Elaborado pela autora (2020), informações extraídas da invoice.

São poucos os estudos para analisar o ciclo de vida de uma peça produzida em MA e avaliar impactos no meio ambiente e na saúde humana como o realizado na pesquisa de Böckin e Tillman (2019). Porém, é de grande importância que uma empresa leve em consideração os possíveis impactos na sua produção, no meio ambiente e na saúde humana.

Ao final desta fase, o primeiro *backlog* é criado para o DPd, e as tarefas são definidas e estimadas (LEFFINGWELL, 2010), para assim iniciar a fase de Desenvolvimento. O *Backlog* é colocado no roteiro para auxiliar a equipe no gerenciamento do projeto, promovendo agilidade na adoção da MA.

4.2.2. Fase de Desenvolvimento

A fase de desenvolvimento é dividida em duas partes, o desenvolvimento do produto (DPd), e o desenvolvimento do processo (DPc). A segunda parte só será realizada em casos que a empresa realize a produção internamente. Aqui se inicia a segunda fase na adoção de MA, em que a empresa deve superar as barreiras tecnológicas, de projeto e de qualidade ao decorrer das etapas.

4.2.2.1. Desenvolvimento do Produto (DPd)

Esta primeira parte visa desenvolver o produto em uma série de iterações até que se alcancem as especificações desejadas. Ao final, a empresa pode optar por terceirizar a produção, ou desenvolver internamente.

4.2.2.1.1. Design para a MA (DfAM)

Esta etapa é uma continuação da realizada no Pré-desenvolvimento, ou seja, a peça será estudada e modelada para se obter o primeiro protótipo. Formas de DfAM estão sendo amplamente estudadas por muitos pesquisadores e profissionais para os processos PBF e DED, os quais continuarão a evoluir conforme as melhorias das máquinas e o desenvolvimento da própria tecnologia (SCHMELZLE et al., 2015). O estudo de Ponche et al. (2014) apresenta uma metodologia de *design* para a MA (DfAM) considerando os requisitos de projeto e as especificidades de fabricação como orientação da peça, melhor geometria e estratégia de construção. O conhecimento dos tipos de pós-processamentos e como ter acesso a esse recurso, auxiliará na escolha do processo e dos materiais no início do DPd

(MILEWSKI, 2017). Quanto maior a necessidade de pós-processamento, menor o benefício gerado pela adoção da MA (MILEWSKI, 2017), porém, se bem desenvolvida a modelagem da peça, menor poderá ser a necessidade de pós-processamento.

Segundo os passos propostos por Gibson; Rosen e Stucker (2015), inicialmente é feita a modelagem em CAD, em seguida o modelo é convertido em formato STL (*Standard Tessellation Language*), o qual é transferido para a máquina de MA realizando os ajustes do arquivo para verificar se está correto o tamanho, a posição e a orientação para construção. Em 2011 a ASTM introduziu um formato de arquivo para a MA (*Additive Manufacturing File - AMF*) como uma alternativa ao formato STL (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019), porém o STL ainda é o mais utilizado pelas máquinas. Após o *design* e ajustes do arquivo, passa-se à construção da peça.

4.2.2.1.2. Construção da Peça

Nesta etapa a peça é construída por deposição e continua seguindo os passos propostos por Gibson; Rosen e Stucker (2015), ou seja, remoção da peça e pós-processamento. Para se atingir as funcionalidades da peça de metal geralmente um pós-processamento e acabamento são necessários (MILEWSKI, 2017). Nesta etapa deve-se analisar se a empresa tem os recursos para realizar a operação de pós-processamento ou se necessita enviar a um prestador de serviços.

4.2.2.1.3. Testes

Após a construção da peça, é importante executar testes para avaliar se o produto está de acordo com os padrões desejados. Nesta etapa a qualidade do produto é verificada por meio de testes não destrutivos detalhados, pois defeitos podem estar presentes como trincas, porosidade indesejada, rugosidade, entre outros não identificado visualmente. Os testes mais realizados são para avaliar a porosidade residual, trincas internas ou fusão insuficiente das camadas, trincas superficiais ou rugosidade inadequada, distorções geométricas devido ao uso de suportes inadequados, entre outros (GIRDWOOD et al., 2017). Esta etapa vai variar de acordo com a área de aplicação da empresa, podendo ser simples ou mais rigorosa.

4.2.2.1.4. Avaliação pelo cliente

A peça obtida será um protótipo funcional, estes devem exibir todas as características do produto final, sendo possível sua aplicação no ambiente em que será utilizado sem riscos de danificá-lo (CAMPBELL et al., 2007). Estando pronto, o protótipo é apresentado aos clientes internos ou externos para se obter um *feedback*.

Após essa primeira iteração nesta fase de Desenvolvimento e exposição aos clientes, as lições aprendidas são utilizadas para adaptar o processo de DPd (LEFFINGWELL, 2010), assim um novo *backlog* é criado e as etapas de *Design* para MA, Construção da Peça, Teste, e Avaliação pelo Cliente são repetidas. No mínimo três iterações são recomendadas para se obter o produto desejado. A primeira iteração parte da especificação do projeto do produto oferecido pelo cliente, na segunda obtém-se o *design* conceitual da peça e na terceira o *design* detalhado já pode ser atingido (CAMPBELL et al., 2007). Como mostrado no trabalho de Campbell et al. (2007), a partir do *feedback* dos clientes a natureza dos protótipos e o nível de detalhe mudam de uma iteração para outra. Uma vez que o *design* se torna mais detalhado, o protótipo se tornará uma representação totalmente funcional do produto final.

4.2.2.2. Desenvolvimento do processo (DPc)

A pós a obtenção do produto a empresa poderá terceirizar a construção, ou produzir internamente. Jiang; Kleer e Piller (2017) avaliam as possíveis tendências para 2030, e uma delas é a produção de peças em MA próxima aos clientes, induzindo à terceirização. Strong et al. (2018) realiza um estudo para investigar pontos estratégicos para a criação de centros de MA nos EUA. Desenvolve um modelo de localização criação de centros de MA, com base na demanda, localização, custo fixo, custo de produção e custo de transporte para oferecer serviços de MA para empresas de pequeno e médio porte e obter serviços de pós-processamento para as peças processadas em MA. O estudo identifica municípios candidatos nos EUA que poderiam servir como *hubs* de MA para as oficinas de máquinas existentes, estando também próximos a empresas que fariam algum pós-processamento.

No entanto, desenvolvimento do arranjo de produção dentro da própria empresa reduz custos de transporte, e de dispêndios se a peça for produzida por terceiros (STRONG et al., 2018). A produção na empresa pode ser por um processo apenas de MA, ou um processo híbrido, utilizado uma máquina híbrida ou um processo no qual a peça seja construída por uma máquina de MA e em seguida pós-processada em outra, já existente. Se a opção for

terceirizar, o roteiro se encerra, porém se a empresa realizar a produção interna uma nova equipe deve ser criada.

Nesta segunda parte da fase de Desenvolvimento uma nova equipe é formada para desenvolver a produção dentro da empresa. O ideal é ter integrantes da primeira equipe, e novos integrantes para adequar o processo, *layout*, etc. Responsáveis pela operação das máquinas devem receber treinamento e também participar das atividades da equipe de implementação.

Após a criação da equipe um novo *backlog* com as atividades a serem desenvolvidas deve ser criado para auxiliar o DPc da peça em MA, sendo o tempo do projeto estipulado, assim como a primeira iteração desenvolvida.

4.2.2.2.1. Ajuste do processo

Para a introdução da MA, algumas modificações no *layout* do sistema produtivos da empresa poderão ser necessários. Essas modificações vão variar de acordo com a aplicação. A MA poderá ser utilizada para a fabricação de peças de reposição (ZHANG et al., 2019); para a fabricação da peça final; ou para a fabricação de uma parte de um produto. A tecnologia adotada poderá ser apenas a MA, híbrida ou o *layout* do processo produtivo poderá incluir um pós-processamento (*layout* híbrido). Também devem ser feitas mudanças na infraestrutura da empresa para que esteja preparada para receber a MA, como treinamento de pessoal, entre outras modificações que auxiliem a introdução da MA no sistema produtivo.

4.2.2.2.2. Tryout

Nesta etapa são realizados os testes com o novo arranjo produtivo. Trata-se de uma etapa importante para a realização dos primeiros ajustes dos parâmetros e análise do produto. Os testes realizados no DPd também devem ser utilizados para os ajustes. É necessário ter um operador de MA para realizar os ajustes e garantir que o sistema esteja de acordo com as necessidades da aplicação (MILEWSKI, 2017).

4.2.2.2.3. Gestão da qualidade

Para garantir a qualidade e estabilidade do novo processo MA é exigido um conhecimento detalhado do processo e de suas limitações, para que a tecnologia se torne

adequada. Controlar a qualidade em MA envolve um conjunto de análises, medições e inspeções realizadas durante todo o processo de produção da peça, juntamente com a documentação necessária (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019). Aqui se inicia o terceiro e último estágio de adoção da MA onde as barreiras normativas e ambientais devem ser superadas.

Um procedimento de qualificação exige a avaliação e o controle de matérias-primas, consumíveis e parâmetros do processo, assim como o desenvolvimento de uma sequência de operações que devem ser seguidas para cada componente de MA produzido, de acordo com a tecnologia e materiais utilizados (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019). A principal forma de validar a qualificação do processo é a realização de diversos testes para verificar diferentes propriedades dos componentes produzidos. Com o resultado destes testes os parâmetros de processo podem ser ajustados para melhorar o desempenho da peça (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019). Esta etapa será dividida em monitoramento e estudo de normas.

4.2.2.2.3.1.Monitoramento

Estudos têm sido conduzidos para auxiliar o monitoramento do processo de deposição de peças produzidas em MA, para garantir a qualidade das peças e a repetibilidade do processo. Amini; Chang e Rao (2019) utilizam algoritmos de *Machine Learning* em amostra compartilhadas de diferentes máquinas no ciberespaço para o monitoramento. Malekipour e El-Mounayri (2018) analisam e classificam os defeitos comuns e os parâmetros que contribuem para os defeitos, apresentando o que é necessário no monitoramento *on-line* para obter uma peça sem falhas. O estudo de Amini e Chang (2018) propõe uma estrutura de monitoramento de processos, com o intuito de prever a probabilidade de uma impressão ser bem-sucedida, fornecendo um plano de controle durante o processo para evitar defeitos, usando técnicas orientadas a dados, com base em informações fornecidas pela máquina. Segundo Amini e Chang (2018) garantir a qualidade e reprodutibilidade são fatores chave para trazer a MA à escala industrial.

4.2.2.2.3.2.Estudo de Normas

De acordo com a área de aplicação um conjunto de normas deve ser estudada ou desenvolvida para se conseguir um processo qualificado. Muitos estudos como os de O'Brien

(2019) e o de Portolés et al. (2016) estão sendo realizados para investigar o desenvolvimento de processos de qualificação para a indústria aeronáutica/aeroespacial, que é a área com componentes mais críticos. Com a tecnologia cada vez mais voltada para a manufatura, existe uma demanda crescente do mercado por normas (NICKELS, 2016).

Normas de qualificação ou procedimentos para MA de metais tem sido amplamente definidos e adotados. Organizações como *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e a *American Welding Society* (AWS) tem criado normas paralelas, mas distintas para ligas metálicas produzidas por MA. Em 2013 a *International Organization for Standardization* (ISO) começou a colaborar com a criação de normas, e em 2016 a *National Additive Manufacturing Innovation Institute*, e a *American National Standards Institute* (ANSI) criaram a *America Makes* e a *ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative* (AMSC). A AMSC foi criada para coordenar e acelerar a criação das normas e especificações em nível industrial e facilitar o crescimento da MA (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019). Algumas normas de MA para metais são citadas a seguir. Normas gerais: ISO 17296-2:2015, VDI 3405, ISO/ASTM 52900:2015 e ISO/ASTM 52901-16. Normas para a etapa de design: ISO 17296-4:2014, ISO/ASTM 52910-17, ISO/ASTM 52910:2018, VDI 3405 Parte 3, VDI 3405 Parte 3.5, ISO/ASTM 52915:2016 e ISO/ASTM DIS 52902. Normas para os materiais: ASTM F3049-14, ASTM F3303-18, ASTM F2924-14, ASTM F3001-14, ASTM F3056-14e1, VDI 3405 Parte 2.2, ASTM F3184-16 e VDI 3405 Parte 2.1:2015-07 e correção relacionada datada 2017-01. E normas para o pós-processamento: ASTM F3122-14, ISO 17296-3:2014, VDI 3405 Parte 2, ISO/ASTM 52921:2013, ASTM F2971-13, ASTM F3301-18a (CALIGNANO; GALATI; IULIANO, 2019).

Duda e Raghavan (2018) identificaram algumas normas de terminologia da MA, ASTM F2792-12a e ISO/CD 17296-1, para o *design*, ISO/ASTM 52915-13 e ISO/DIS 17296-4, para materiais e processos, ASTM F2924-12a, ASTM F3001-13 e ISO/DIS 17296-2, e para métodos de teste ISO/ASTM 52921-13 e ISO/DIS 17296-3. Porém, há grande dificuldade na criação destas normas devido à variedade de processos e máquinas utilizados pelas empresas ainda no momento. As normas podem ser desenvolvidas em três níveis: Normas gerais (conceitos, guias, segurança); Normas para amplas categorias de materiais ou processos; e normas especializadas para um material específico, processo ou aplicação específica (SEIFI et al., 2017). A figura 18 apresenta a estrutura das normas de MA para a ASTM e ISO.

Figura 18: Estrutura das normas de MA para ASTM e ISO

Fonte: Adaptado de Seifi et al. (2017)

Após a análise de normas e testes realizados usando-se o sistema produtivo desenvolvido na empresa, um novo *backlog* deve ser criado para reavaliar o processo, e as etapas de ajuste do mesmo, *Tryout* e gestão da qualidade devem ser realizadas, se necessárias, até se obter o processo produtivo adequado.

4.2.3. Fase de Pós-desenvolvimento

Neste ponto do roteiro, a MA já foi adaptada à empresa e as últimas etapas serão realizadas. Na Retrospectiva e Validação as informações de todo o projeto são reunidas e documentadas, permitindo uma visualização de todas as etapas realizadas e todo o aprendizado adquirido. Este conteúdo poderá servir de referência para futuros trabalhos. Após a documentação o projeto é validado pela equipe e a produção poderá ser iniciada. Assim finaliza-se a implementação da MA e a equipe é desfeita, ficando como responsabilidade da equipe de produção a supervisão do processo.

4.2.3.1. Supervisão do Processo

Quando se inicia a produção não significa que o produto e processo ideais foram desenvolvidos. Este tópico representa a necessidade de acompanhar a produção continuamente, para manter a qualidade do produto desenvolvido com MA, para ajustar o processo se necessário e para desenvolver melhorias que podem ser identificadas ao longo da produção. Ações que devem ser desenvolvidas durante todo o ciclo de vida do produto.

Levando em consideração o modelo proposto por (SAUNDERS, 2018), para cada nível de adoção da MA este roteiro pode ser adaptado, ou seja, no primeiro nível o roteiro se desenvolveria apenas até o Desenvolvimento do Produto, o segundo, terceiro e quarto níveis até o final do roteiro, porém com graus de dificuldades variados. O aprendizado deve estar presente em todas as etapas, pois cada aplicação tem seus aspectos únicos e os participantes devem estar dispostos a adquirir novos conhecimentos para adaptar o roteiro as condições de sua empresa.

4.3. Parte III: Entrevista com Especialistas

Um total de 14 participantes responderam ao questionário apresentado no Apêndice B. Este foi dividido em duas partes, na primeira foram avaliadas as barreiras identificadas na literatura, na segunda a viabilidade do roteiro elaborado na pesquisa.

A figura 19 apresenta o ambiente de atuação dos entrevistados divididos em 3 grupos.

Figura 19: Ambiente de atuação dos entrevistados

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1. Avaliação das Barreiras

A lista total de barreiras encontradas na literatura foi submetida à apreciação dos especialistas que identificam as mais críticas, no momento de realização desta pesquisa. Foram classificadas como mais críticas aquelas com mais de 50% dos votos, ou seja, aquelas que obtiveram sete ou mais votos. As classes e cada uma das barreiras identificadas na literatura foram apresentadas aos especialistas, após a avaliação destas os entrevistados poderiam, se quisessem, adicionar alguma barreira que não foi identificada na literatura. A seguir o resultado das questões é apresentado.

4.3.1.1. Questão 1: Das classes de barreiras apresentadas (Figura 15), quais acredita serem as mais críticas na adoção da MA para metais?

A figura 20 apresenta as respostas para a questão 1. Como pode ser observado as classes destacadas como mais críticas foram: Educacionais, Tecnológicas e Financeiras. No estudo de Thomas-Seale et al. (2018), uma das barreiras mais destacadas na amostra utilizada pelos autores que se pode relacionar com a classificação aqui usada foram: educação (Educacionais), custo (Financeiras) e *software* (Tecnológicas), embora apresentadas como barreiras de forma ampla e não como classe, pode-se evidenciar que mesmo após três anos ainda são destaques essas as barreiras. As próximas questões destacam as barreiras mais críticas para cada uma das classes apresentadas.

Figura 20: Avaliação das Classes de Barreiras (Questão 1)

4.3.1.2. Questão 2: Das barreiras organizacionais quais acredita serem as mais críticas?

A Figura 21 mostra as respostas da questão 2. Dentre as barreiras organizacionais apresentadas a barreira “Imprevisibilidade dos riscos em adotar a tecnologia” foi destacada como a mais crítica, seguida pelas barreiras “Dificuldade em ver os benefícios que a MA pode trazer para a empresa” e “Desafio da modificação dos processos tradicionais para os aditivos”. Pode-se afirmar, com base nesse resultado, que as empresas se sentem inseguras para adotar MA por ser algo novo e em desenvolvimento. Isso dificulta a visualização dos possíveis benefícios e as modificações necessárias para migrar.

Figura 21: Barreiras Organizacionais (Questão 2)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1.3. Questão 3: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras organizacionais?

Esta questão foi colocada com o intuito de identificar possíveis barreiras, não identificadas na literatura, relacionada à classe em questão. Das barreiras organizacionais as seguintes, não identificadas na revisão, foram apontadas pelos especialistas:

- “Desafio na formação de bancos de dados de propriedades mecânicas e integridade estrutural das peças” (Especialista 8);
- “É necessário um esforço e comprometimento conjunto envolvendo todos os níveis da empresa” (Especialista 3);
- “Desafio na modificação da estrutura de equipes (mono para multidisciplinares) para desenvolvimento de projetos” (Especialista 4); e
- “Aversão à riscos” (Especialista 13).

As barreiras adicionadas pelos especialistas, mostram não apenas a necessidade de integração de uma equipe comprometida e multidisciplinar, mas também da superação da aversão à riscos que impedem muitas empresas tradicionais em se ariscar com novas tecnologias, não apenas a MA. Assim, também foi destacada a falta de informações em bancos de dados que possam dar suporte a equipe.

4.3.1.4. Questão 4: Das barreiras educacionais quais acredita serem as mais críticas?

A figura 22 trás os resultados da questão 4. Nota-se que a “escassez de especialistas” com conhecimento necessário para a implementação e utilização da MA é apontado como uma das barreiras mais críticas, assim como a “Dificuldades para idealizar um produto fabricado por MA”. Existe uma dificuldade por partes dos usuários em visualizar a fabricação do produto em MA, uma vez que os processos tradicionais apresentam diversas restrições com as quais estavam acostumados a trabalhar. Assim visualizar as possibilidades de fabricação sem essas restrições tem impedido a obtenção de maiores benefícios na utilização da MA. A barreira “Falta de conhecimento da tecnologia de MA e seu potencial” também recebe maior destaque, evidenciando a necessidade de cursos, workshops que disseminem os conhecimentos desta tecnologia.

Figura 22: Barreiras Educacionais (Questão 4)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1.5. Questão 5: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras educacionais?

As seguintes barreiras foram adicionadas pelos especialistas consultados:

- “Conhecimento sobre as implicações em pré e pós-processamento para atingir a qualidade final desejada” (Especialista 3); e
- “Falta de compreensão da interdependência entre geometria, material e processo, em processos de manufatura aditiva” (Especialista 4).
- “Dificuldade em conhecer as liberdades, bem como as restrições, oferecidas pelos processos de MA” (Especialista 12).
- “Projetistas ainda não conseguem pensar de forma aditiva. Falta de conhecimento dos conceitos de *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), que evidencia problema da escassez de especialistas.” (Especialista 12).

Além dos conhecimentos do processo de MA, deve-se saber que para atingir as qualidades requeridas pela aplicação, muitos casos necessitam de pré e pós processamento. A não compreensão de como os parâmetros do processo se relacionam, e como um afeta o outro, pode gerar muita dificuldade e prejudicar a aplicação.

4.3.1.6. Questão 6: Das barreiras tecnológicas relacionadas ao design quais acredita serem as mais críticas?

A Figura 23 apresenta os resultados. A seguinte barreira foi destacada pelos especialistas, “Falta de *software* integrado especializado em MA que abranja design e simulação”. O papel do *software* no processo de fabricação da MA é de extrema importância, e não conseguir integrar o design e simulação em um único software dificulta estas análises, sendo necessários dois ou mais *software* para se obter a peça desejada dentro das exigências da aplicação.

Figura 23: Barreiras Tecnológicas Relacionadas ao Design (Questão 6)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1.7. Questão 7: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras tecnológicas relacionadas ao design?

As seguintes barreiras foram ressaltadas pelos especialistas:

- “Roteiro para o projeto de componentes ainda em construção, demandando tempos relativamente grandes em tentativas e erros” (Especialista 1);
- “Falta de módulos (*tools*) de *software* de CAD específicos para MA” (Especialista 8);
- “Dificuldade em desenvolvimento de *design* funcional ou design que aproveite os potenciais de aplicação da MA (redução do número de componentes, por exemplo)” (Especialista 2);
- “Mais aprofundamento nos benefícios do *Design for* MA” (Especialista 3);
- “Falta de conhecimento em *software* que integre modelagem geométrica, modelagem e simulação do processo de fabricação, predição das propriedades resultantes em cada região do componente e posterior simulação estrutural ou multifísica com propriedades não homogêneas” (Especialista 4);
- “Para DED há uma grande escassez de ferramentas computacionais integradas para o fatiamento das geometrias e o planejamento de fabricação” (Especialista 12).

4.3.1.8. Questão 8: Das barreiras tecnológicas relacionadas ao processo quais acredita serem as mais críticas?

A figura 24 apresenta os resultados da Questão 8. A barreira mais destacada foi “A maioria dos processos de MA requer pós-processamento”. É possível notar pela literatura e informações apresentadas anteriormente que o fato de necessitar de pós-processamento pode ser um grande problema para algumas aplicações, por fatores de custo, tempo de produção, entre outros. Outras barreiras destacadas foram: “Parâmetros de processo específico para cada material”; “dificuldade em garantir a repetibilidade dos resultados”; e “elevado tempo de processamento”.

Figura 24: Barreiras Tecnológicas Relacionadas ao Processo (Questão 8)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1.9. Questão 9: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras tecnológicas relacionadas ao processo?

Os especialistas apontaram as seguintes barreiras não identificadas na literatura:

- “É necessário conhecer os fundamentos do processo para que se tome decisões adequadas para refinamento de parâmetros” (Especialista 3);
- “Falta de dados sobre as relações composição química, condições de processo, microestrutura, propriedade (esse trabalho está em andamento, e existem dados para um número restrito de ligas quando comparado aos processos tradicionais)” (Especialista 2);
- “Para DED, em geral, muitos fabricantes de máquina não fornecem o material com o parâmetro otimizado. Essa é uma dificuldade para empresas que não tem o *know how* no desenvolvimento e otimização de parâmetros, sendo necessário terceirizar esta etapa com ICTs. Há ainda a dificuldade de se gerar um parâmetro multi equipamento, visto que qualquer alteração de *hardware*, muito comum, altera também o comportamento de processo e, por sua vez, o parâmetro ótimo de processamento” (Especialista 12).

4.3.1.10. Questão 10: Das barreiras financeiras quais custos são mais críticos?

A Figura 25 retrata os resultados e como pode-se observar atualmente os custo de equipamentos e de matéria prima são os mais críticos. Para as aplicações em metais espera-se que estes custos diminuam com o desenvolver da tecnologia, porém isto impede que muitas empresas adotem a MA para metais, no momento atual.

Figura 25: Barreiras Financeira (Questão 10)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1.11. Questão 11: Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras financeiras?

Os entrevistados apontaram os seguintes custos que podem ser significativos:

- “Custo dos processos agregados para pré e pós-processamento” (Especialista 3);
- “Custo de software com ferramentas específicas para MA que integrem diversas análises” (Especialista 11); e
- “Taxa de Câmbio” (Especialista 12).

4.3.1.12. Questão 12: Das barreiras de qualidade quais acredita serem as mais críticas?

A Figura 26 compila as respostas para a questão 12. Uma das barreiras destacada como mais crítica foi “Materiais anisotrópicos podem resultar devido à fabricação em camadas, resultando em um desempenho inadequado”, ou como o especialista 11 complementou “A fabricação camada a camada e os diferentes históricos térmicos durante o processamento do material podem gerar comportamentos mecânicos anisotrópicos e dificultar a previsibilidade do comportamento do componente final, aumentando o risco de falhas na aplicação das tecnologias de MA”.

As outras barreiras de qualidade destacadas foram: “Apenas um número limitado de ligas metálicas foi criteriosamente caracterizado”; “a inspeção das peças tem sido um desafio”; e “Necessidade de controle para garantir a repetibilidade do processo”. Observa-se que para obter as exigências de qualidade novas ligas devem ser caracterizadas, sistemas de inspeção e monitoramento próprios para MA devem ser desenvolvidos, assim como análises para monitorar o possível surgimento de comportamentos mecânicos anisotrópicos nas peças fabricadas.

4.3.1.13. Questão 13: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras de qualidade?

Os entrevistados destacaram as seguintes barreiras não identificadas na literatura:

- “Falta correlação entre características (dimensões, formas, distribuição, etc) de defeitos e propriedades mecânicas” (Especialista 8);
- “Falta estabelecer a relação entre as características do pós (distribuição de tamanho e de morfologia de partícula e comportamento reológico dos pós), características termofísicas da ligas e condições de processo” (Especialista 2).

Figura 26: Barreiras de Qualidade (Questão 12)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1.14. Questão 14: Das barreiras de projeto quais acredita serem as mais críticas?

A Figura 27 apresenta os resultados e pode-se observar que as barreiras destacadas foram: “Dificuldade de prever as propriedades das peças impressas”; “Determinação do design adequado para o material de acordo com o processo utilizado”; e “Disponibilidade dos dados limitada para processos de MA”.

Figura 27: Barreiras de Projeto (Questão 14)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1.15. Questão 15: Adicionaria alguma barreira à classe de barreiras de projeto?

Os entrevistados destacaram as seguintes barreiras:

- “Estrutura de suporte só é visto no SolidWorks™ de CAM” (Especialista 8);
- Segundo o especialista 3, bons projetistas são criados com base na experiência, sendo assim “É necessário ter vivência na área para refinar as decisões de projeto”;

- “Baixa disponibilidade de profissionais com competência para atuar com DfAM. Ferramentas de software não permitem identificar as limitações de projeto para uma dada tecnologia, equipamento e material” (Especialista 12).

4.3.1.16. Questão 16 : Das barreiras normativas quais acredita serem as mais críticas?

A figura 28 traz os resultados, sendo as seguintes barreiras destacadas: “Quantidade limitada de normas relacionadas a MA”; “Falta de normas e modelos, padrões de uso da tecnologia, desde o design até o pós- processamento”; “Faltam procedimentos consolidados”; e “Falta de técnicas avançadas de ensaios não destrutivos capazes de detectar defeitos críticos internos em materiais com alto grau de certeza”.

Figura 28: Barreiras Normativas (Questão 16)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1.17. Questão 17: Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras normativas?

Respondendo à questão 17 os entrevistados destacaram as seguintes barreiras:

- “Faltam opções de técnicas de ensaios não destrutível capaz de identificar defeitos críticos para MA. Faltam normas mais precisas. Faltam mais integração entre as organizações normativas” (Especialista 8);
- “Escassez de técnicas avançadas” (Especialista 3);
- “Pequena quantidade de órgãos certificadores” (Especialista 12).

4.3.1.18. Questão 18: Das barreiras Ambientais quais acredita serem as mais críticas?

Avaliando a última classe de barreiras as respostas estão compiladas na Figura 29, Todas as barreiras apresentadas foram avaliadas como críticas, ou seja, mais de 50% dos especialistas avaliou destacou estas barreiras.

Figura 29: Barreiras Ambientais (Questão 18)

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.1.19. Questão 19: Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras ambientais?

Por fim respondendo à questão 19 tem-se:

- O especialista 3 destacou a “necessidade de tratamento adequado dos fumos gerados nos processos”, e
- O especialista 12 a “Falta de conhecimento sobre a degradação do material e a possibilidade de reuso, e suas consequências”.

A Quadro 5 resume as 27 barreiras avaliadas como mais críticas, e no Quadro 6 as 32 barreiras adicionadas pelos especialistas, não identificadas na literatura.

Quadro 5: Barreiras mais críticas de acordo com a avaliação de especialistas

Nº	Barreira	Classe
1	Imprevisibilidade dos riscos em adotar a tecnologia	Organizacionais
2	Desafio da modificação dos processos tradicionais para os aditivos	
3	Dificuldade em ver os benefícios que a MA pode trazer para a empresa	
4	Falta de conhecimento da tecnologia de MA e seu potencial	Eduacionais
5	Escassez de especialistas	
6	Dificuldades para idealizar um produto fabricado por MA	
7	Falta de software integrado especializado em MA que abranja design e simulação	Tecnológicas
8	Parâmetros de processo específicos para cada material	
9	Dificuldade em garantir a repetibilidade dos resultados	
10	Elevado tempo de processamento	
11	A maioria dos processos de MA requer pós-processamento	
12	Custo Maquinário	Financeiras
13	Custo Matéria prima	
14	Materiais anisotrópicos podem resultar devido à fabricação em camadas, resultando em um desempenho inadequado	De Qualidade
15	Apenas um número limitado de ligas metálicas foi criteriosamente caracterizado	
16	Necessidade de controle para garantir a repetibilidade do processo	
17	A inspeção das peças tem sido um desafio	
18	Dificuldade de prever as propriedades das peças impressas	De Projeto
19	Determinação do design adequado para o material de acordo com o processo utilizado	
20	Disponibilidade dos dados limitada para processos de MA	
21	Quantidade limitada de normas relacionadas a MA	Normativas
22	Falta de normas e modelos, padrões de uso da tecnologia, desde o design até o pós- processamento	
23	Faltam procedimentos consolidados	
24	Falta de técnicas avançadas de ensaios não destrutivos capazes de detectar defeitos críticos internos em materiais com alto grau de certeza	
25	Falta de estudos que avaliem o impacto ambiental do material selecionado	Ambientais
26	Perda de material significativa em alguns processos	
27	Impossibilidade de reciclar o material em alguns processos.	

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Quadro 6: Barreiras destacadas pelos especialistas, não identificadas na literatura

Nº	Barreira	Classe
1	Desafio na formação de bancos de dados de propriedades mecânicas e integridade estrutural das peças	Organizacionais
2	É necessário um esforço e comprometimento conjunto envolvendo todos os níveis da empresa	
3	Desafio na modificação da estrutura de equipes (mono para multidisciplinares) para desenvolvimento de projetos	
4	Conhecimento sobre as implicações em pré e pós-processamento para atingir a qualidade final desejada	Eduacionais
5	Falta de compreensão da interdependência entre geometria, material e processo, em processos de manufatura aditiva	
6	Dificuldade em conhecer as liberdades, bem como as restrições, oferecidas pelos processos de MA.	
7	Projetistas não conseguem pensar de forma aditiva	
8	Falta de conhecimento dos conceitos de Design for Additive Manufacturing (DfAM)	Tecnológicas
9	Roteiro para o projeto de componentes está em construção, demandando ainda tempos relativamente grandes em tentativas e erros	
10	Falta de módulos (tools) de softwares de CAD específicos para MA	
11	Dificuldade em desenvolvimento de design funcional ou design que aproveite os potenciais de aplicação da MA (redução do número de componentes, por exemplo)	
12	Mais aprofundamento nos benefícios do Design for MA	
13	Falta de conhecimento em software que integre modelagem geométrica, modelagem e simulação do processo de fabricação, predição das propriedades resultantes em cada região do componente e posterior simulação estrutural ou multifísica com propriedades não homogêneas	
14	Para DED há uma grande escassez de ferramentas computacionais integradas para o fatiamento das geometrias e o planejamento de fabricação	
15	É necessário conhecer os fundamentos do processo para que se tome decisões adequadas para refinamento de parâmetros	
16	Falta de dados sobre as relações composição química, condições de processo, microestrutura, propriedade (esse trabalho está em andamento e existem dados para um número restrito de ligas quando comparado aos processos tradicionais)	
17	Para DED, em geral, muitos fabricantes de máquina não fornecem o material com o parâmetro otimizado	
18	Dificuldade de se gerar um parâmetro multi equipamento	Financeiras
19	Custo dos processos agregados para pré e pós-processamento	
20	Custo de softwares com ferramentas específicas para MA que integrem diversas análises	
21	Taxa de Câmbio	De Qualidade
22	Falta correlação entre características (dimensões, formas,	

	distribuição, etc) de defeitos e propriedades mecânicas	
23	Falta estabelecer a relação entre as características do pós (distribuição de tamanho e de morfologia de partícula e comportamento reológico dos pós), características termofísicas da ligas e condições de processo	
24	Estrutura de suporte só é visto no SolidWorks™ de CAM	De Projeto
25	É necessário ter vivência na área para refinar as decisões de projeto	
26	Baixa disponibilidade de profissionais com competência para atuar com DfAM	
27	Ferramentas de software não permitem identificar as limitações de projeto para uma dada tecnologia, equipamento e material	
28	Faltam opções de técnicas de ensaios não destrutível capaz de identificar defeitos críticos para MA. Faltam normas mais precisas. Faltam mais integração entre as organizações normativas	Normativas
29	Escassez de técnicas avançadas	
30	Pequena quantidade de órgãos certificadores	
31	Necessidade de tratamento adequado dos fumos gerados nos processos	Ambientais
32	Falta de conhecimento sobre a degradação do material e a possibilidade de reuso, e suas consequências	

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A barreira organizacional “Riscos de perda de mercado devido a imitações do produto da empresa” e a barreira tecnológica relacionada ao processo “Muitas máquinas não possuem confiabilidade de hardware” não foram selecionadas como críticas por nenhum especialista, ou seja, não se mostraram importantes no contexto atual. Porém em um estudo avaliando as possíveis tendências da MA para 2030, Jiang; Kleer; Piller (2017) destacaram que haverá uma dificuldade em defender a propriedade intelectual convencional dos produtos digitais, sendo necessárias novas formas de propriedade intelectual para que a MA seja adotada nas empresa, fato que pode tornar a barreira “Riscos de perda de mercado devido a imitações do produto da empresa” crítica.

Não são desconsideradas as outras barreiras que obtiveram menos que 50% dos votos, mas estas foram destacadas por alguns entrevistados, e de certa forma para algumas aplicações podem ser tão críticas quanto às outras. Deve-se considerar também que com a evolução da tecnologia as barreiras podem ser superadas e novas podem surgir. O intuito dos Quadros 5 e 6, foi destacar de forma geral quais são as mais críticas atualmente de acordo com os especialistas entrevistados, e quais outras barreiras não foram identificadas na literatura.

A uma empresa que busca compreender melhor as barreiras da adoção da MA, sugere-se utilizar as tabelas de barreiras 3, 5 e 6 na seguinte ordem. Primeiramente a tabela 3 para visualizar de forma geral as barreiras que estão sendo destacadas na literatura, em seguida a tabela 5 com as barreiras mais críticas de acordo com os especialistas da área, e por último a tabela 6 para a compreensão de algumas barreiras que não foram identificadas na literatura analisada, porém de acordo com os especialistas são barreiras que devem ser consideradas.

4.3.2. Parte 2: Avaliação da viabilidade do roteiro

Aos entrevistados foram feitas uma serie de perguntas para avaliar a viabilidade do roteiro desenvolvido nesta pesquisa.

4.3.2.1. Questão 20: Acha que o roteiro apresentado poderia auxiliar a adoção da MA dentro das empresas?

A Figura 30 apresenta os resultados e pode-se observar que do ponto de vista dos entrevistados o roteiro pode auxiliar a adoção da MA nas empresas, sendo que apenas 1 selecionou como talvez.

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.2.2. Questão 21: Das etapas apresentadas teria algumas que gostaria de destacar, como sendo de maior importância?

Esta pergunta foi feita para evidenciar as etapas que devem ser mais relevantes na implementação da MA. A fase de Pré-desenvolvimento foi a que ganhou maior destaque.

Segundo o especialista 13 “esta fase, se bem conduzida e após conclusão pela viabilidade da MA, levam à aceitação corporativa das dificuldades e riscos que se seguirão”. O especialista 3 ainda enfatiza que “a fase inicial é crucial para garantir o sucesso das seguintes”. Dentro da fase de pré-desenvolvimento, as etapas Identificação de Oportunidades e Estudo de Viabilidade também foram destacados. O especialista 2 comenta que a identificação de oportunidades é fundamental e demanda conhecimento em diversos aspectos relacionado a MA (Processo, materiais, testes, aplicação do componente, design, entre outros), evidenciando a importância da etapa Estudo da Tecnologia. O especialista 12 destacou a fase de Desenvolvimento como mais importante, porém segundo ele, “no cenário Brasileiro a fase de Pré-desenvolvimento, sobretudo no que diz respeito à identificação de oportunidades, tem se mostrado essencial”. Outros passos destacados foram: Toda a parte de desenvolvimento do produto, destacada pelo especialista 4 como “etapa mais crítica, visto que já precisa incluir análise do processo de fabricação e depende de uma equipe multidisciplinar engajada (cultura) no método estabelecido”; a etapa Ajuste do Processo foi destacada pelo especialista 1, e por fim a etapa *Tryout* pelo especialista 6, pois segundo este é a etapa que há falta de literatura e *know how*.

4.3.2.3. Questão 22: Teria alguma etapa que acha desnecessária?

A questão feita aos especialistas para avaliar se alguma etapa poderia ser removida. Nesta questão não houve necessariamente uma etapa apresentada no roteiro como desnecessária, porém o especialista 10 colocou como desnecessária a Gestão de Dados. Sendo que o especialista 13 enfatizou que as etapas podem ser diferentes dependendo da empresa e seus processos, sendo em geral como apresentado, que é o objetivo deste roteiro, ser genérico em primeiro instante de forma que possa ser adaptado as diversos tipos de empresas.

4.3.2.4. Questão 23: O uso das ferramentas da gestão ágil apresentadas (backlog, daily meeting, iterações) seriam interessantes para a adoção da MA?

Como foram apresentadas as ferramentas da gestão ágil para desenvolver o roteiro, viu-se a necessidade dessa questão e o resultado está ilustrado na Figura 31. A maioria dos entrevistados achou relevante o uso de ferramentas da gestão ágil para desenvolver o roteiro, sendo que apenas 4 colocaram com talvez possam ser interessantes na adoção da MA. Deve-

se ressaltar que alguns dos entrevistados conheciam as ferramentas e outros não, durante a entrevista estas foram apresentadas e explicadas, mas sem uma demonstração na prática, o julgamento daqueles que não as conhece pode ter sido prejudicado.

Figura 31: Análise da Questão 22

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3.2.5. Questão 24: Teria alguma outra ferramenta de gestão que adicionaria ao modelo?

A questão foi elaborada para avaliar as possíveis ferramentas a serem adaptadas no roteiro. Foram destacadas as ferramentas, *Lean Engineering* (Especialista 8); Toyota Kata (Especialista 3); e Gestão de desenvolvimento tecnológico, associado aos riscos de projeto (Especialista 13). Sendo que do ponto de vista do especialista 11 deve-se colocar o modelo atual para funcionar e dependendo da demanda da empresa adaptá-lo. O desafio não é fazer engenharia reversa de ferramentas ou métodos, mas compreender o que é necessário para a implementação. Várias das ferramentas apresentadas no roteiro e estas sugeridas pelos especialistas podem auxiliar, porém cabe a cada equipe avaliar o que a empresa necessita e quais as ferramentas se enquadram em seu meio.

4.3.2.6. Questão 25: Sugere alguma modificação interessante a fazer no modelo?

Foram solicitadas sugestões de modificações para o roteiro e o especialista 8 sugeriu mais detalhamento e descrição das etapas. Esse nível de detalhamento será possível assim que o roteiro for testado e aplicado em empresas, resultado que se espera da continuidade deste projeto com o Doutorado. Segundo o entrevistado 3 “seria importante destacar a possibilidade de uso do *tryout* externo num projeto piloto. Mais do que isso, buscar auxílio nas ICTs (Instituições de Ciência e Tecnologia) capacitadas na área”. O entrevistado 12 sugeriu uma

etapa de “adequação da infraestrutura” no Pré-desenvolvimento, pois segundo este “Uma vez que seja identificada uma oportunidade de utilização da técnica, deve haver um ponto específico para adaptação do parque fabril para adoção da MA, tanto no que diz respeito ao maquinário, segurança, insumos, manipulação de pó metálico, etc.”

4.3.2.7. Questão 26: Acha que esta pesquisa beneficiaria a aplicação da MA em todos os setores industriais ou em algum setor mais específico?

Com esta questão buscou identificar os possíveis setores de aplicação do roteiro do ponto de vista dos entrevistados, obtendo as seguintes respostas:

- “Em um primeiro momento, essa pesquisa beneficiaria os setores que já entendem como obter vantagens com MA (aeronáutico, óleo e gás, área médica). Em um momento em que a tecnologia tiver maturidade, terá contribuição em vários setores” (Especialista 2).
- “Da maneira como se apresenta, o projeto beneficiaria setores industriais de produção em alta escala. Acredito que o modelo deixaria de lado nichos de pequenos lotes ou lotes unitários” (Especialista 6)
- “Acredito que a manufatura aditiva de metais no Brasil terá maior aplicação no setor de peças de reposição (manutenção)” (Especialista 9).
- “Apenas aos que tem a cultura de adotar tecnologias em vanguarda” (Especialista 13).
- Acredito que em todos os setores, mas principalmente aqueles mais conservadores como: geração de energia (Especialista 10).
- “Especialmente naqueles em que a MA ainda não conseguiu uma boa aderência, no Brasil. Setor de O&G, automotivo, spare-parts” (Especialista 12).
- “O modelo é genérico e se adequa a todos os setores” (Especialista 3). Outros especialistas que também responderam todos foram os especialistas 1, 4, 5, 7, 8, 11, e 14.

O entrevistado 12 ressaltou ao final a importância de parcerias com Universidades e Institutos de Pesquisa, como algo que deve ser estimulado e enraizado na cultura das empresas brasileiras, parceria que pode “encurtar, e muito, algumas das etapas propostas e dar mais segurança à adoção e a manutenção da qualidade dos componentes fabricados pelas

técnicas aditivas”. Esta observação foi feita por vários especialistas, mostrando o quanto do ponto de vista deles, a importância da parceria com instituições de pesquisa e universidades, que apresentam maior conhecimento da tecnologia e podem auxiliar as empresas.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho buscou, identificar as barreiras de implementação da MA, em empresas e, propor um roteiro para adoção da MA nas empresas, o qual pode guiar as empresas nessa implantação. Duas questões foram elaboradas:

Q1: O que impede que a MA atinja seu potencial?

Q2: Como orientar as equipes, que implementarão MA em empresas, na superação das barreiras para adoção da tecnologia?

O conteúdo do trabalho foi então avaliado por especialistas usando-se entrevistas individuais e questionário específico. Uma revisão bibliográfica sistemática foi realizada com intuito de identificar as barreiras da adoção da MA. Com a análise dos trabalhos selecionados, foi possível identificar e classificar barreiras da adoção da MA para metais com foco nos processos PBF e DED. Utilizando a metodologia *Design Research* o roteiro criado buscou abranger todas as etapas para a adoção da MA, com base no modelo de Desenvolvimento de Produtos proposto por Rozenfeld et al. (2006) e no padrão de iteração apresentado por Leffingwell (2010), assim como buscam superar as barreiras identificadas, a fim de deixar claro todas as etapas do processo. O modelo será mais simples, ou mais complexo dependendo do porte da empresa e da aplicação.

Com o preenchimento do questionário por especialistas foi possível destacar das barreiras identificadas na literatura as 27 mais críticas, e identificar 32 que não estavam no conteúdo analisado. Também com o preenchimento do questionário foi possível validar o roteiro e avaliar as ferramentas de gestão ágil utilizadas na construção deste. As etapas mais importantes do roteiro foram destacadas e os possíveis setores que se beneficiariam do roteiro foram identificados, ressaltando que muitos dos entrevistados acham que todos podem se beneficiar.

Espera-se que este trabalho estimule diversas áreas de pesquisas na busca de soluções para as barreiras de implementação da MA identificadas na literatura e sugeridas pelos especialistas, assim como permitir que empresas visualizem os possíveis obstáculos que serão encontrados na adoção da MA. Espera-se também que o roteiro auxilie a adoção da MA dentro das empresas, para que estas se desenvolvam e se adequem as uma das mais promissoras tecnologias da indústria 4.0.

Devido ao tempo limitado para o desenvolvimento desta pesquisa, não foi possível aplicar o roteiro dentro de empresas, porém em um projeto futuro este poderá ser testado e

validado, buscando aprimorá-lo para se aproximar com a realidade das aplicações. Sugere-se também que sejam estimados tempo e custo da adoção da MA, assim como a documentação das barreiras encontradas e como foram superadas, considerando que possam surgir obstáculos que não foram previstos nesta pesquisa, permitindo um maior detalhamento do roteiro desenvolvido.

Um estudo similar ao desenvolvido por Strong et al. (2018) poderia ser realizado no Brasil para estimular a criação de empresas de MA e tornar mais viável o acesso à tecnologia e terceirização da produção, que para alguns casos é mais viável que implementar a MA.

Como Henry Ford uma vez disse “O progresso acontece quando todos os fatores que contribuem para isso estão prontos, e então é inevitável”, ou seja, a MA ainda precisa desenvolver alguns fatores para atingir seu potencial e revolucionar a indústria, e é para essa direção que as pesquisas caminham.

REFERÊNCIAS

- ADEKANYE, S. A. et al. Additive manufacturing: the future of manufacturing. **Materiali in tehnologije**, v. 51, n. 5, p. 709–715, 16 out. 2017.
- AMARAL, D. C. et al. **Gerenciamento ágil de projetos: aplicação em produtos inovadores**. São Paulo: Saraiva, 2011.
- AMINI, M.; CHANG, S. I. MLCPM: A process monitoring framework for 3D metal printing in industrial scale. **Computers & Industrial Engineering**, v. 124, p. 322–330, 1 out. 2018.
- AMINI, M.; CHANG, S. I.; RAO, P. A cybermanufacturing and AI framework for laser powder bed fusion (LPBF) additive manufacturing process. **Manufacturing Letters**, v. 21, p. 41–44, 1 ago. 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792-10**: standard terminology for additive manufacturing technologies, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792 - 12a**: Standard Terminology for Additive Manufacturing TechnologiesASTM International, 2012.
- ATZENI, E.; SALMI, A. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 62, n. 9–12, p. 1147–1155, 8 out. 2012.
- BAUMERS, M. et al. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 102, p. 193–201, 1 jan. 2016.
- BAUMERS, M. et al. Informing additive manufacturing technology adoption: total cost and the impact of capacity utilisation. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 23, p. 6957–6970, 2 dez. 2017.
- BLAND, S.; CONNER, B. Mapping out the additive manufacturing landscape. **Metal Powder Report**, v. 70, n. 3, p. 115–119, 1 maio 2015.
- BLESSING, L. T. M.; CHAKRABARTI, A. **DRM, a Design Research Methodology**. London: Springer London, 2009.
- BÖCKIN, D.; TILLMAN, A.-M. Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 977–987, 20 jul. 2019.
- BOURELL, D. et al. Materials for additive manufacturing. **CIRP Annals**, v. 66, n. 2, p. 659–681, 2017.
- BOURELL, D. L.; LEU, M. C.; ROSEN, D. W. Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing. **The University of Texas at Austin**, p. 1–102, 2009.

CALIGNANO; GALATI; IULIANO. A Metal Powder Bed Fusion Process in Industry: Qualification Considerations. **Machines**, v. 7, n. 4, p. 72, 13 nov. 2019.

CAMERON, K.; QUINN, R. Diagnosing and Changing Organizational Culture: Based on the Competing Values Framework. **Personnel Psychology**, v. 59, n. 3, p. 755–757, set. 2006.

CAMPBELL, R. I. et al. Design evolution through customer interaction with functional prototypes. **Journal of Engineering Design**, v. 18, n. 6, p. 617–635, dez. 2007.

CHATMAN, J. A.; O'REILLY, C. A. Paradigm lost: Reinvigorating the study of organizational culture. **Research in Organizational Behavior**, v. 36, p. 199–224, 2016.

COLLINS, P. K.; LEEN, R.; GIBSON, I. Industry case study: rapid prototype of mountain bike frame section. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 11, n. 4, p. 295–303, 19 out. 2016.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. DA. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática : aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. 8º **Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto - CNGDP 2011**, n. 1998, p. 1–12, 2011.

COOPER, D. E. et al. Additive Manufacturing for product improvement at Red Bull Technology. **Materials & Design**, v. 41, p. 226–230, 1 out. 2012.

CRUZ, M. F.; BORILLE, A. V. Decision methods application to compare conventional manufacturing process with metal additive manufacturing process in the aerospace industry. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 39, n. 1, p. 177–193, 6 jan. 2017.

DIETRICH, D. M.; KENWORTHY, M.; CUDNEY, E. A. **Additive Manufacturing Change Management**. Boca Raton : Taylor & Francis, 2019. | Series: Continuous: CRC Press, 2019.

DUDA, T.; RAGHAVAN, L. V. 3D metal printing technology: the need to re-invent design practice. **AI & SOCIETY**, v. 33, n. 2, p. 241–252, 6 maio 2018.

DUTTA, B.; (SAM) FROES, F. H. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys. In: **Titanium Powder Metallurgy**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 447–468.

ERBOZ, G. How To Define Industry 4.0: Main Pillars Of Industry 4.0. **Managerial trends in the development of enterprises in globalization era**, p. 761–767, 2017.

FLYNN, J. M. et al. Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 101, p. 79–101, 1 fev. 2016.

GALANTUCCI, L. M. et al. Additive Manufacturing: New Trends in the 4th Industrial Revolution. In: **Lecture Notes in Mechanical Engineering**. [s.l.] Pleiades Publishing, 2019. p. 153–169.

GAO, C. et al. Additive manufacturing technique-designed metallic porous implants for clinical application in orthopedics. **RSC Advances**, v. 8, n. 44, p. 25210–25227, 16 jul. 2018.

GEBHARDT, A.; HÖTTER, J.-S. **Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing**. Munich: Hanser, 2016. v. 35

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition**. Springer New York, 2015.

GIRDWOOD, R. et al. Investigating Components Affecting the Resource Efficiency of Incorporating Metal Additive Manufacturing in Process Chains. **Procedia Manufacturing**, v. 8, p. 52–58, 1 jan. 2017.

GISARIO, A. et al. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 53, p. 124–149, 1 out. 2019.

GRAZIOSI, S. et al. Designing for Metal Additive Manufacturing: A Case Study in the Professional Sports Equipment Field. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 1544–1551, 2017.

GROYSBERG, B. et al. Manual da Cultura Corporativa para Líder. **Harvard business review**, v. 96, n. 1, p. 24–32, 2018.

HÄMÄLÄINEN, M.; OJALA, A. 3D printing: Challenging existing business models. In: **Phantom Ex Machina: Digital Disruption's Role in Business Model Transformation**. Springer International Publishing, 2016. p. 163–174.

HARRIS, I. D. Additive Manufacturing: A Transformational Advanced Manufacturing Technology. **ADVANCED MATERIALS & PROCESSES**, v. 170, n. 5, p. 25, 2012.

HU, Z.; MAHADEVAN, S. Uncertainty quantification and management in additive manufacturing: current status, needs, and opportunities. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, n. 5–8, p. 2855–2874, 8 nov. 2017.

JIANG, R.; KLEER, R.; PILLER, F. T. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 117, p. 84–97, 1 abr. 2017.

JIMÉNEZ, M. et al. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. **Complexity**, v. 2019, p. 1–30, 19 fev. 2019.

KAMPS, T. et al. Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 21, p. 47–60, 1 maio 2018.

KIETZMANN, J.; PITT, L.; BERTHON, P. Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing. **Business Horizons**, v. 58, n. 2, p. 209–215, 1 mar. 2015.

KIM, D. B. et al. Toward a Digital Thread and Data Package for Metals-Additive Manufacturing. **Smart and Sustainable Manufacturing Systems**, v. 1, n. 1, p. 20160003, 28 fev. 2017.

KOTTER, J. P. **Leading Change**. [s.l.] Harvard Business Review Press, 1996.

KRETZSCHMAR, N. et al. Evaluating the Readiness Level of Additively Manufactured Digital Spare Parts: An Industrial Perspective. **Applied Sciences**, v. 8, n. 10, p. 1837, 7 out. 2018.

KRETZSCHMAR, N.; ITUARTE, I. F.; PARTANEN, J. A decision support system for the validation of metal powder bed-based additive manufacturing applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 9–12, p. 3679–3690, 10 jun. 2018.

KRÓLIKOWSKI, M. A.; KRAWCZYK, M. B. Does Metal Additive Manufacturing in Industry 4.0 Reinforce the Role of Subtractive Machining? In: **Lecture Notes in Mechanical Engineering**. Pleiades Publishing, 2019. p. 150–164.

LEAL, R. et al. Additive manufacturing tooling for the automotive industry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 5–8, p. 1671–1676, 16 set. 2017.

LEFFINGWELL, D. **Agile software requirements: lean requirements practices for teams, programs, and the enterprise**. Boston: Addison-Wesley, 2010.

MALEKIPOUR, E.; EL-MOUNAYRI, H. Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 1–4, p. 527–550, 27 mar. 2018.

MCGUIRE, C.; RICE, J. Metal additive manufacturing – An interview with Sigma Labs CEO John Rice. **Metal Powder Report**, v. 74, n. 2, p. 95–97, 1 mar. 2019.

MILEWSKI, J. O. **Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry**. Cham: Springer International Publishing, 2017. v. 258

MOHER, D. et al. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **PLoS Medicine**, v. 6, n. 7, p. e1000097, 21 jul. 2009.

NEUGEBAUER, R. et al. Additive manufacturing boosts efficiency of heat transfer components. **Assembly Automation**, v. 31, n. 4, p. 344–347, 27 set. 2011.

NIAKI, M. K.; NONINO, F. Impact of additive manufacturing on business competitiveness: a multiple case study. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 28, n. 1, p. 56–74, 6 fev. 2017.

NICKELS, L. Improving the QA of 3D-printed parts. **Metal Powder Report**, v. 71, n. 4, p. 249–251, 1 jul. 2016.

O'BRIEN, M. J. Development and qualification of additively manufactured parts for space. **Optical Engineering**, v. 58, n. 01, p. 1, 22 jan. 2019.

ÖBERG, C.; SHAMS, T. On the verge of disruption: rethinking position and role – the case of additive manufacturing. **Journal of Business & Industrial Marketing**, v. 34, n. 5, p. 1093–1105, 3 jun. 2019.

PONCHE, R. et al. A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 30, n. 4, p. 389–398, 1 ago. 2014.

PORTOLÉS, L. et al. A qualification procedure to manufacture and repair aerospace parts with electron beam melting. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 41, p. 65–75, 1 out. 2016.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de projetos em desenvolvimento de produtos**. São Paulo: Saraiva, 2006.

RÜSSMANN, M. et al. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. **inovasyon.org**, 2015.

SACCO, E.; MOON, S. K. Additive manufacturing for space: status and promises. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 10, p. 4123–4146, 15 dez. 2019.

SALMI, A. et al. An integrated design methodology for components produced by laser powder bed fusion (L-PBF) process. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 13, n. 3, p. 191–202, 3 jul. 2018.

SAMPAIO, R.; MANCINI, M. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, p. 83–89, fev. 2007.

SAUNDERS, M. **Additive impact part #1 - how Additive Manufacturing could disrupt your market**. Disponível em: <<https://www.renishaw.com.br/pt/additive-impact-part-1-how-additive-manufacturing-could-disrupt-your-market--37549>>. Acesso em: 26 maio. 2020.

SAUNDERS, M. **Additive impact part #2 - how AM could disrupt your market**. Disponível em: <<https://www.renishaw.com.br/pt/additive-impact-part-2-how-am-could-disrupt-your-market--37551>>. Acesso em: 26 maio. 2020.

SCHMELZLE, J. et al. (Re)Designing for Part Consolidation: Understanding the Challenges of Metal Additive Manufacturing. **Journal of Mechanical Design**, v. 137, n. 11, 1 nov. 2015.

SCHMIDT, M. et al. Laser based additive manufacturing in industry and academia. **CIRP Annals**, v. 66, n. 2, p. 561–583, 1 jan. 2017.

SEDANO, T.; RALPH, P.; PERAIRE, C. **The Product Backlog**. 2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering (ICSE). **Anais...IEEE**, 2019

SEIFI, M. et al. Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification. **JOM**, v. 69, n. 3, p. 439–455, 16 mar. 2017.

SHAPIRO, A. A. et al. Additive Manufacturing for Aerospace Flight Applications. **Journal of Spacecraft and Rockets**, v. 53, n. 5, p. 952–959, 5 set. 2016.

SIEBOLD, M. Additive Manufacturing for Serial Production of High-Performance Metal Parts. **Mechanical Engineering**, v. 141, n. 05, p. 49–50, 1 maio 2019.

SIMONS, M. Additive manufacturing—a revolution in progress? Insights from a multiple case study. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 1–4, p. 735–749, 29 abr. 2018.

SRIRAM, V.; SHUKLA, V.; BISWAS, S. Metal Powder Based Additive Manufacturing Technologies—Business Forecast. In: **3D Printing and Additive Manufacturing Technologies**. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 105–118.

STRAY, V.; SJØBERG, D. I. K.; DYBÅ, T. The daily stand-up meeting: A grounded theory study. **Journal of Systems and Software**, v. 114, p. 101–124, abr. 2016.

STRONG, D. et al. Current state and potential of additive – hybrid manufacturing for metal parts. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 3, p. 577–588, 18 abr. 2017.

STRONG, D. et al. Hybrid manufacturing – integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain. **Additive Manufacturing**, v. 21, p. 159–173, 1 maio 2018.

THARP, B. M. **Four Organizational Culture Types: Organizational Culture White Paper**Haworth, **Organizational Culture**.

THOMAS-SEALE, L. E. J. et al. The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry. **International Journal of Production Economics**, v. 198, p. 104–118, 1 abr. 2018.

VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S. Industry 4.0 – A Glimpse. **Procedia Manufacturing**, v. 20, p. 233–238, 2018.

VARTANIAN, K.; MCDONALD, T. Accelerating Industrial Adoption of Metal Additive Manufacturing Technology. **JOM**, v. 68, n. 3, p. 806–810, 11 mar. 2016.

WANG, B. The Future of Manufacturing: A New Perspective. **Engineering**, v. 4, n. 5, p. 722–728, 1 out. 2018.

WEBER, A. Additive manufacturing takes off in aerospace Industry. **Assembly**, v. 59, n. 1, 2016.

YI, L.; GLÄSSNER, C.; AURICH, J. C. How to integrate additive manufacturing technologies into manufacturing systems successfully: A perspective from the commercial vehicle industry. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 53, p. 195–211, 1 out. 2019.

ZADPOOR, A. Frontiers of Additively Manufactured Metallic Materials. **Materials**, v. 11, n. 9, p. 1566, 30 ago. 2018.

ZHANG, X. et al. A Hybrid Process Integrating Reverse Engineering, Pre-Repair Processing, Additive Manufacturing, and Material Testing for Component Remanufacturing. **Materials**, v. 12, n. 12, p. 1961, 18 jun. 2019.

APÊNDICE A – Quadro de Artigos Aceitos na RBS

Quadro 7: Artigos aceitos na revisão sistemática

Título	Autor	Objetivo
(Re) Designing for Part Consolidation: Understanding the Challenges of Metal Additive Manufacturing	Schmelzle, J.; Kline, E.V.; Dickman, C.J.; Reutzel, E.W.; Jones, G.; Simpson, T.W.	Apresentar um estudo de caso para fornecer informações sobre os desafios encontrados em projetos de consolidação de um conjunto de parte em uma peça única utilizando processos de MA para metais.
3D metal printing technology: The need to re-invent design practice	Duda, T.; Raghavan, L.V.	Apresentar uma visão geral das tecnologias de impressão 3D, materiais, aplicações, vantagens, desvantagens, desafios, economia e aplicações da tecnologia em metal, assim como as perspectivas da MA para metal nos países em desenvolvimento.
3D printing: Challenging existing business models	Hämäläinen, M.; Ojala, A.	Determinar como a MA influencia e pode moldar o modelo de negócios existentes e seus componentes, incluindo produto, rede de valores, entrega de valor e modelo de receita.
A cybermanufacturing and AI framework for laser powder bed fusion (LPBF) additive manufacturing process	Amini, M.; Chang, S.I.; Rao, P.	Propor uma plataforma uma estrutura para melhorar o monitoramento de processos MA, considerando o processo <i>Laser Powder Bed Fusion</i> (LPBF), envolvendo vários princípios de <i>Maching Learning</i> , aproveitando os dados de produção armazenados na nuvem.
A decision support system for the validation of metal powder bed-based additive manufacturing applications	Kretschmar, N.; Ituarte, I.F.; Partanen, J.	Desenvolver um sistema de suporte à decisão orientado por computador para selecionar máquinas de manufatura aditiva ideal para aplicações em PBF.
A Hybrid Process Integrating Reverse Engineering, Pre-Repair Processing, Additive Manufacturing, and Material Testing for Component Remanufacturing	Zhang, X.; Cui, W.; Li, W.; Liou, F.	Desenvolver um processo híbrido para integrar engenharia reversa, processamento de pré-reparo, MA e teste de material para fins de remanufatura de peças.
A Metal Powder Bed Fusion Process in Industry: Qualification Considerations	Calignano, F.; Galati, M.; Iuliano, L.	Identificar os pontos críticos dos processos PBF através da análise das várias fases para criar um procedimento de qualificação.
A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing Process	Ponche, R.; Kerbrat, O.; Mognol, P.; Hascoet, J.-Y.	Propor uma nova metodologia de design para a MA, e as ferramentas numéricas associadas ao caso particular de peças de paredes finas fabricadas por um processo de MA a laser.
A qualification procedure to manufacture and repair aerospace parts with electron beam melting	Portoles, L.; Jorda, O.; Jorda, L.; Uriondo, A.; Esperon-Miguez, M. Perinpanayagam, S.	Desenvolver e aplicar em um caso real um procedimento de qualificação para o processo EBM, seguindo as práticas da indústria aeroespacial e levando em consideração as particularidades do processo de fabricação.
Accelerating Industrial Adoption of Metal Additive Manufacturing Technology	Vartanian, K.; McDonald, T.	Discutir um programa financiado pela <i>America Makes</i> para reduzir o custo do sistema de MA, combinando a tecnologia de MA para metal com máquinas-ferramentas convencionais CNC.
Additive Manufacturing for Aerospace Flight Applications	Shapiro, A. A.; Borgonia, J. P.; Chen, Q. N.; Dillon, R. P.; McEnerney, B.; Polit-Casillas, R.; Soloway, L.	Discutir algumas das questões e preocupações específicas que surgem ao aplicar a MA na indústria espacial, incluindo aspectos relacionados a materiais, manufatura e software, e elaborar sete aplicações nas quais a MA pode oferecer uma vantagem para o setor aeroespacial.
Additive manufacturing for space: status and promises	Sacco, E.; Moon, S.K.	Explorar a MA para o espaço reunindo informações de pesquisas.

Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry	Milewski, J.O.	Apresentar uma visão abrangente dos elementos e processos fundamentais usados para MA para metal.
Additive manufacturing takes off in aerospace Industry	Weber, A.	Apresentar o crescimento da MA dentro da indústria aeroespacial.
Additive manufacturing technique-designed metallic porous implants for clinical application in orthopedics	Gao, C.; Wang, C.; Jin, H.; Wang, Z.; Li, Z.; Shi, C.; Leng, Y.; Yang, F.; Liu, H.; Wang, J.	Apresentar as técnicas de MA para metais mais utilizadas, o design da estrutura microporosa de esqueletos metálicos e as novas aplicações de próteses customizadas no campo ortopédico, resumindo os desafios e perspectivas futuras sobre os esqueletos fabricados pela AM.
Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects	Jimenez, M.; Romero, L.; Dominguez, I. A.; Espinosa, M. del M.; Dominguez, M.	Apresentar o design estrutural das máquinas, sua história, classificação, as alternativas existentes hoje, os materiais utilizados e suas características, as limitações tecnológicas e as perspectivas para diferentes tecnologias, tanto no campo profissional da inovação e o campo acadêmico.
Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing	Gibson, I.; Rosen, D.W.; Stucker, B.	Auxiliar a compreensão do estado da arte e as oportunidades da MA.
Additive manufacturing tooling for the automotive industry	Leal, R.; Barreiros, F.M.; Alves, L.; Romeiro, F.; Vasco, J.C.; Santos, M.; Marto, C.	Produzir e testar insertos de estampagem para o setor automobilístico, em MA para metais, similares aos produzidos por manufatura convencional sem perder propriedades mecânicas.
Additive manufacturing: A transformational advanced manufacturing technology	Harris, I.D.	Apresentar a MA como tecnologia inovadora, suas vantagens, barreiras e futuros potenciais.
Additive Manufacturing: New Trends in the 4 th Industrial Revolution	Galantucci, L.M.; Guerra, M.G.; Dassisti, M.; Lavecchia, F.	Destacar o papel das tecnologias de MA, concentrando a atenção nos fatores que promovem seu sucesso e sua difusão generalizada entre as empresas mais importantes dos principais setores industriais.
Additive manufacturing - a revolution in progress? Insights from a multiple case study	Simons, M.	Através de uma análise de custo-benefício, demonstrar as mudanças necessárias para melhorar a competitividade da manufatura aditiva em comparação com a manufatura tradicional. Fornecer compreensão de como a MA pode se difundir na indústria.
AM and aerospace: An ideal combination	Nickels, L.	Descobrir como a MA pode mudar o futuro da indústria aeroespacial.
An integrated design methodology for components produced by laser powder bed fusion (L-PBF) process	Salmi, A.; Calignano, F.; Galati, M.; Atzeni, E.	Apresentar um procedimento de projeto integrado envolvendo otimização topológica, design de regras para os processos PBF a laser, modelagem CAD, considerações sobre permissões de usinagem e recursos para acabamento, e testar em um estudo de caso para validar a proposta.
Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review	Malekipour, E.; El-Mounayri, H.	Realizar uma revisão abrangente de todos os defeitos importantes gerados durante o processo PBF, identificar os parâmetros que contribuem para esses defeitos, e descrever a relação entre parâmetros e defeitos. Propor uma abordagem para aplicar o monitoramento e controle on-line, especialmente para processos em metal.

Cost - and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting	Kamps, T.; Lutter-Guenther, M. and Seidel, C.; Gutowski, T.; Reinhart, G.	Sugerir modelos de para a avaliação de custo e ciclo de vida em uma estrutura de princípio ao fim, focando em uma sequência de processos industriais.
Current state and potential of additive – Hybrid manufacturing for metal parts	Strong, D.; Sirichakwal, I.; Manogharan, G.P.; Wakefield, T.	Investigar até que ponto as empresas tradicionais estão equipadas e interessadas em participar de um sistema de fabricação híbrido que integra processos tradicionais e de MA.
Decision methods application to compare conventional manufacturing process with metal additive manufacturing process in the aerospace industry	Cruz, M.F.; Borille, A.V.	Comparar, através de diferentes abordagens de tomada de decisão, a MA com o processo de usinagem de uma peça de titânio utilizada na indústria aeroespacial.
Designing for Metal Additive Manufacturing: A Case Study in the Professional Sports Equipment Field	Graziosi, S.; Rosa, F.; Casati, R.; Solarino, P.; Vedani, M.; Bordegoni, M.	Discutir possibilidades e desafios ao projetar em MA para metais no campo de equipamentos esportivos profissionais.
Development and qualification of additively manufactured parts for space	O'Brien, M.J.	Apresentar estudos de caso sobre o desenvolvimento e a qualificação da MA para a indústria espacial, com os objetivos comuns de amadurecer a tecnologia e melhorar sua confiabilidade.
Development of an adaptive, self-learning control concept for an additive manufacturing process	Renken, V.; Albinger, S.; Goch, G.; Neef, A.; Emmelmann, C.	Apresentar o conceito da abordagem de controle, as relações necessárias entre os parâmetros de medição, processo e controle. Desenvolver e testar uma combinação de métodos inteligentes de autoaprendizagem do campo da inteligência artificial e hardware do controlador de processo.
Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing	Kietzmann, J.; Pitt, L.; Berthon, P.	Alertar os executivos sobre o potencial da MA, apresentando as decisões que precisam ser tomadas, as interrupções que eles enfrentarão e os destinos que a impressão em 3D os levará no futuro.
Does metal additive manufacturing in industry 4.0 reinforce the role of subtractive machining?	Królikowski, M.A.; Krawczyk, M.B.	Investigar se a MA reforça a função da manufatura subtrativa, um vez que os processos para metais necessitam pós-processamento para obter a forma e/ou precisão geométrica desejada.
Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts	Atzeni, E.; Salmi, A.	Avaliar o volume de produção para o qual a MA é competitiva em relação a processos convencionais para a produção de peças metálicas.
Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry	Bockin, D; Tillman, A.-M.	Investigar as implicações ambientais da MA para aplicações automotivas, avaliando o ciclo de vida do processo PBF, comparando a manufatura aditiva e convencional aplicada ao caso de um motor de caminhão leve.
Evaluating the Readiness Level of Additively Manufactured Digital Spare Parts: An Industrial Perspective	Kretschmar, N.; Chekurov, S.; Salmi, M.; Tuomi, J.	Identificar motivos para a rejeição de peças sobressalentes digitais, através da perspectiva corporativa, descrevendo uma estrutura de rede holística da cadeia de suprimentos para visualizar diferentes cenários de distribuição digital de peças sobressalentes, realizando pesquisa para avaliar as capacidades técnicas e econômicas da MA.
Frontiers of Additively Manufactured Metallic Materials	Zadpoor, A. A.	Destacar algumas das fronteiras das pesquisas sobre AM para metais.
How to integrate additive manufacturing technologies into manufacturing systems successfully: A perspective from the commercial vehicle industry	Yi, L.; Gläßner, C.; Aurich, J.C.	Apresentar os resultados de um projeto de pesquisa realizado pela academia em parceria com a indústria alemã de veículos comerciais, abordando quatro questões para uma aplicação a longo prazo das tecnologias de MA: identificação de barreiras para aplicações de MA, estimativa de custos para aplicação de MA, design de cadeias híbridas de processos aditivos-subtrativos e gerenciamento de qualidade com MA.

Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments	Flynn, J. M.; Shokrani, A.; Newman, S. T.; Dhokia, V.	Analisar e discutir publicações relacionadas ao desenvolvimento de plataformas de trabalho híbridas, com processos aditivos e subtrativos. Explorar o processo de fabricação, configuração da máquina e princípios de design, identificando futuros desafios e oportunidades dos processos híbrido.
Hybrid manufacturing – integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain	Strong, D.; Kay, M.; Conner, B.; Wakefield, T.; Manogharan, G.	Investigar pontos estratégicos para criação de centros de MA nos Estados Unidos e desenvolver um modelo de localização de instalações, com base na demanda, localização, custo fixo, custo de produção e custo de transporte para identificar municípios candidatos nos EUA que poderiam servir como centros de MA para as oficinas de máquinas existentes.
Impact of additive manufacturing on business competitiveness: A multiple case study	Niaki, M.K.; Nonino, F.	Identificar os impactos da MA na fabricação, estratégia e performance de negócios, para determinar os fatores que conduzem o desempenho.
Improving the QA of 3D-printed parts	Nickels, L.	Apresenta o sistema de monitoramento EOSTATE MeltPool.
Informing additive manufacturing technology adoption: total cost and the impact of capacity utilisation	Baumers, M.; Beltrametti, L.; Gasparre, A.; Hague, R.	Investigar a relação entre a utilização da capacidade de volume de construção e a operação eficiente da tecnologia em uma comparação, entre processos, dos custos de fabricação de um componente complexo usado na indústria de embalagens.
Investigating Components Affecting the Resource Efficiency of Incorporating Metal Additive Manufacturing in Process Chains	Girdwood, R.; Bezuidenhout, M.; Hugo, P.; Conradie, P.; Oosthuizen, G.; Dimitrov, D.	Orientar os planejadores de processo através das etapas necessárias, considerando os fatores-chave para a melhoria contínua em direção à utilização aprimorada de recursos do respectivo processo de MA de metal.
Laser based additive manufacturing in industry and academia	Schmidt, M.; Merklein, M.; Bourell, D.; Dimitrov, D.; Hausotte, T.; Wegener, K.; Overmeyer, L.; Vollertsen, F.; Levy, G. N.	Apresentar as tecnologia da MA com laser, com foco na indústria e na qualidade.
Mapping out the additive manufacturing landscape	Bland, S.; Conner, B.	Mapear produtos em potencial e ajudar as empresas a tomar decisões.
Metal additive manufacturing “ An interview with Sigma Labs CEO John Rice	McGuire, C.; Rice, J.	Discutir o papel da empresa Sigma Labs no setor de rápido crescimento da impressão 3D em metal.
Metal powder based additive manufacturing technologies-business forecast	Sriram, V.; Shukla, V.; Biswas, S.	Analisar as tendências globais de patentes nos últimos anos das tecnologias de MA.
MLCPM: A process monitoring framework for 3D metal printing in industrial scale	Amini, M. Chang, S.I.	Propor uma estrutura de monitoramento de processos denominada MLCPM (<i>Multi-Layer Classifier for Process Monitor</i>) para prever a probabilidade de uma impressão bem-sucedida em estágios críticos de impressão, com base em dados fornecidos por máquinas idênticas que produzem a mesma peça.
On the verge of disruption: rethinking position and role - the case of additive manufacturing	Oberg, C.; Shams, T.	Descrever e discutir mudanças em posições e funções relacionadas à implementação de tecnologias disruptivas, considerando a adoção da MA para peças metálicas.

Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification	Seifi, M.; Gorelik, M.; Waller, J.; Hrabe, N.; Shamsaei, N.; Daniewicz, S.; Lewandowski, J. J.	Resumir algumas atividades importantes de normatização, assim como as limitações associadas a normas disponíveis para MA de metais, com foco na medição de propriedades críticas.
Roadmap for Additive Manufacturing Identifying the Future of Freeform Processing	Bourell, D. L Leu, M. C Rosen, D. W	Desenvolver um roteiro para pesquisas na área de manufatura aditiva (MA) pelos próximos 10 a 12 anos.
The cost of additive manufacturing: Machine productivity, economies of scale and technology-push	Baumers, M.; Dickens, P.; Tuck, C.; Hague, R.	Construir modelo de custo de produção para sistemas de MA.
The Future of Manufacturing: A New Perspective	Wang, B.	Fornecer uma perspectiva a outros tópicos menos discutidos na MA, essenciais para a implementação bem-sucedida do futuro da manufatura, como sistemas híbridos, redefinição de fabricação avançada, blocos de construção de fabricação avançada, prontidão do ecossistema e escalabilidade da tecnologia.
Toward a Digital Thread and Data Package for Metals-Additive Manufacturing	Kim, D. B.; Witherell, P.; Lu, Y.; Feng, S.	Discutir a construção de modelos de dados para apoiar o desenvolvimento de metodologias de validação e conformidade na MA. Apresentar um mapa de informações da MA que utiliza a informática para facilitar a produtividade da peça, a repetibilidade do processo e a reprodutibilidade de parte a parte em um processo de MA.
Uncertainty quantification and management in additive manufacturing: current status, needs, and opportunities	Hu, Z.; Mahadevan, S.	Analisar o estado da arte da pesquisa e discute as necessidades e oportunidades na quantificação da incerteza e gerenciamento da incerteza dos processos de MA, com foco no processo PBF.

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

APÊNDICE B – Questionário preenchido por especialistas (Google Forms)

Parte I: Barreiras

1) Das classificações de barreiras apresentadas quais acredita serem as mais críticas na adoção da MA para metais?

☐ Organizacionais

☐ Educacionais

☐ Tecnológicas

☐ Financeiras

☐ De Qualidade

☐ De Projeto

☐ Normativas

☐ Ambientais

☐ Outro: _____

2) Das barreiras organizacionais quais acredita serem as mais críticas?

☐ Diferenças culturais

☐ Imprevisibilidade dos riscos em adotar a tecnologia

☐ Desafio da modificação dos processos tradicionais para os aditivos

☐ Dificuldade em ver os benefícios que a MA pode trazer para a empresa

☐ Tamanho e recursos da empresa

☐ Riscos de perda de mercado devido a imitações do produto da empresa

3) Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras organizacionais?

4) Das barreiras educacionais quais acredita serem as mais críticas?

☐ Falta de conhecimento da tecnologia de MA e seu potencial

☐ Falta de treinamentos e cursos disponíveis para as empresas

☐ Dificuldades em aprender a trabalhar com esses novos equipamentos

☐ Escassez de especialistas

- ☐ Necessidade de educar os clientes sobre os potenciais da MA
- ☐ Dificuldades para idealizar um produto fabricado por MA
- ☐ Falta de conhecimento de procedimentos estatísticos de controle e qualificação

5) Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras educacionais?

6) Das barreiras tecnológicas relacionadas ao design quais acredita serem as mais críticas?

- ☐ Falta de software integrado especializado em MA que abranja design e simulação
- ☐ Qualidade do modelo inicial do computador e a tradução para uma máquina específica pode ser comprometida;
- ☐ Necessidade de aumento da capacidade de processamento para análises estruturais mais complexas
- ☐ Erros podem ser proporcionados pelo software de modelagem.

7) Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras tecnológicas relacionadas ao design?

8) Das barreiras tecnológicas relacionadas ao processo quais acredita serem as mais críticas?

- ☐ Parâmetros de processo específicos para cada material
- ☐ Dificuldade em garantir a repetibilidade dos resultados
- ☐ Limitação do tamanho da peça pelo volume de processamento da máquina
- ☐ Elevado tempo de processamento
- ☐ Restrição de materiais compatíveis com o processo
- ☐ A limpeza das peças e remoção de materiais de suporte, de forma manual
- ☐ A maioria dos processos de MA requer pós-processamento;
- ☐ Muitas máquinas não possuem confiabilidade de hardware
- ☐ Incompatibilidade dos parâmetros de operação entre máquinas distintas
- ☐ Falta de gestão de dados por meio de sistemas de gerenciamento de informações para auxiliar o processo.

9) Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras tecnológicas relacionadas ao processo?

10) Das barreiras financeiras quais custos são mais críticos?

- ☐ Maquinário
- ☐ Matéria prima
- ☐ Manutenção dos equipamentos
- ☐ Processo de qualificação
- ☐ Desenvolvimento de normas internas
- ☐ Profissionais qualificados e treinados.

11) Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras financeiras?

12) Das barreiras de qualidade quais acredita serem as mais críticas?

- ☐ Impossibilidade de garantir as propriedades do material para um determinado processo de MA
- ☐ Materiais anisotrópicos podem resultar devido à fabricação em camadas, resultando em um desempenho inadequado
- ☐ Apenas um número limitado de ligas metálicas foi criteriosamente caracterizado
- ☐ Grande desafio para as empresas produtoras de pó no controle das características das ligas como, microestrutura, tamanho e distribuição das partículas de pó.
- ☐ Maior necessidade de controle do processo para garantir a qualidade
- ☐ Necessidade de controle para garantir a repetibilidade do processo
- ☐ Falta de sistemas de monitoramento dos processos de MA
- ☐ Falta de controle dos parâmetros ao longo da deposição
- ☐ A qualidade das peças fabricadas apresenta variações
- ☐ A inspeção das peças tem sido um desafio

- ☐ Pequenas variações no processo podem afetar as características finais da peça de forma local ou global
- ☐ Há variações na peça se construída em máquinas diferentes.
- ☐ Acabamento superficial inadequado
- ☐ Tolerâncias em níveis inferiores aos especificados
- ☐ A precisão dimensional inadequada
- ☐ Problemas na microestrutura
- ☐ As propriedades mecânicas nem sempre são tão boas quanto às obtidas pelas técnicas de fabricação convencionais

13) Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras de qualidade?

14) Das barreiras de projeto quais acredita serem as mais críticas?

- ☐ Dificuldade na escolha do material, devido a variedade, ou a falta, de ligas mais adequadas
- ☐ Disponibilidade restrita de fornecedores de matéria-prima para a MA
- ☐ Dificuldade de prever as propriedades das peças impressas
- ☐ Determinação do design adequado para o material de acordo com o processo utilizado
- ☐ Disponibilidade dos dados limitada para processos de MA
- ☐ Dificuldade de se visualizar o material de suporte e removê-lo do substrato
- ☐ Peças metálicas aderem ao substrato no qual foram depositadas, sendo necessário um pós-processamento para a sua remoção
- ☐ Dificuldade de modelar o processo de fabricação
- ☐ Indisponibilidade do modelo 3D de uma peça de reposição que não está disponível para digitalização

15) Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras de projeto?

16) Das barreiras normativas quais acredita serem as mais críticas?

- ☐ Quantidade limitada de normas relacionadas a MA

- ☐ Falta de normas e modelos, padrões de uso da tecnologia, desde o design até o pós-processamento
- ☐ Faltam parâmetros de processo certificados para uma peça e procedimentos de teste específicos
- ☐ Faltam procedimentos consolidados
- ☐ Faltam requisitos e normas governamentais
- ☐ O desenvolvimento de normas geralmente é demorado tanto para normas internas quanto em órgão reguladores privados ou governamentais
- ☐ Necessidade de certificar fornecedores da matéria prima assim como os que realizam o pós-processamento
- ☐ Necessidade de identificar testes não destrutivos para a identificação de falhas
- ☐ Falta de técnicas avançadas de ensaios não destrutivos capazes de detectar defeitos críticos internos em materiais com alto grau de certeza

17) Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras normativas?

18) Das barreiras Ambientais quais acredita serem as mais críticas?

- ☐ Falta de estudos que avaliem o impacto ambiental do material selecionado
- ☐ Perda de material significativa em alguns processos
- ☐ Impossibilidade de reciclar o material em alguns processos.

19) Adicionaria alguma barreira a classe de barreiras ambientais?

Parte II: Roteiro para a adoção da MA

20) Acha que o roteiro apresentado poderia auxiliar a adoção da MA dentro das empresas?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Talvez

21) Das etapas apresentadas teria algumas que gostaria de destacar, como sendo de maior importância?

22) Teria alguma etapa que acha desnecessária?

23) O uso das ferramentas da gestão ágil apresentadas (backlog, daily meeting, iterações) seriam interessante para a adoção da MA?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Talvez

24) Teria alguma outra ferramenta de gestão que adicionaria ao modelo?

25) Sugere alguma modificação interessante a fazer no modelo?

26) Acha que esta pesquisa beneficiaria a aplicação da MA em todos os setores industriais ou em algum setor mais específico?