CAUÊ GONÇALVES MANÇANARES

**Modelo de processo de avaliação para adoção de manufatura aditiva na indústria
de alto valor agregado**

São Paulo
(2016)

CAUÊ GONÇALVES MANÇANARES

**Modelo de processo de avaliação para adoção de manufatura aditiva na indústria
de alto valor agregado**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Senzi Zancul

São Paulo
(2016)

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 12 de julho de 2016

Assinatura do autor: Cauê Gonçalves Mançanares

Assinatura do orientador: ESG

Catálogo-na-publicação

Mançanares, Cauê Gonçalves

Modelo de processo de avaliação para adoção de manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado / C. G. Mançanares -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

137 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA 2.PRODUÇÃO DE PRODUTOS ÚNICOS 3.DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS 4.MANUFATURA I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

*Dedico este trabalho à minha mãe, Andreia,
pelo amor, carinho e apoio incondicionais.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Eduardo de Senzi Zancul pela orientação, pela confiança depositada e pelo exemplo de profissional e pessoa. Muito obrigado.

À minha mãe, Andreia, e à avó Isa (*in memorian*), que sempre me apoiaram, incentivaram, e pelos exemplos de vida.

À Nathalya, por estar ao meu lado ao longo desse caminho e por todo o amor, carinho e companheirismo.

Ao Professor David Noboru Nakano e ao Professor Dario Ikuo Miyake pelas contribuições valiosas durante o exame de qualificação.

Aos especialistas que participaram do trabalho e contribuíram com seu vasto conhecimento por meio das entrevistas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado.

Aos colegas do InovaLab@Poli, pela colaboração na pesquisa.

“You have to learn the rules of the game.
And then you have to play better than anyone else.”
Albert Einstein

RESUMO

Manufatura aditiva é um processo de fabricação de objetos que tem chamado a atenção de acadêmicos, empresas e órgãos de governo. Alguns setores específicos possuem demandas que podem ser mais bem atendidas com a utilização da manufatura aditiva na produção de peças de alto valor agregado. O problema prático que motiva a realização deste trabalho é a dificuldade enfrentada pelas empresas em avaliar as tecnologias de manufatura aditiva existentes para decisão de adoção ou não adoção delas em seus fluxos produtivos. A análise da situação atual na literatura indica que falta um modelo de processo específico de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado. Visando preencher essa lacuna e propor uma solução para o problema identificado, este trabalho tem como objetivo a definição de um modelo de processo específico de avaliação para adoção de manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado. Tal modelo é desenvolvido a partir de modelos de processo existentes para avaliar a adoção de outras tecnologias de manufatura avançada (*Advanced Manufacturing Technologies – AMTs*) e do levantamento das características específicas da manufatura aditiva. O modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado proposto contempla nove passos para decidir sobre a adoção ou a não adoção da manufatura aditiva. A aplicabilidade do modelo proposto foi avaliada por meio de entrevistas com especialistas. A avaliação dos resultados indica que os passos e as atividades propostos no modelo contribuem para auxiliar na avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado.

Palavras-Chave: **Manufatura aditiva. Manufatura avançada. Processo de fabricação.**

ABSTRACT

Additive manufacturing is a manufacturing process that has gained attention of scholars, companies and government bodies. Some specific sectors have demands that can be better met with the use of additive manufacturing to produce high added value parts. The practical problem that motivates this work is the difficulty met by companies in assessing additive manufacturing technologies for decision to adopt or not adopt them in their production flows. The analysis of the current situation in the literature indicates a gap of a specific process model to evaluate the adoption of additive manufacturing in the high added value industry. To fill this gap and to propose a solution for the identified problem, this work has the goal to define a specific process model to evaluate the adoption of additive manufacturing in the high added value industry. This model is developed based on existing process models to evaluate the adoption of other Advanced Manufacturing Technologies and the study of specific characteristics of additive manufacturing. The model proposed contemplates nine steps to decide on the adoption or not adoption of additive manufacturing. The applicability of the proposed model was evaluated through interviews with experts. The evaluation of the results indicates that the steps and the activities proposed in the model contribute to assist in the evaluation of the adoption of additive manufacturing in high added value industry.

Keywords: **Additive manufacturing. Advanced manufacturing. Manufacturing process.**

Lista de figuras

Figura 1 - Estrutura do capítulo 1	13
Figura 2 – <i>Design</i> otimizado de peça aeronáutica	15
Figura 3 - Tendências na manufatura aditiva e na adoção de AMTs	16
Figura 4 - Organização do texto	18
Figura 5 - Seções do referencial teórico	21
Figura 6 - Conteúdo da seção 2.1.....	22
Figura 7 - Relação de fatores na adoção de AMT – Modelo de Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006) ..	33
Figura 8 - Fluxo do modelo de adoção de AMT - Modelo de Ordoobadi (2013)	35
Figura 9 – Modelo de processo de adoção de AMT - Modelo de Chen e Small (1994)	37
Figura 10 – Modelo de processo de adoção de AMT - Modelo de Efstathiades, Tassou e Antoniou (2002)	39
Figura 11 - Conteúdo da seção 2.2.....	41
Figura 12 - Número de publicações por ano.....	44
Figura 13 - Peças metálicas para aeronaves fabricadas pela EOS	60
Figura 14 - Peças de turbina produzida por ARCAM.....	61
Figura 15 - Peças fabricadas utilizando moldes cerâmicos.....	62
Figura 16 - Peças plásticas e de polímeros fabricadas para a NASA	62
Figura 17 - Peças consertadas utilizando manufatura aditiva	63
Figura 18 - Peças produzidas a partir de moldes para a indústria automotiva	64
Figura 19 - Trocador de calor produzido pela EOS	66
Figura 20 - Relação entre objetivos específicos e procedimentos adotados	75
Figura 21 - Etapas do desenvolvimento da pesquisa.....	76
Figura 22 - Método de construção do modelo	78
Figura 23 - Relação entre passos e atividades do modelo.....	94
Figura 24- Lógica da seleção de máquinas de manufatura aditiva	108

Lista de abreviaturas e siglas

3DP	3 Dimensional Printing
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AHP	Analytic Hierarquy Process
AMT	Advanced Manufacturing Technologies
CAD	Computer-aided Design
CAE	Computer-aided engineering
CAM	Computer-aided manufacturing
CAPP	Computer-aided process planning
CIM	Computer-integrated manufacturing
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DMD	Direct Metal Deposition
EBM	Electron Beam Melting
ERP	Enterprise resource planning
FDM	Fused Deposition Modeling
FEF	Freeze-form Extrusion Fabrication
FMS	Flexible manufacturing systems
FMC	Flexible manufacturing cells
JIT	Just-in-time
LMD	Laser Metal Deposition
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJM	Multi-jet Modeling
MRP	Material requirements planning
MRPII	Manufacturing resources planning
MRO	Maintainance, Repair and Overhaul
OEM	Original Equipment Manufacturer
RFP	Rapid Freezing Prototyping
SLA	Stereolitography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Lase Syntering

Lista de tabelas

Tabela 1 - AMTs e principais autores	27
Tabela 2 - Benefícios da adoção de AMTs	30
Tabela 3 - Publicações por autor.....	44
Tabela 4 - Publicações por periódico	45
Tabela 5 - Número de citações por artigo	47
Tabela 6- Características das tecnologias de manufatura aditiva	53
Tabela 7 – Origem de cada passo do modelo	81
Tabela 8 – Passos e atividades do modelo e principais fontes das atividades prescritas	82
Tabela 9 - Justificativas sugeridas para iniciar a avaliação para adoção de manufatura aditiva.....	84
Tabela 9 - Fatores e variáveis da avaliação da estratégia competitiva e principais fontes	86
Tabela 10 - Fatores e variáveis da avaliação das competências e principais fontes	88
Tabela 9 - Justificativas sugeridas para iniciar a avaliação para adoção de manufatura aditiva.....	99
Tabela 11 - Avaliação das prioridades estratégicas	101
Tabela 13 - Avaliação das competências	105
Tabela 14 - Banco de dados de tecnologias para seleção.....	107
Tabela 15 - Resultados das entrevistas de avaliação do modelo proposto.....	113
Tabela 16 - Alterações sugeridas por especialistas nas justificativas do modelo original.....	117
Tabela 17 - Relação entre objetivos específicos do trabalho e resultados obtidos	119

SUMÁRIO

1. Introdução	12
1.1. Contexto e justificativa da pesquisa	13
1.2. Objetivo do trabalho	17
1.3. Limitações do trabalho	17
1.4. Organização deste texto	18
2. Referencial teórico	21
2.1. Adoção de AMT (<i>Advanced Manufacturing Technologies</i>)	22
2.1.1. Conceitos fundamentais de AMT	24
2.1.2. Motivações para adoção de AMT	29
2.1.3. Modelos de processos de avaliação para adoção de AMTs	31
2.2. Manufatura aditiva: estado da arte	40
2.2.2. Conceitos fundamentais de manufatura aditiva	49
2.2.3. Tecnologias de manufatura aditiva	52
2.2.4. Aplicações na indústria	58
2.2.5. Materiais	66
2.2.6. Impactos na sustentabilidade	70
3. Método de pesquisa	74
3.1. Caracterização da pesquisa	74
3.2. Etapas da pesquisa	76
3.2.1. Revisão bibliográfica	76
3.2.2. Construção do modelo	78
3.2.3. Avaliação do modelo	91
3.2.4. Conclusões do trabalho	92
4. Modelo de processo	93
4.1. Avaliação das necessidades da empresa	95
4.2. Avaliação das justificativas para adoção	97
4.3. Avaliação da estratégia competitiva	100
4.4. Avaliação dos indicadores	102
4.5. Avaliação de competências	103
4.6. Avaliação das tecnologias	105
4.7. Avaliação financeira	109
4.8. Decisão	110
4.9. Planejamento da adoção	111
5. Avaliação do modelo	112
6. Conclusões do trabalho	118
Referências Bibliográficas	121
Apêndice A	135

1. Introdução

As tecnologias de manufatura aditiva possuem o potencial de superar limitações da manufatura tradicional e impactar, de diversas formas, os processos produtivos. Como exemplo de tais limitações pode-se citar problemas na qualidade, na flexibilidade, no custo e no tempo de *setup* da produção de indústrias manufatureiras que produzem peças com alto valor agregado (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009; LEVY, 2010). No entanto, verifica-se que a análise dos impactos da manufatura aditiva é recente tanto nas aplicações industriais como em estudos acadêmicos (MARTINAA et al., 2012, METZGER, MUSCATELLO e MUELLER, 2013).

Ao mesmo tempo, observa-se que a adoção de tecnologias avançadas de manufatura (AMT – *Advanced Manufacturing Technologies*) é um tema estudado desde a década de 1990, no qual as principais práticas das empresas e os processos e métodos para a adoção de tecnologias avançadas já se encontram consolidados (ARISS, RAGHUNATHAN e JUNNATHAR, 2000; BOYER 1997; KOTHA, 1991; KOTHA e SWAMIDASS, 2000 DEAN, YOON e SUSMAN, 1992; SNELL e DEAN, 1992; SUN, 2000; ZAMMUTO e O'CONNOR, 1992).

Nesse sentido, este trabalho se propõe a desenvolver um modelo de processo de avaliação para adoção das tecnologias de manufatura aditiva para a indústria de alto valor agregado baseado no estudo dos processos gerais de adoção de tecnologias avançadas de manufatura e nas características específicas da manufatura aditiva.

O primeiro capítulo deste trabalho apresenta a introdução, que inclui o contexto e a justificativa da pesquisa, o objetivo do trabalho, as limitações de pesquisa e a organização do texto (Figura 1).

Figura 1 - Estrutura do capítulo 1

1. Introdução	
1.1.	Contexto e justificativa da pesquisa
1.2.	Objetivo do trabalho
1.3.	Limitações do trabalho
1.4.	Organização deste texto

Fonte: Elaborada pelo autor

Considerando os potenciais benefícios da manufatura aditiva, discute-se inicialmente como a adoção dessas tecnologias pode contribuir para melhorar a competitividade da indústria no Brasil, que corresponde ao contexto e justificativa da pesquisa (seção 1.1). Em seguida, é definido o objetivo do trabalho (seção 1.2) e as limitações do mesmo (seção 1.3). Por fim, é apresentada a forma de organização do texto (seção 1.4).

1.1. Contexto e justificativa da pesquisa

Manufatura aditiva é o processo de construção de objetos tridimensionais sólidos a partir da deposição de camadas, sendo oposta à manufatura subtrativa (NORMA ASTM, 2012). Esse processo de fabricação tem chamado a atenção de acadêmicos, empresas e órgãos de governo.

Dentre as aplicações resultantes de tal processo destaca-se a fabricação de peças para a indústria aeronáutica e aeroespacial (MARTINAA et al., 2012; METZGER, MUSCATELLO e MUELLER, 2013; THOMAS et al., 1996), indústria automotiva (SONG

et al., 2002), indústria biomédica (GIANNATIS e DEDOUSSIS, 2009; SACHLOS e CZERMUSKA, 2003) e outros campos tais como arquitetura e design.

O crescente interesse nesse processo de fabricação se deve à possibilidade de superar certas limitações da manufatura tradicional, com possibilidade de impactos positivos nos processos produtivos (KRUTH, LEU e NAKAGAWA, 1998; LEVYA, SCHINDELA e KRUTH, 2003; SREENIVASAN, GOEL e BOURELL, 2010).

Em paralelo ao desenvolvimento da manufatura aditiva, observa-se a crescente demanda em algumas indústrias específicas (e.g. aeronáutica, aeroespacial e energia) por peças de alto valor agregado (HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013; SERRES, 2011) com peso reduzido (LIPSON e MALONE, 2002), com geometrias complexas (STRANO et al., 2013), com materiais avançados (e.g. cerâmicas de alta temperatura, superligas de titânio e de níquel e aços especiais) (VAYREA, VIGNATA e VILLENEUVEA, 2012), produzidas em pequenos lotes (GUO e LEU, 2013) e com baixo *lead time* na reposição das peças (REEVES, 2008).

Essas demandas podem ser mais bem atendidas com a utilização da manufatura aditiva na produção de algumas peças (MARTINAA et al., 2012; METZGER, MUSCATELLO e MUELLER, 2013). Isso ocorre, pois, dentre os impactos positivos da manufatura aditiva em alguns processos produtivos estão a utilização mais eficiente de matéria prima, a possibilidade de fabricação de peças mais leves, por conta da possibilidade de construção de geometrias complexas que não são possíveis de construir com processos produtivos tradicionais, a possibilidade de inovações no *design* das peças para fabricação de geometrias complexas, a utilização de materiais avançados e difíceis de se trabalhar com a manufatura tradicional, a possibilidade de fabricação próxima ao consumidor, a redução de custos de transporte e os impactos na cadeia logística (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009; HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013; LUO et al., 1999, MORROW et al., 2006; REEVES, 2008; SERRES, 2011; VAYREA, VIGNATA e VILLENEUVA, 2012).

Um exemplo dessa melhor utilização de matéria-prima pode ser visto na Figura 2, em um caso apresentado pela General Eletric (GE, 2014), no qual uma peça estudada

para utilização em aeronaves foi fabricada com manufatura aditiva, o que permitiu a fabricação com um *design* otimizado e reduziu em aproximadamente 30% o peso e a utilização de matéria prima.

Figura 2 – *Design* otimizado de peça aeronáutica

Fonte: Adaptado de (GE, 2014)

Apesar de ser um processo de fabricação relativamente novo, os potenciais impactos positivos da manufatura aditiva citados acima despertam interesses crescentes na área de engenharia (LEVY, 2010). Estudos sobre suas tecnologias, aplicações e implicações são ainda de natureza exploratória e pouco disseminados, de modo que existem diversas lacunas a serem supridas nesse campo de pesquisa (GUO e LEU, 2013).

Por outro lado, a avaliação para adoção de AMTs é um assunto de pesquisa que se encontra mais consolidado por estudos teóricos e práticos. Algumas pesquisas atestam que a adoção de AMTs é essencial para a sobrevivência de empresas manufatureiras no mercado competitivo (GEORGAKELLOS, 2005; ORDOOBALDI, 2013, SMALL, 2007). Os benefícios e modelos de processos de avaliação para adoção de AMTs estão presentes em diversos estudos (CHAN, CHAN e TANG, 2000; NEWMAN, LAVELLE, e ESCHENBACH, 2000; SULLIVAN, BONTADELLI e WICKS, 2000).

Nesse cenário, observa-se uma lacuna no campo de pesquisa: a necessidade de modelos de processo específicos de avaliação para adoção de manufatura aditiva, apoiando empresas na sua tomada de decisão. Essa avaliação pode ser derivada dos modelos de processo existentes para avaliar a adoção de outras AMTs (Figura 3).

Figura 3 - Tendências na manufatura aditiva e na adoção de AMTs

Fonte: Elaborada pelo autor

É importante que o trabalho explore as características mais relevantes da manufatura aditiva. Além disso, o desenvolvimento de um modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria deve considerar características específicas das necessidades das indústrias onde se deseja aplicar tais tecnologias.

1.2. Objetivo do trabalho

Considerando o contexto e a justificativa apresentados, este trabalho pretende responder a seguinte questão: *“Como conduzir a avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado?”*.

Visando responder esta questão, o presente trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado. Esse objetivo pode ser desdobrado nos seguintes objetivos específicos, necessários para o atendimento do objetivo principal: identificar principais justificativas para adoção de tecnologias avançadas de manufatura; identificar e selecionar processos de adoção de tecnologia de manufatura avançada na indústria; identificar principais variáveis necessárias para avaliar a adoção de tecnologias de manufatura avançada; avaliar principais características da manufatura aditiva; desenvolver modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado; avaliar a adequação do modelo desenvolvido;

Uma vez entendidos os objetivos do trabalho, são apresentadas, na sequência, suas limitações.

1.3. Limitações do trabalho

O modelo desenvolvido neste trabalho apresenta uma limitação setorial de aplicação. Foram consideradas para construção do modelo características presentes nos setores da indústria que produzem peças de alto valor agregado. Tanto o estudo da teoria quanto o levantamento das necessidades das indústrias foram realizados com foco nas características desses setores.

É comum a caracterização da indústria como de alto valor agregado em função da sofisticação tecnológica e do grau de inovação dos produtos que produzem, sendo que o maior grau de inovação e sofisticação tornam o produto de maior valor agregado que outros (MORAIS, 2012).

Entende-se que a aplicação do modelo aqui desenvolvido se limita à setores desse tipo. Como exemplo, tem-se as indústrias aeronáutica, aeroespacial e energia.

Não obstante, a descrição das tecnologias de manufatura aditiva e as características dessas tecnologias presentes neste trabalho não são limitadas aos setores listados anteriormente, sendo que é possível identificar, ao ler o trabalho e os artigos acadêmicos dele resultantes, necessidades ou aplicações que se encaixam em outros tipos de indústrias em setores diferentes desses citados.

Além disso, as características da manufatura aditiva estudadas, descritas no presente trabalho, podem ser utilizadas como base para trabalhos vindouros que proponham outro modelo específico para outros setores industriais.

1.4. Organização deste texto

Este texto está estruturado em seis capítulos, organizados de acordo com a sequência ilustrada na Figura 4 a seguir.

Figura 4 - Organização do texto

Fonte: Elaborado pelo autor

No capítulo 1 são apresentados o contexto e o objetivo do trabalho. O contexto compreende a discussão da importância da manufatura aditiva nos processos produtivos

e do crescente interesse nesse processo de fabricação. O entendimento da situação atual permite que sejam identificadas lacunas de pesquisa – faltam modelos de processos de avaliação para adoção da manufatura aditiva. A fim de preencher essa lacuna, são detalhadas as perguntas de pesquisa e definido o objetivo do trabalho.

A síntese da bibliografia fundamental é realizada nas duas seções do referencial teórico do capítulo 2. Na seção 2.1 são apresentados os conceitos de AMTs, as justificativas para sua adoção e também são identificados e estudados os principais modelos de processos de adoção dessas tecnologias. Na seção 2.2 é apresentada revisão bibliográfica sistemática exploratória para identificar as principais características da manufatura aditiva que precisam ser estudadas. É realizado, então, um estudo detalhado da literatura acerca das características identificadas, além de um estudo dos principais conceitos que permeiam o tema.

Vale a pena ressaltar que a revisão bibliográfica que embasou o presente trabalho resultou na publicação de um artigo com enfoque na sustentabilidade na manufatura aditiva (MANCANARES, ZANCUL E MIGUEL, 2015) e também serviu de apoio à um artigo que trata do estado da arte da manufatura aditiva e propõe um *framework* para aplicação de tal processo (ZANCUL et. al, 2016).

Os métodos adotados, as etapas da pesquisa e as entregas do trabalho são apresentados no capítulo 3. Nesse capítulo, a forma de condução da pesquisa é apresentada em detalhes.

Em seguida, os resultados do trabalho são apresentados no capítulo 4, que detalha o modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado. O modelo contempla nove passos que compõem o processo para avaliar a adoção de tais tecnologias nos processos produtivos.

O modelo de processo apresentado propõe a utilização de atividades derivadas da literatura e atividades desenvolvidas ao longo do trabalho, sendo que as atividades

desenvolvidas ao longo do trabalho foram objeto de publicações (MANCANARES et. al, 2015; MANCANARES et. al, 2013; MANCANARES, ZANCUL e CAUCHICK, 2013).

No capítulo 5 é apresentada a avaliação do modelo desenvolvido. Por fim, o texto é encerrado com o capítulo 6, no qual são discutidas as conclusões e apresentadas as sugestões de trabalhos futuros.

2. Referencial teórico

O referencial teórico utilizado está organizado em duas seções, dedicadas às principais áreas do conhecimento que constituem a base conceitual deste trabalho: Adoção de AMTs (*Advanced Manufacturing Technologies*), e manufatura aditiva, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 - Seções do referencial teórico

Fonte: Elaborada pelo autor

A adoção de tecnologias avançadas de manufatura (AMT) é um tema amplamente discutido pela academia e em evolução desde a década de 1990 por meio do estudo das principais práticas das empresas e pela proposição de modelos e métodos para a adoção de tais tecnologias. Na seção 2.1 são discutidos os principais conceitos referentes às

AMTs e apresentados os modelos mais relevantes de avaliação para adoção de AMTs. O referencial teórico é estudado por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, descrita na respectiva seção.

Na seção 2.2 são discutidos os principais conceitos e apresentadas as principais tecnologias, aplicações, materiais, impactos e potenciais da manufatura aditiva. O referencial teórico também é estudado por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, descrita na respectiva seção.

2.1. Adoção de AMT (*Advanced Manufacturing Technologies*)

Esta seção aborda os principais conceitos de AMT e seus modelos e métodos de adoção na indústria. A Figura 6 apresenta a localização da seção 2.1 na estrutura do referencial teórico, destacando o seu conteúdo.

Figura 6 - Conteúdo da seção 2.1

Fonte: Elaborada pelo autor

Embora a discussão sobre a adoção de tecnologias avançadas de manufatura (AMT) seja um tema abordado pela academia desde os anos 1990, seus conceitos têm evoluído continuamente por meio de estudos focados nas práticas de adoção de tecnologias mais recentes, em países de diferentes níveis de evolução industrial e pela proposição de novos modelos e métodos para o processo de avaliação da adoção de tais tecnologias. Nesta seção são discutidos os principais conceitos de AMT (seção 2.1.1), as motivações para sua adoção (seção 2.1.2) e os principais modelos de avaliação para a adoção (seção 2.1.3).

O referencial teórico deste trabalho foi selecionado e analisado a partir de uma revisão bibliográfica sistemática. Uma revisão bibliográfica é sistemática quando é explícita e pode ser reproduzida, gerando os mesmos resultados (FINK, 2005). Este tipo de revisão é importante para definir os limites de uma pesquisa de maneira científica (DANE, 1990).

Do ponto de vista metodológico, a revisão bibliográfica pode ser entendida como uma análise de conteúdo em que aspectos quantitativos e qualitativos são combinados para entender descrições do tema pesquisado e assuntos relacionados (BREWERTON e MILLWARD, 2001). Os seguintes passos foram realizados na condução desta revisão bibliográfica (SEURING e MULLER, 2008): (i) coleta de material; (ii) análise descritiva; (iii) seleção de categorias; e (iv) avaliação do material.

Na coleta de material, as publicações selecionadas foram limitadas. A unidade de análise foi um artigo único. Somente artigos de periódicos científicos com sistema de revisão *peer-review* foram selecionados. A pesquisa foi realizada primariamente com a busca de palavras-chave. Foi utilizada a base *ISI Web of Science*.

Os seguintes critérios foram utilizados na pesquisa: (i) Cronológico: a pesquisa não foi refinada por período de tempo, uma vez que isto acarretaria na diminuição do escopo desta; (ii) terminologia: termos como “AMT” e “*adoption process*” foram utilizados na busca: títulos, palavras-chave, índice e tópicos; (iii) campo de estudo: este critério limitou os resultados ao campo de “*Engineering*”, uma vez que este é o mais relevante para o trabalho. Como os estudos de AMT já se encontram mais consolidados, foram

buscados apenas trabalhos específicos sobre processos de adoção destas tecnologias, o que restringiu de forma considerável a busca. Um total de 16 artigos foram identificados. Todos eles foram incluídos na análise de conteúdo.

Na análise descritiva, aspectos formais dos documentos foram analisados, como o número de publicações por ano, os nomes dos periódicos, os países de origem das publicações, os objetivos dos artigos, os setores industriais considerados e o método de pesquisa aplicado. Esse procedimento oferece um embasamento para uma análise teórica mais aprofundada.

A seleção de categorias contemplou a análise estrutural dos artigos encontrados. Nessa etapa foram definidas as três dimensões mais relevantes a serem analisadas: (i) definições de AMT; (ii) motivações para adoção de AMT; e (iii) modelos e métodos de adoção de AMT.

O material foi então avaliado de acordo com as dimensões assim definidas. O método de pesquisa empregado permitiu a identificação dos aspectos mais relevantes dos trabalhos e a interpretação dos resultados obtidos nos artigos analisados. A partir dos 16 artigos avaliados, foram estudadas outras publicações referenciadas que se mostraram relevantes para o entendimento do tema.

Foram aplicados métodos de análise bibliométrica e de análise de conteúdos na pesquisa. A análise bibliométrica é um método que provê informações sobre o desenvolvimento de um tema e seu posicionamento, enquanto a análise de conteúdo utiliza certos procedimentos para validar interpretações extraídas dos textos (WEBER, 1990). A análise de conteúdo considerou os resultados encontrados nos documentos de maneira objetiva, sistemática e quantitativa (KOLBE e BURNETT, 1991).

2.1.1. Conceitos fundamentais de AMT

A definição mais aceita de *Advanced Manufacturing Technologies* (AMT) é a de que são tecnologias auxiliadas por computadores utilizadas por empresas manufatureiras para produzir seus produtos (ARISS, RAGHUNATHAN e JUNNATHAR, 2000; SUN, 2000). Para alguns autores, o termo AMT pode ser descrito como uma

variedade de tecnologias usadas para controlar e monitorar atividades de manufatura de maneira direta e indireta (BOYER 1997; KOTHA, 1991; KOTHA e SWAMIDASS, 2000).

Outros autores defendem que AMTs podem ser descritas como um grupo de tecnologias integradas em *hardware* e em *software* de modo que, quando adequadamente implementadas, monitoradas e avaliadas, podem melhorar a eficiência e eficácia das empresas que as adotam (SMALL e YASIN, 2000; UDO e EHIE, 1996).

Outra definição amplamente aceita é a de que AMTs são uma família de tecnologias de manufatura em que o elemento comum é o uso de computadores para armazenar e manipular dados (DEAN, YOON e SUSMAN, 1992; SNELL e DEAN, 1992; ZAMMUTO e O'CONNOR, 1992).

Neste trabalho, a definição utilizada para AMTs é a de que são tecnologias de manufatura integradas com ferramentas computacionais utilizadas por empresas manufatureiras.

As AMTs são usualmente classificadas de acordo com suas relações funcionais com o processo de manufatura. As três categorias mais citadas na literatura são: (i) tecnologias de projeto, que são as utilizadas na fase de projeto do produto e do processo produtivo; (ii) tecnologias de manufatura, empregadas na produção propriamente dita; (iii) e tecnologias administrativas, que permitem comunicação mais rápida dentro da organização e ao longo da cadeia de suprimentos (BOYER e PAGELL, 2000; JONSSON, 2000; SLACK e LEWIS, 2001).

Outra classificação encontrada na literatura divide as AMTs de acordo com o tipo de tecnologia, classificando-as em: sistemas, dispositivos e estações, e sistemas integradores de gerenciamento (TIGRE, 2003). Os sistemas, dispositivos e estações englobam estações automáticas de identificação, estações automáticas de inspeção, dispositivos automáticos de manuseio de material, estações de trabalho de CAD (*Computer Aided Design*), equipamentos e ferramentas computadorizadas com controle numérico, controladores de produção programáveis, robôs e sistemas de controle do chão de fábrica. Os sistemas integradores de gerenciamento são tecnologias já integradas com o sistema computacional, como por exemplo *Computer Aided*

Manufacturing (CAM), *Computer Aided Engineering* (CAE), controle estatístico de processos produtivos, softwares de planejamento da produção e gerenciamento de estoque, gerenciamento de dados de engenharia, planejamento de processos por computador, redes locais e tecnologia de grupo (ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000).

Por fim, há ainda uma classificação de AMTs que divide as tecnologias em três categorias de acordo com o grau de integração que elas apresentam (BRANDYBERRY, RAI e WHITE, 1999, SUN, 2000; SURESH e MEREDITH, 1985):

1. Sistemas isolados;
2. Sistemas intermediários;
3. Sistemas integrados.

Essas três categorias são ainda subdivididas em subgrupos que agregam tecnologias que oferecem benefícios similares para a empresa (SMALL e YASIN, 1997):

- Sistemas isolados;
 - Tecnologias de projeto e de engenharia;
 - CAD;
 - CAPP (*Computer Aided Process Planning*);
 - Tecnologias de fabricação e montagem;
 - Máquinas de controle numérico;
 - Robôs *pick-and-place*;
 - Outros robôs;
 - Equipamentos a *laser*;
- Sistemas intermediários;
 - Tecnologias de manuseio automático de materiais;
 - Sistemas automáticos de armazenagem e recuperação;
 - Sistemas automáticos de manuseio de materiais;
 - Tecnologias de teste e inspeção automatizadas;
 - Equipamentos de teste e inspeção automáticos;
- Sistemas integrados;

- Sistemas flexíveis de manufatura;
- Sistemas e células de manufatura flexível – FMS/FMC (*Flexible Manufacturing Systems / Cells*);
- Tecnologias relacionadas à logística;
- JIT (*Just-in-time*)
- MRP (*Material Requirements Planning*);
- MRPII (*Manufacturing Resource Planning*);

As tecnologias que podem ser consideradas AMTs são inúmeras, sendo impraticável listar todas de maneira exaustiva. Entretanto, diferentes autores listam e descrevem alguns tipos de AMTs em seus trabalhos que são consideradas as mais relevantes. Tigre (2003) listou um grande número de tecnologias em seu trabalho. As referências utilizadas por este autor foram consultadas e a lista mencionada foi atualizada e complementada no presente trabalho, sendo apresentada em forma de tabela para facilitar o entendimento (Tabela 1).

Tabela 1 - AMTs e principais autores

Tecnologia	Referências
Estações automáticas de identificação	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995;
Equipamentos de teste e inspeção automáticos	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; SOHAL et al., 1999;
Dispositivos automáticos de manuseio de material	COOK e COOK, 1994; SMALL e YASIN, 1997; SOHAL et al., 1999;
Sistemas automáticos de armazenagem e recuperação / AGV	SMALL e YASIN, 1997; SOHAL et al., 1999;
CAD	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; COOK e COOK, 1994; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995;
CAM	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; COOK e COOK, 1994; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; SOHAL et al., 1999;
CAE	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995;
CAPP	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995;
CIM	COOK e COOK, 1994;
FMS	COOK e COOK, 1994; SOHAL et al., 1999;

Tecnologia	Referências
Equipamentos a laser	SMALL e YASIN, 1997; SOHAL et al., 1999;
JIT	COOK e COOK, 1994;
MRP	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; SMALL e YASIN, 1997; SOHAL et al., 1999;
MRPII	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; SOHAL et al., 1999;
Sistemas ERP (<i>Enterprise Resource Planning</i>)	MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; SLACK e LEWIS, 2001;
Sistemas e células de manufatura flexível – FMS/FMC	SMALL e YASIN, 1997;
CNC (Comando Numérico Computadorizado) - equipamentos e ferramentas com controle numérico computadorizado	ARISS, AGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; COOK e COOK, 1994; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; SOHAL et al., 1999;
Controladores de produção programáveis	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; MECHLING, SOHAL et al., 1999;
Robôs	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; COOK e COOK, 1994; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; SOHAL et al., 1999;
Sistemas de controle do chão de fábrica	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; SOHAL et al., 1999;
Controle estatístico de processos produtivos	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; SOHAL et al., 1999;
Softwares de controle de qualidade	SOHAL et al., 1999;
Sistemas de gerenciamento de bancos de dados	SOHAL et al., 1999;
Expert systems	SOHAL et al., 1999;
Gerenciamento de dados de engenharia	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; SOHAL et al., 1999;
Redes locais	ARISS, RAGHUNATHAN e KUNNATHAR, 2000;

Fonte: Adaptado de Tigre (2003)

Uma vez apresentadas as definições essenciais para o entendimento do trabalho, são discutidas, na sequência, as motivações que levam uma empresa manufatureira a adotar AMTs em seu processo produtivo.

2.1.2. Motivações para adoção de AMT

Para sobreviver no mercado competitivo e responder às demandas dos clientes, empresas manufatureiras de setores de produção de alto valor agregado investem em tecnologias avançadas (ORDOOBALDI, 2013; GEORGAKELLOS, 2005; SMALL, 2007).

Diversas pesquisas procuraram avaliar os benefícios da adoção de AMTs em processos produtivos. Muitos autores propõem a avaliação dos benefícios dessas tecnologias do ponto de vista financeiro e afirmam que as AMTs podem trazer retorno sobre o investimento (CHAN, CHAN e TANG, 2000; NEWMAN, LAVELLE e ESCHENBACH, 2000, SULLIVAN, BONTADELLI e WICKS, 2000). Outros afirmam que, em muitos casos, falta experiência em adoção de tais tecnologias nas empresas para que os benefícios possam ser calculados previamente e é comum que as empresas descubram benefícios inesperados advindos da adoção, sendo esses benefícios considerados como intangíveis (ORDOOBADI, 2013; SMALL, 2007).

Nesse cenário, são apresentados, na sequência, os principais resultados encontrados na literatura que dizem respeito aos motivos para adoção de AMTs.

Poucos estudos apresentaram resultados considerados satisfatórios na medição de dados quantitativos que atestem os benefícios da adoção de AMTs (ORDOOBADI, 2008; CARTER, 1992). Por conta disso, alguns autores chegam a afirmar que é impraticável avaliar os benefícios de novas tecnologias apenas com uma análise quantitativa (HOFMANA e ORR, 2005; ORDOOBADI, 2013). Assim, é de suma importância a experiência do tomador de decisão para identificar, de maneira qualitativa, os benefícios intangíveis que estas tecnologias podem trazer (ABDUL-GADER e KOZAR, 1995; ORDOOBADI, 2008).

Dentre os benefícios intangíveis, alguns autores enfatizam os benefícios estratégicos, como o aumento da flexibilidade na produção (BROWN, 2001), melhora da imagem perante os clientes (HOFMANA e ORR, 2005), atendimento a fatores ambientais (ELBERTSEN e VAN REEKUM, 2008) e mudanças no portfólio de produtos para explorar novos mercados (LEFLEY, 2004).

Estudos ainda enfatizam alguns benefícios mais prováveis de serem mensurados, como melhorias na qualidade (KUMAR, 1996), redução no lead time de produção (BROWN, 2001), aumento na utilização das máquinas e na redução dos custos com mão de obra direta (HOFMANA e ORR, 2005).

Os benefícios da adoção de AMTs por empresas manufatureiras dificilmente poderão ser generalizados para todas as tecnologias e todas as empresas e nem garantidos com um grau elevado de certeza. Entretanto, são encontrados na literatura diversos benefícios constatados em pesquisas práticas. A Tabela 2 apresenta tais benefícios e os relaciona com as publicações que os mencionam.

Tabela 2 - Benefícios da adoção de AMTs

Benefício do processo	Publicações
Melhoria da qualidade	ARISS, RAGHUNATHAN, e KUNNATHAR, 2000; CHEN e SMALL, 1996; JONSSON, 2000; SCHRODER e SOHAL, 1999; UDO e EHIE, 1996
Melhoria da confiabilidade	CHEN e SMALL, 1996; JONSSON, 2000
Aumento da produtividade	CO, PATUWO e HU, 1998; LINDBERG, 1994; SOHAL ET AL., 2001
Maior flexibilidade	COOK e COOK, 1994; CO, PATUWO e HU, 1998; SOHAL ET AL., 2001
Melhoria da eficiência	CO, PATUWO e HU, 1998; SLACK e LEWIS, 2001
Aumento da integração nos sistemas de produção	TIGRE, 2003
Obtenção ou ampliação da vantagem competitiva	ARISS, RAGHUNATHAN, e KUNNATHAR, 2000; ELBERTSEN e VAAN REEKUM, 2008; SLACK e LEWIS, 2001
Redução do custo de mão-de-obra	CO, PATUWO e HU, 1998; HOFMAN e ORR, 2005; JONSSON, 2000
Melhoria do retorno sobre os investimentos	CHAN, CHAN e TANG, 2000; NEWMAN, LAVELLE e ESCHENBACH, 2000; SULLIVAN, BONTADELLI e WICKS, 2000
Redução dos tempos de <i>setup</i> , mudanças e ajustes	UDO e EHIE, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998; SCHRODER e SOHAL, 1999
Redução do tempo de ciclo de produção	CHEN e SMALL, 1996; JONSSON, 2000
Redução no tamanho dos lotes	CHEN e SMALL, 1996
Redução de estoque	CHEN e SMALL, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998; JONSSON, 2000
Redução da taxa de refugos e do desperdício	UDO e EHIE, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998; SCHRODER e SOHAL, 1999; JONSSON, 2000
Respostas mais rápidas a quebras de equipamentos	UDO e EHIE, 1996; MONGE et al., 2006
Melhor controle dos componentes	UDO e EHIE, 1996; MONGE et al., 2006
Redução do espaço do chão de fábrica	UDO e EHIE, 1996; MONGE et al., 2006
Redução da quantidade de re-trabalho	UDO e EHIE, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998
Aumento da produção	SCHRODER e SOHAL, 1999; RAYMOND, 2005
Melhor controle da fabricação	UDO e EHIE, 1996
Melhor gerenciamento de dados	RAYMOND, 2005; UDO e EHIE, 1996
Melhor controle gerencial	RAYMOND, 2005; SCHRODER e SOHAL, 1999
Desenvolvimento das capacitações de engenharia e gestão	UDO e EHIE, 1996
Aumento de vendas	SCHRODER e SOHAL, 1999
Proporcionar entregas rápidas	MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; CHEN e SMALL, 1996; JONSSON, 2000
Melhor resposta à variação no volume de produção	SCHRODER e SOHAL, 1999; JONSSON, 2000

Benefício do processo	Publicações
Melhoria no tempo de resposta às variações na demanda	LINDBERG, 1994; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; UDO e EHIE, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998; JONSSON, 2000
Redução do tempo de desenvolvimento de produtos	SCHRODER e SOHAL, 1999; JONSSON, 2000
Aumento da gama de produtos oferecidos	SCHRODER e SOHAL, 1999; MONGE et al., 2006
Menor tempo para o início da fabricação de um novo produto	MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995
Respostas mais rápidas a mudanças de projeto e de processo	LINDBERG, 1994; JONSSON, 2000
Maior habilidade para responder às mudanças de engenharia	SCHRODER e SOHAL, 1999; MONGE et al., 2006
Ajuste a ciclos de vida do produto mais curtos	MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; UDO e EHIE, 1996
Melhor resposta à variação no mix de produtos	SCHRODER e SOHAL, 1999; JONSSON, 2000
Proporcionar produtos de alto desempenho	ARISS, RAGHUNATHAN, e KUNNATHAR, 2000; JONSSON, 2000;
Redução do trabalho em andamento	SCHRODER e SOHAL, 1999; JONSSON, 2000
Melhor integração dos sistemas de informação de manufatura	SCHRODER e SOHAL, 1999
Melhor integração dos sistemas de informação entre as diferentes funções	SCHRODER e SOHAL, 1999; MONGE et al., 2006
Melhoria na atitude da força de trabalho	SCHRODER e SOHAL, 1999
Melhoria no ambiente de trabalho	SCHRODER e SOHAL, 1999
Redução da exposição a problemas/conflitos trabalhistas	UDO e EHIE, 1996; RAYMOND, 2005
Melhores relações de trabalho	SCHRODER e SOHAL, 1999
Melhoria na habilidade de responder às variações de tempo de ciclo dos fornecedores	SCHRODER e SOHAL, 1999
Maior habilidade para respostas a variações de qualidade nos fornecedores	SCHRODER e SOHAL, 1999
Aprimoramento de deficiências de capacitação	SCHRODER e SOHAL, 1999
Melhoria na atitude da administração	SCHRODER e SOHAL, 1999
Melhorar a imagem da companhia	UDO e EHIE, 1996; SCHRODER e SOHAL, 1999
Aprimoramento de deficiências de capacitação na gestão da produção	SCHRODER e SOHAL, 1999

Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se perceber que os benefícios constatados pelos autores em seus trabalhos são dos mais diversos tipos.

Entendidos os principais fatores que motivam a adoção de AMTs nas indústrias, a seção a seguir apresenta os quatro modelos de processos de adoção de AMTs selecionados para servir de base para o modelo desenvolvido neste trabalho.

2.1.3. Modelos de processos de avaliação para adoção de AMTs

Atualmente existem diversos modelos que tratam da avaliação da adoção de AMTs em indústrias manufatureiras. Nesta síntese do referencial teórico serão apresentados os quatro modelos de avaliação para adoção identificados dentre os artigos selecionados na revisão bibliográfica sistemática. Deve-se ressaltar que tais modelos não são os únicos existentes. No entanto, foram os únicos encontrados dentre

os resultados da revisão bibliográfica sistemática realizada. Outros modelos não publicados na forma de artigo científico ou que ainda não se encontram na base de dados utilizada para pesquisa não foram considerados. Os principais aspectos de cada modelo selecionado são descritos a seguir.

Modelo de Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006)

O modelo proposto por Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006) foi elaborado com base em um estudo feito em empresas australianas e obteve uma aceitação considerada satisfatória pelos autores, comprovada com a aplicação de um questionário nas empresas estudadas.

Os autores têm o entendimento de que uma série de fatores organizacionais e ambientais afetam o processo de adoção de tecnologias avançadas de manufatura nas indústrias e, a partir da aplicação de um questionário em 224 empresas, avaliam o grau em que os fatores considerados no modelo proposto são realmente relevantes.

A proposição geral do modelo indica que a adoção de AMTs depende do aprendizado iterativo, determinado pela adoção contínua de novas tecnologias de manufatura, pelo conhecimento acumulado na organização e pela força da transferência de ideias através da organização, dos fornecedores, das associações industriais e dos órgãos de governo responsáveis.

O modelo proposto considera os seguintes fatores na adoção de AMTs:

1. Oportunidades ambientais;
 - a. Oportunidades institucionais;
 - b. Oportunidades na cadeia de suprimentos;
2. Ativos para AMT;
 - a. Recursos para investir em AMT;
 - b. Capacidade de implementar AMT;
 - c. Competências de operar AMT;
3. Fatores ambientais;
 - a. Incerteza ambiental;

- b. Atividade exportadora;
- c. Tamanho da empresa;
- 4. Aplicação de AMT;
 - a. Tecnologia de comunicação e coordenação;
 - b. Fabricação e montagem;
 - c. Engenharia;

A relação entre estes fatores na adoção de AMTs é apresentada na Figura 7 a seguir.

Figura 7 - Relação de fatores na adoção de AMT – Modelo de Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006)

Fonte: Adaptado de Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006)

Para cada um dos fatores foi feita uma análise estatística com as respostas obtidas na aplicação do questionário. A análise implicou na desconsideração dos fatores “Atividade exportadora” e “Incerteza ambiental” como relevantes para o modelo. Todos os outros fatores foram considerados relevantes.

O modelo prevê uma maior discricionariedade por parte do tomador de decisão, uma vez que se limita a identificar os fatores mais relevantes na escolha da tecnologia, cabendo ao tomador de decisão avaliar qual tecnologia é mais viável a partir da análise realizada.

Modelo de Ordoobadi (2013)

Uma longa pesquisa sobre avaliação de tecnologias avançadas de manufatura (ORDOOBADI e MULVANEY, 2001; ORDOOBADI, 2008) culminou na recente publicação de um modelo de processo de adoção de AMTs que visa auxiliar gestores na decisão de escolha da tecnologia a ser adotada (ORDOOBADI, 2013).

De acordo com o autor, a avaliação e seleção de tecnologias avançadas é uma decisão multicritério que envolve fatores tangíveis e intangíveis. Dessa forma, no modelo proposto por Ordoobadi (2013) são identificados e incluídos esses diferentes critérios para garantir que a adoção das tecnologias seja otimizada.

No modelo, o autor defende que, em primeiro lugar, sejam identificados os fatores pertinentes à empresa e à tecnologias que está sendo adotada. Essa etapa é feita pela identificação dos riscos e benefícios referentes à adoção de tais tecnologias. É utilizada uma abordagem híbrida, que considera fatores objetivos e subjetivos na avaliação para adoção das tecnologias. A lógica do modelo proposto é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Fluxo do modelo de adoção de AMT - Modelo de Ordoobadi (2013)

Fonte: Adaptado de Ordoobadi (2013).

O autor propõe que a avaliação quantitativa dos riscos e benefícios identificados nas tecnologias seja feita pela função Taguchi *loss function*, baseado no valor alvo para determinado risco ou benefício e avaliado pelo tomador de decisão responsável na empresa. O modelo toma como base esses valores obtidos e utiliza o AHP (*Analytic Hierarquy Process*) para determinar o ranqueamento das tecnologias.

Esse modelo tem como resultado um ranking das tecnologias mais indicadas para determinada situação. O papel do tomador de decisão é de suma importância nesse modelo, pois é ele quem determinará os riscos e benefícios e também avaliará esses riscos e benefícios em cada alternativa.

Modelo de Chen e Small (1994)

O modelo de processo de adoção de AMTs proposto por Chen e Small (1994) ainda pode ser considerado relevante, apesar de antigo, pois se tornou base para estudos empíricos que validam o fluxo de decisão proposto (para um exemplo, ver Brown, 2001). Tal modelo foi elaborado em um contexto de incertezas sobre o retorno do investimento em AMT, uma vez que, segundo os autores, diversas empresas que adotaram tecnologias avançadas no início da década de 90 não colheram todos os benefícios esperados.

De acordo com os autores do modelo, o motivo pelo qual as empresas não obtinham todos os benefícios esperados da adoção de AMTs estava concentrado em barreiras gerenciais, de planejamento e de implementação das tecnologias. Dessa forma, foi proposto um modelo de processo de adoção de tecnologias avançadas de manufatura que considerasse um planejamento integrado da aquisição e implementação dessas tecnologias, baseado em um estudo empírico.

O modelo considera cinco etapas que incorporam as decisões de objetivos de negócio, monitoramento tecnológico, planejamento da implementação, instalação e pós-instalação (Figura 9).

Figura 9 – Modelo de processo de adoção de AMT - Modelo de Chen e Small (1994)

Fonte: Adaptado de Chen e Small (1994)

Os autores apresentam uma descrição detalhada de cada etapa do modelo proposto. Esse modelo é baseado em um forte planejamento da adoção da tecnologia e

em uma revisão periódica do planejamento, de forma a adequar a tecnologia aos objetivos de negócio da organização e garantir que a AMT seja implementada no processo produtivo de forma a proporcionar à organização todos os benefícios esperados.

Para isso, é necessário garantir que uma série de atividades sejam cumpridas em cada etapa. Como resultado, os autores concluíram que as empresas comprometidas com o alinhamento das estratégias de negócio às tecnologias de manufatura utilizadas e da coordenação da estratégia de vendas com a estratégia de manufatura são as mais bem-sucedidas na adoção de AMTs.

Modelo de Efstathiades, Tassou e Antoniou (2002)

O modelo proposto por Efstathiades, Tassou e Antoniou (2002) foi desenvolvido a partir de um estudo de caso e do estudo de métodos de avaliação de tecnologias existentes na literatura e contempla o planejamento dos requisitos necessários para que a adoção de AMT seja bem-sucedida.

Tal modelo propõe um fluxo de três etapas para que haja justificção e implementação adequadas na adoção de tecnologias avançadas de manufatura. De acordo com os autores, o fluxo garante que parâmetros estratégicos e técnicos sejam atendidos na implementação de tais tecnologias.

As três etapas são: (i) planejamento; (ii) seleção, transferência e pré-implementação; e (iii) pós-implementação (Figura 10). Os autores apresentam as etapas de maneira detalhada, garantindo que os fatores considerados relevantes para a decisão de adoção, avaliação das tecnologias, implementação e pós-implementação sejam considerados, aumentando assim a chance de sucesso.

Figura 10 – Modelo de processo de adoção de AMT - Modelo de Efstathiades, Tassou e Antoniou (2002)

Fonte: Adaptado de Efstathiades, Tassou e Antoniou (2002)

O modelo apresentado pelos autores pode ser considerado um planejamento integrado para adoção de tecnologias avançadas de manufatura, uma vez que contempla

etapas que vão desde a justificação da necessidade das tecnologias até a pós-implementação.

Esse modelo pode ser utilizado como um guia prático para gestores justificarem corretamente as necessidades de AMTs e para auxiliá-los no planejamento da implementação de tais tecnologias na empresa. Os resultados práticos obtidos no estudo de caso realizado pelos autores permitem afirmar que o nível técnico dos funcionários, o planejamento de recursos humanos e a contínua supervisão da operação das tecnologias adotadas são os fatores que fortalecem os efeitos positivos esperados.

Os autores ainda ressaltam que ajustes contínuos no planejamento da operação das tecnologias implementadas, alocação de recursos para treinamento e supervisão da operação e melhorias nos indicadores de produtividade e nos procedimentos de produção e *setup* são necessários para que os objetivos esperados com a adoção das tecnologias sejam atingidos. Ainda são apontados alguns fatores que podem dificultar a adoção de AMTs, como, por exemplo, a incerteza dos funcionários sobre a capacidade de operar tais tecnologias.

2.2. Manufatura aditiva: estado da arte

Esta seção aborda os conceitos fundamentais de manufatura aditiva. A Figura 11 apresenta a localização da seção 2.2 na estrutura do referencial teórico, destacando seu conteúdo.

Figura 11 - Conteúdo da seção 2.2.

Fonte: Elaborada pelo autor

A manufatura aditiva é um tema recente e que tem chamado a atenção de acadêmicos, empresas e órgãos de governo. Assim, é importante que se faça uma discussão sobre esse tema. Nesta seção, são apresentadas as principais tecnologias de manufatura aditiva e discutidos seus conceitos, aplicações e implicações. São apresentadas a revisão bibliométrica realizada (seção 2.2.1), os principais conceitos de manufatura aditiva (seção 2.2.2), as principais tecnologias de manufatura aditiva conhecidas (seção 2.2.3), suas aplicações na indústria (seção 2.2.4), os materiais tipicamente utilizados por essas tecnologias (seção 2.2.5), e discutidos os impactos da manufatura aditiva na sustentabilidade (seção 2.2.6).

Para compreender as principais categorias da manufatura aditiva é necessário realizar um estudo exploratório sobre tal tema. Para isso, optou-se, neste trabalho, por

realizar uma revisão bibliométrica mais ampla que à realizada na seção 2.1 com a finalidade de compreender as principais áreas do conhecimento que deveriam ser analisadas. Dessa forma, a próxima seção apresenta em detalhe como foi feita a revisão bibliométrica, enquanto as seções seguintes apresentam a avaliação do conteúdo de cada categoria relevante para o entendimento do tema.

2.2.1. Revisão bibliométrica sobre manufatura aditiva

Para compreender a organização das pesquisas e a evolução neste novo campo de estudos, utilizou-se a revisão bibliográfica sistemática, também conhecida como revisão bibliométrica. Foi utilizado o mesmo embasamento teórico aplicado na seção anterior (2.1.) (FINK, 2005; DANE, 1990).

Os seguintes passos foram realizados na condução desta revisão bibliográfica conforme Seuring e Muller (2008): (i) coleta de material; (ii) análise descritiva; (iii) seleção de categorias; e (iv) avaliação do material. Nesta seção, são apresentados os resultados referentes aos três primeiros passos. O quarto passo, avaliação do material, será feita de forma detalhada nas seções subsequentes.

A partir de bases de dados reconhecidas na academia foram obtidos os dados de produção científica sobre manufatura aditiva, e em seguida foram aplicados filtros e métodos de análise para garantir que as diversas teorias fossem analisadas de forma ampla e para que fosse possível construir o histórico e descrição das principais pesquisas sobre o tema (CROWTHER e COOK, 2007; CARTER e EASTON, 2011).

Para este estudo foram utilizadas bases de artigos publicados em *journals* devido ao seu alto grau de confiabilidade para a obtenção dos resultados. É importante ressaltar que a análise sistemática da bibliografia não substitui o estudo aprofundado e qualitativo dos textos (RODRIGUEZ e NAVARRO, 2004). Assim, os textos mais importantes foram lidos, e suas conclusões são apresentadas nesta mesma seção.

A amostra de artigos foi extraída da base de dados *ISI Web of Science*, pois ela agrega outras bases de dados de periódicos e permite que os resultados da pesquisa sejam exportados em metadados, o que é essencial para a análise realizada. O passo

seguinte foi analisar os dados extraídos utilizando o software MS Excel. A partir desta análise, foi possível reconhecer campos de pesquisa emergentes além de identificar o histórico de publicações sobre manufatura aditiva, a origem e a evolução das pesquisas científicas que envolvem o tema.

Obtenção dos dados

As pesquisas foram realizadas através da plataforma *Web of Knowledge* no banco de dados *ISI Web of Science*.

A palavra-chave utilizada para a pesquisa foi “*Additive Manufacturing*”. Para a realização da pesquisa foi utilizado o filtro de *Document type*, que permitiu escolher para os resultados de pesquisa apenas artigos publicados em *journals*, por sua maior confiabilidade, dado que eles já passaram por uma seleção e revisão para serem publicados.

A busca resultou em 406 trabalhos, pois a pesquisa foi realizada de maneira abrangente, com o objetivo de explorar os campos de pesquisa desta área de estudo, diferente da pesquisa sobre AMT, que teve um foco muito mais específico e bem definido. Foram utilizados todos estes 406 trabalhos para a análise sistemática quantitativa.

Resultados da análise bibliométrica

O primeiro resultado da análise diz respeito à contemporaneidade das publicações e permite concluir que o interesse no tema é recente e tem ganhado força a cada ano desde 2009. A Figura 12 apresenta o número de publicações por ano.

Figura 12 - Número de publicações por ano

Fonte: Elaborada pelo autor

Esse resultado (Figura 12) indica o crescente interesse no tema. O estudo sistemático da bibliografia também permitiu explorar os autores que mais se destacaram com publicações na área de estudo de manufatura aditiva, como apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 - Publicações por autor

Autor	Número de publicações
WICKER RB	15
KRUTH JP	14
MEDINA F	13
MURR LE	13
ROSEN DW	12
STAMPFL J	11
MARTINEZ E	10
STUCKER BE	10
BABU SS	9
DICKENS P	9
RAM GDJ	9
GAYTAN SM	8
LISKAR	8

Fonte: Elaborada pelo autor

Para entender os periódicos que mais se destacaram em publicações sobre o tema foram identificados aqueles com mais de cinco publicações, e foi feito um levantamento do escopo e as principais áreas cobertas, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Publicações por periódico

Periódico	Escopo	Principais áreas de atuação	Publicações
RAPID PROTOTYPING JOURNAL	Tecnologias de prototipagem rápida	Engenharia mecânica e de materiais	57
JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY	Processamento de metais	Fundição, manufatura aditiva, propriedades de materiais, <i>design</i>	24
INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY	Preencher lacuna entre pesquisa e aplicação de manufatura	Tecnologias de manufatura	17
MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING	Estudos teóricos e experimentais envolvendo propriedades de materiais	Capacidade de materiais; Microestrutura; propriedades mecânicas	11
ADVANCED MATERIALS & PROCESSES	Trazer as inovações em materiais de engenharia	Materiais de engenharia	9
MATERIALS & DESIGN	Facilitar entendimento de materiais de engenharia modernos	Propriedades de materiais; Materiais de engenharia; Projeto de materiais	8
ACTA MATERIALIA	Experimento e simulações	Materiais inorgânicos	8
PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE	Inovações na manufatura	Manufatura; Engenharia	8

Periódico	Escopo	Principais áreas de atuação	Publicações
BIOFABRICATION	Fabricação usando materiais biológicos	Fabricação; Materiais biológicos	7
CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY	Tecnologia de manufatura	Assembly, Cutting, Design, Electro-Physical and Chemical Processes, Forming, Abrasive processes, Surfaces, Machines, Production Systems and Organizations, Precision Engineering and Metrology, Life-Cycle Engineering, Microsystems Technology (MST), Nanotechnology	7
JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME	Pesquisas teóricas e experimentais na manufatura	Manufatura; Engenharia	7

Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se observar que o periódico com mais publicações, *Rapid Prototyping Journal*, está muito à frente dos outros em número de publicações devido a sua especialização em artigos de manufatura aditiva pois uma das principais áreas de aplicação da manufatura aditiva é a de prototipagem rápida. Analisando apenas a partir do segundo periódico mais citado, verifica-se que cinco deles tratam de estudos sobre manufatura, quatro tratam de materiais especiais para engenharia, e um deles trata da fabricação utilizando biomateriais.

Outro indicador importante para a análise exploratória do campo de estudo é o número de citações por artigo. Considera-se que um é artigo mais influente que outros, como balizador de conceitos e métodos, quando é mais citado por outros autores. Foram identificados os quinze artigos que tiveram mais de vinte citações (Tabela 5).

Tabela 5 - Número de citações por artigo

Título	Autores	Ano	Total de citações	Objetivos	Principais resultados ou conclusões
Modeling of laser cladding with powder injection	Han, L; Liou, FW; Phatak, KM	2004	55	Construir modelo matemático para otimizar tecnologia de fabricação	Melhoria na qualidade da peça produzida com novo modelo
A study of the micro structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V	Thijs, Lore; Verhaeghe, Frederik; Craeghs, Tom; Van Humbeeck, Jan; Kruth, Jean-Pierre	2010	52	Estudar a microestrutura da peça fabricada por SLM	A direção dos grãos é o fator que mais influencia a resistência
Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing	Hu, DM; Kovacevic, R	2003	49	Desenvolver um sistema de controle para máquinas de LBM	Modelo tri-dimensional de elementos finitos
Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability	Dinda, G. P.; Dasgupta, A. K.; Mazumder, J.	2009	47	Fabricação e análise da resistência de peças por DMD	DMD obteve bons resultados: sem fissuras, sem porosidade e sem problemas de ligação
Towards All-Organic Field-Effect Transistors by Additive Soft Lithography	Serban, Dana Alina; Greco, Pierpaolo; Melinte, Sorin; Vlad, Alexandru; Dutu, Constantin Augustin; Zacchini, Stefano; Iapalucci, Maria Carmelo; Biscarini, Fabio; Cavallini, Massimiliano	2009	40	⁻¹	⁻¹
Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting	Mercelis, P.; Kruth, J. P.	2006	40	Estudo de estresse residual nas tecnologias SLS e SLM	Estresse residual alto para SLM
Modelling the geometry of a moving laser melt pool and deposition track via energy and mass balances	Pinkerton, AJ; Li, L	2004	34	Desenvolvimento e verificação de modelo para deposição de metal por DMD	Modelo consegue balancear massas e energias na fabricação

¹ O autor do presente trabalho não teve acesso a esse estudo

Título	Autores	Ano	Total de citações	Objetivos	Principais resultados ou conclusões
The laser additive manufacture of Ti-6Al-4V	Kobryn, PA; Semiatin, SL	2001	33	Estudo da microestrutura de peças fabricadas por LAM	Estudo permite uma primeira análise da microestrutura
Cold gas dynamic manufacturing: A non-thermal approach to freeform fabrication	Pattison, J.; Celotto, S.; Morgan, R.; Bray, M.; O'Neill, W.	2007	29	Desenvolvimento de método de fabricação de forma livre por CS	O processo pode produzir forma livres a baixo custo
Use of ultrasonic consolidation for fabrication of multi-material structures	Ram, G. D. Janaki; Robinson, C.; Yang, Y.; Stucker, B. E.	2007	27	Verificação da aptidão para fabricação de peças de metal em multi-material	A grande maioria dos metais pode se fundir ao aço 3003 por AM
Modeling and experiments of laser cladding with droplet injection	Choi, J; Han, L; Hua, Y	2005	25	Estudo de modelos matemáticos para análise de peças fabricadas por DMD	Modelos matemáticos apresentam grande similaridade com testes práticos
Fundamental study on plasma deposition manufacturing	Zhang, H; Xu, JP; Wang, GL	2003	25	Estudo o método de deposição de plasma na prototipagem rápida	O trabalho mostra estudos iniciais e os problemas encontrados
Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays	Murr, L. E.; Gaytan, S. M.; Medina, F.; Lopez, H.; Martinez, E.; Machado, B. I.; Hernandez, D. H.; Martinez, L.; Lopez, M. I.; Wicker, R. B.; Bracke, J.	2010	22	Análise da fabricação de próteses por EBM	Medições das características microestruturais das peças
Development of nickel-titanium graded composition components	Domack, MS; Baughman, JM	2005	22	Análise de três processos de fabricação de AM para produzir ligas de níquel	Os três processos necessitam avanços para que os produtos possam ser usados
Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in selective laser-sintered polyhedral for functionally graded scaffolds	Sudarmadji, N.; Tan, J. Y.; Leong, K. F.; Chua, C. K.; Loh, Y. T.	2011	20	Avaliação de propriedades mecânicas no processo de SLS	Formulações matemáticas a partir dos dados empíricos

Fonte: Elaborada pelo autor

O conteúdo dos quinze artigos mais citados foi analisado e procurou-se entender seus objetivos e as suas principais conclusões resultantes (Tabela 5). Entende-se que, por serem os artigos mais citados por outros autores neste campo de estudos, eles têm cumprido papel importante na ampliação do conhecimento científico sobre a manufatura aditiva (NEELY, 2005).

A análise do conteúdo dos artigos mais citados permitiu a identificação das categorias de assunto mais discutidas no tema de manufatura aditiva e que, portanto, devem ser estudadas em maior detalhe, são elas:

1. Tecnologias de manufatura aditiva;
2. Aplicações da manufatura aditiva na indústria;
3. Materiais para processos de manufatura aditiva;
4. Sustentabilidade na manufatura aditiva.

Essas quatro categorias foram escolhidas para serem estudadas em maior detalhe. A próxima seção apresenta os conceitos fundamentais de manufatura aditiva, enquanto as seções seguintes discutem cada uma dessas quatro categorias de assuntos.

2.2.2. Conceitos fundamentais de manufatura aditiva

A Norma ASTM (2012) define manufatura aditiva como o “processo de construção de objetos tridimensionais sólidos a partir da deposição de camadas, sendo oposta à manufatura subtrativa”. Essas tecnologias ganharam espaço nos últimos anos com o crescimento da fabricação de peças para as indústrias aeronáutica e aeroespacial (MARTINAA et al., 2012, METZGER, MUSCATELLO e MUELLER, 2013; THOMAS et al., 1996), indústria automotiva (SONG et al., 2002), setor biomédico (GIANNATIS e DEDOUSSIS, 2009; SACHLOS e CZERNUSKA, 2003) e outros campos tais como arquitetura e design.

O potencial de melhorias no processo produtivo trazido pelas tecnologias de manufatura aditiva aumenta o interesse pelo estudo de suas aplicações (KRUTH, LEU e

NAKAGAWA, 1998; LEVYA, SCHINDELA e KRUTH, 2003; SREENIVASAN, GOEL e BOURELL, 2010).

Dentre os potenciais impactos positivos trazidos por essas tecnologias de manufatura se destacam: a utilização mais eficiente de matéria prima; a substituição de processos produtivos não eficientes em utilização de energia; a possibilidade de fabricação próxima ao consumidor; e a redução de custos de transporte e os impactos na cadeia logística, no projeto e na produção de peças mais leves e eficientes (LUO et al., 1999; MORROW et al., 2006; BOURELL, LEU e ROSEN, 2009; REEVES, 2008; SERRES, 2011; VAYREA, VIGNATA e VILLENEUVEA, 2012; HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013).

A manufatura aditiva é um processo de fabricação relativamente novo pelo qual observa-se interesse crescente na área de engenharia (LEVY, 2010). Estudos sobre seus processos, aplicações e implicações são ainda incipientes, de modo que existem diversas lacunas a serem desenvolvidas neste campo de pesquisa (GUO e LEU, 2013).

Tais lacunas foram objeto de discussão no *workshop “Roadmap for Additive Manufacturing”*, realizado em março de 2009, que contou com a presença de 65 representantes de universidades, indústrias e governo dos Estados Unidos da América. O objetivo do *workshop* foi desenvolver um *roadmap* para a pesquisa na área de manufatura aditiva para os próximos dez a doze anos. Os resultados foram compilados em um relatório (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009), e as principais recomendações para desenvolvimento de pesquisas nesta área resultantes do *workshop* foram:

- Projeto
 - Criar métodos de projeto para auxiliar projetistas;
 - Melhorar *softwares* de projeto para aproveitar os benefícios da manufatura aditiva para trabalhar com multi-materiais e geometrias complexas.
- Modelagem de processos
 - Desenvolver processos integrados com ferramentas computacionais (e.g. CAD);

- Criar processos com características de *closed-loop*², *feedforward*³ e *feedback*⁴ para garantir melhores respostas aos avanços no projeto ao longo de todas as ferramentas utilizadas.
- Materiais, processos e máquinas
 - Compreender a física da manufatura aditiva;
 - Criar materiais, processos e máquinas que permitam produzir em maior escala;
 - Criar controladores de arquitetura aberta e reconfiguráveis;
 - Explorar estruturas metálicas que podem ser unicamente produzidas com manufatura aditiva;
 - Explicar por que alguns materiais podem ser utilizados na manufatura aditiva e outros não podem;
 - Desenvolver ferramentas para a nanofabricação;
 - Desenvolver e identificar materiais sustentáveis.
- Aplicações biomédicas
 - Criar e modelar métodos de projeto para implantes customizados e aparatos médicos;
 - Desenvolver manufatura aditiva utilizando biomateriais;
- Aplicações na indústria
 - Desenvolver componentes energéticos que utilizem benefícios advindos da manufatura aditiva;
 - Desenvolver aplicações de MRO (*Maintenance, Repair and Overhaul*);
 - Identificar materiais sustentáveis.
- Educação

² *Closed-loop* – Processos fechados nos quais o final do processo gera um novo começo do mesmo processo.

³ *Feedforward* – Transmissão de informações para etapas posteriores do processo.

⁴ *Feedback* – Transmissão de informações para etapas anteriores do processo.

- Desenvolver cursos em universidades no âmbito da graduação e pós-graduação, bem como em escolas técnicas;
 - Desenvolver treinamento para indústrias e certificações dadas por fundações.
- Desenvolvimento da comunidade
 - Reduzir custos com máquinas, materiais e serviços para garantir a rentabilidade da manufatura aditiva;
 - Desenvolver e adotar normas internacionais reconhecidas para certificação de produtos, processos e materiais.
- Governo
 - Estabelecer centros de pesquisa nacionais para fomentar a utilização de manufatura aditiva na indústria.

Uma vez compreendidos os conceitos fundamentais sobre manufatura aditiva e entendidas as limitações de conhecimento que ainda permeiam a área, a seção seguinte apresenta as tecnologias conhecidas e suas principais características.

2.2.3. Tecnologias de manufatura aditiva

Recentemente, verifica-se o lançamento no mercado de diversas tecnologias de manufatura aditiva (GOLDSBERRY, 2009). Diferentes autores classificam essas tecnologias de maneiras distintas (para um exemplo, ver Norma ASTM, 2012). Neste trabalho, será usada a classificação proposta por Guo e Leu (2013), que separa as tecnologias de manufatura aditiva em quatro categorias, de acordo com o tipo de matéria prima utilizada na fabricação: (i) líquido; (ii) filamento/pasta; (iii) pó; e (iv) placa sólida. Foram selecionadas para estudo todas as tecnologias encontradas nos trabalhos avaliados na revisão bibliográfica sistemática. A Tabela 6 apresenta um resumo das principais características das tecnologias estudadas.

Tabela 6- Características das tecnologias de manufatura aditiva

Processo	Materiais (exemplos)	Princípio	Aplicações (exemplos)
<i>Stereolithography (SLA)</i>	Polímeros fotossensíveis	Produção de peças de polímero a partir da solidificação destes com um <i>laser</i>	Protótipos, moldes
<i>Multi-jet Modeling (MJM)</i>	Acrílico fotossensível, plástico e cera	Produção de peças a partir da solidificação do material depositado por <i>flash</i> de uma iluminação ultravioleta (UV)	Protótipos, moldes
<i>Rapid Freezing Prototyping (RFP)</i>	Água	Produção de peças a partir do congelamento das gotículas de água depositadas	Protótipos, moldes
<i>Modelação por extrusão de plástico (FDM)</i>	Termoplásticos	Produção de peças por extrusão do plástico por bico extrusor em uma base	Protótipos, moldes
<i>Robocasting</i>	Pasta cerâmica	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica	Objetos cerâmicos
<i>Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)</i>	Pasta cerâmica e água	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica aquosa	Objetos cerâmicos
<i>Sinterização seletiva a laser (SLS)</i>	Alumide; Carbon Fibre; PA 1101; PA2200/2201; PA 2221; PA2202; PA 2210; PA3200; PAEK; Polystyrene	Produção de peças por meio do processo de sinterização de camadas de pó	Protótipos; peças aeronáuticas; peças motores automotivos; peças especiais para indústria; moldes
<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	Stainless steel 316L e 17-4PH; H13 tool steel; Aluminium Al-Si-12 e Al-Si-10; Titanium CP, Ti-6Al-4V e Ti-4Al-7Nb; Cobalt-chrome ASTM75; Inconel 718 e 625	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um laser	Implantes médicos; Partes aeronáuticas; Partes de motores automotivos; Trocadores calor; Moldes; Peças especiais para a indústria
<i>Electron Beam Melting (EBM)</i>	Cobalt-chrome ASTM F75; Titanium Ti-6Al-4V, Grade 2;	Produção de peças de metal através da fusão de camadas de pó de metal por um arco elétrico	Implantes médicos; peças aeronáuticas; peças automotivas
<i>Laser Metal Deposition (LMD)/ Laser Engineered Net Shaping (LENS)/ Direct Metal Deposition (DMD),</i>	Aluminium Al-Si-10Mg; Cobalt-chrome MP1 e SP2; Maraging Steel; Inconel 718 e 625; Stainless steel 17-4PH e 15-5PH; Titanium Ti-6Al-4V	Produção de peças através da fusão completa de pó de metal	Implantes médicos; Partes aeronáuticas; Partes motores automotivos; Trocadores calor; Moldes; Peças especiais para indústria
<i>Impressão Tridimensional (3DP)</i>	Polímeros, metais, cerâmica e outros pós	Produção de peças pela deposição de pó sobre uma base, que é unido seletivamente pela injeção de aglutinante	Protótipos, moldes, ferramental para indústria
<i>Manufatura de objeto em lâminas (LOM)</i>	Papel, plástico, metal	Produção de peças pela união de uma camada de material laminado a uma série de outras lâminas conformadas	Protótipos e moldes

Fonte: Elaborada pelo autor

É importante ressaltar que podem existir outras tecnologias que não foram mencionadas nas publicações avaliadas e, portanto, não serão consideradas neste trabalho. Na sequência é apresentada uma breve descrição das tecnologias estudadas.

Líquido

Stereolithography (SLA)

A SLA constrói peças tridimensionais a partir de polímeros líquidos sensíveis à luz, que se solidificam quando expostos à radiação ultravioleta (GORNÍ, 2001). Atingida pelo laser ultravioleta, a resina solidifica-se, camada a camada, até que todas as camadas da peça sejam conformadas, momento em que a peça sólida é removida, lavada e introduzida em um forno de radiação para a cura completa. A aplicação da tecnologia é limitada a polímeros fotossensíveis (KRUTH, LEU e NAKAGAWA, 1998). Além da limitação de material, os principais problemas na utilização dessa tecnologia são: a necessidade de preenchimento de regiões não conectadas à peça, causando desperdício de material, o pós-processamento para a remoção desses preenchimentos, e a necessidade de pós-cura para melhorar o acabamento das peças (VOLPATO, 2007).

Multi-jet Modeling (MJM)

A tecnologia de MJM utiliza um princípio similar a impressoras de tinta. A peça é construída a partir da deposição de camadas de pó, seguido pelo *flash* de uma iluminação ultravioleta (UV) para solidificar a camada (CHUA, LEONG e LIM, 2010). Quando uma camada é concluída, a base que segura a peça é rebaixada e uma nova camada é construída. Este processo se repete até que a peça esteja completa. Dentre as vantagens do processo MJM estão o baixo custo, o baixo tempo de fabricação e a facilidade de operação (GUO e LEU, 2013).

Rapid Freezing Prototyping (RFP)

A tecnologia RFP produz peças camada a camada a partir da deposição de gotículas de água em um ambiente com temperatura abaixo do ponto de congelamento da água (LEU, ZHANG e SUI, 2000; ZHANG et al., 1999;). As gotículas depositadas congelam ao entrar em contato com a camada anterior, já congelada. Este processo é repetido até que a peça esteja pronta (LEU, ZHANG e SUI, 2000; ZHANG et al., 1999).

Um dos benefícios desta tecnologia está na questão ambiental, pois o processo utiliza água como matéria prima (LEU, 2000). Aplicações industriais avaliadas incluem utilização desse processo na construção de moldes de gelo para fabricação de peças finais (LIU, SUI e LEU, 2002).

Filamento/Pasta

Modelação por extrusão de plástico (FDM)

O FDM constrói peças por extrusão de polímeros, como ABS e Poliamida, em um sistema que conta com, pelo menos, um cabeçote que se movimenta no plano XY e uma plataforma que se movimenta verticalmente em Z (ARTIS, 2012). O baixo custo do material e a facilidade de operação das máquinas tornaram essa tecnologia responsável pela popularização da prototipagem rápida por adição (KRUTH, LEU e NAKAGAWA, 1998). No entanto, estas tecnologias apresentam baixa precisão e baixa velocidade de construção das peças (VOLPATO, 2007).

Robocasting

Esta tecnologia de manufatura aditiva constrói peças com a extrusão de pasta cerâmica, camada a camada, até que a peça esteja pronta (ROBOCASTING ENTERPRISES, 2014; RUSSIAS et al., 2007). A cada deposição de pasta é necessário esperar de dez a quinze segundos para que a camada seque e a próxima camada possa ser construída (ROBOCASTING ENTERPRISES, 2014). Para que as peças produzidas apresentem boa resistência é essencial que se controle as propriedades da pasta cerâmica de acordo com as características desejadas. A viscosidade e a consistência da pasta devem ser escolhidas de acordo com a destinação desejada para a peça construída (RUSSIAS et al., 2007).

Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)

A tecnologia de FEF utiliza princípios similares ao *Robocasting*, pois constrói peças a partir da deposição de camadas de pasta (MASON et al., 2009). No entanto, nesse processo, a pasta utilizada tem base aquosa, e ela é solidificada por congelamento, uma vez que a máquina cria um ambiente com temperatura abaixo do ponto de congelamento da água (HUANG et al., 2009). Dentre os benefícios deste processo estão o baixo custo e a capacidade de utilizar múltiplos materiais na construção da peça (LIU e LEU, 2009). No entanto, não são conhecidas aplicações comerciais de peças fabricadas por FEF (LIU e LEU, 2009b).

Pó

Sinterização seletiva a laser (SLS)

A tecnologia SLS utiliza um raio *laser* para fundir e solidificar, camada a camada, materiais pulverulentos, como elastômeros e metais (KRUTH et al., 2007). No processo, o *laser* varre a camada do material em pó a ser moldado (MARTINS, 2005). A SLS expande as restrições de materiais usualmente presentes na utilização da prototipagem, podendo ser utilizada para fabricar peças metálicas diretamente, sem necessidade de usinagem posterior (KRUTH et al., 2005, KRUTH et al., 2005b). Não foram encontradas publicações que atestem que as peças produzidas por este processo possam completamente substituir peças fabricadas por manufatura tradicional.

Selective Laser Melting (SLM)

Da mesma forma com o SLS, a tecnologia de SLM utiliza *laser* de alta intensidade para fundir pó de metal e criar uma peça sólida (KRUTH et al., 2004). A principal diferença entre estes dois processos é que o SLS apenas funde a camada externa das partículas de metal, enquanto o SLM funde a partícula completa, criando uma estrutura mais sólida (ABE et al., 2001). A cada camada a base de construção da peça é rebaixada e uma nova camada de pó de metal é depositada sobre toda a superfície (LU et al.,

2000). Como resultado, as propriedades mecânicas das peças são mais resistentes (GUO e LEU, 2013). O processo de SLM é difícil de controlar devido à alta utilização de energia, o que pode levar a produção de peças deformadas algumas vezes (KRUTH et al., 2004). Alguns dos materiais utilizados na fabricação por SLM são aço inox, cromo, ligas inconel e titânio (OSAKADA e SHIOMI, 2006).

Electron Beam Melting (EBM)

A tecnologia EBM é recente e utiliza um raio de elétrons para fundir pó de metal e criar peças sólidas (CORMIER, HARRYSSON e WEST, 2004). Em uma câmara de vácuo, raios de elétrons são direcionados ao pó de metal, que funde, criando uma camada sólida (HEINL et al., 2007; RANNAR, GLAD e GUSTAFSON, 2007). Então, mais uma camada de metal é depositada e o processo é repetido, até que a peça fique pronta (HEINL et al., 2007; RANNAR, GLAD e GUSTAFSON, 2007). As peças fabricadas são sólidas, densas, não necessitam de pós-processamento e apresentam alta resistência (CORMIER et al., 2004; HARRYSSON et al., 2008). No entanto, o acabamento das peças não é tão bom quanto o das peças produzidas por SLM (HEINL et al., 2008).

Laser Metal Deposition (LMD)

A tecnologia LMD também é conhecido como *Laser Engineered Net Shaping* (LENS) e *Direct Metal Deposition* (DMD), dependendo do fabricante. Neste processo, o pó de metal é fundido completamente, assim como ocorre no processo de SLM (BALLA et al., 2009; GASSER et al., 2010). No entanto, no LMD o pó de metal é adicionado à peça por um bico extrusor de maneira localizada, diferente do SLM (LEWIS e SCHLIENGER, 2000). A deposição do metal por um bico extrusor permite que sejam construídas paredes mais finas de metal e também permite que sejam construídas partes de peças em cima de peças já existentes, abrindo possibilidades para que o processo seja utilizado na reparação de peças danificadas (ZHANG, LIU e SHANG, 2007).

Impressão Tridimensional (3DP)

A tecnologia 3DP constrói peças pela deposição de pó sobre uma base, que é unido seletivamente pela injeção de aglutinante (DIMITROV, SCHREVE e BEER, 2006). O processo é então repetido até que toda a peça seja construída. Como vantagem, pode ser aplicado com uma maior gama de materiais (LEE, DUNN e WU, 2005) e tem baixo tempo de produção de peças e baixo custo (HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013). Como desvantagem desse processo, tem-se a baixa qualidade de acabamento e a baixa resistência das peças conformadas, o que reduz em muito suas possíveis aplicações (HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013).

Placa sólida

Manufatura de objeto em lâminas (LOM)

A tecnologia LOM produz peças a partir de papel colado, metal, plástico e outros compostos na forma de finas lâminas (PARK, TARI e HAHN, 2000; PRECHTL, OTTO e GEIGER, 2005). As máquinas que utilizam esta tecnologia fazem a união de uma camada de material laminado a uma série de outras lâminas conformadas. Então, um feixe de laser contorna e corta a lâmina na forma explicitada pelo modelo CAD. A união das camadas pode ser feita através de colagem ou de fusão, enquanto o material em excesso, recortado, é removido por sucção (PARK, TARI e HAHN, 2000; PRECHTL, OTTO e GEIGER, 2005). Apesar de ter baixo custo, o processo de LOM produz peças com limitações de resistência (LIAO, LI e CHIU, 2006).

2.2.4. Aplicações na indústria

As tecnologias de manufatura aditiva apresentam um enorme potencial de aplicação em um grande número de indústrias (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009): aeronáutica e aeroespacial, automotiva, médica, energia e bens de consumo são alguns exemplos. As aplicações da manufatura aditiva são normalmente justificadas por possibilitarem benefícios como na redução do peso das peças, menor custo de material,

maior velocidade de produção, maior viabilidade para produção em baixos lotes e melhor capacidade de produzir geometrias complexas (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009; GUO e LEU, 2013; SREENIVASAN, GOEL e BOURELL, 2010;).

No entanto, em geral, as empresas ainda não enxergam a manufatura aditiva como uma forma de manufatura viável para ser adotada em seus processos produtivos (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009). No relatório compilado por Bourell, Leu e Rosen (2009) foram propostas algumas recomendações para aumentar as aplicações de manufatura aditiva na indústria, são elas:

1. Desenvolver um centro de testes padronizados para tecnologias de manufatura aditiva, de forma a criar procedimentos padrão de produção;
2. Criar *softwares* de análise de elementos finitos para as tecnologias de manufatura aditiva;
3. Desenvolver materiais com capacidade de suportar altas temperaturas com baixa condutividade térmica para aplicações em aeronaves;
4. Identificar e desenvolver novas aplicações da manufatura aditiva;
5. Criar modelos de comparação de custo da manufatura tradicional e manufatura aditiva;
6. Criar um banco de dados de materiais com suas características e resistências mecânicas;
7. Desenvolver modelos para a utilização da manufatura aditiva em indústrias específicas.

A presente seção tem o objetivo de apresentar algumas das aplicações conhecidas para a manufatura aditiva. Optou-se por separar as aplicações por setor da indústria para facilitar a leitura. Os setores industriais selecionados para serem estudados foram o aeronáutico e aeroespacial, automotiva, e de energia, por serem mais frequentemente citados na literatura.

Aeronáutica e aeroespacial

Uma das principais preocupações das indústrias aeronáutica e aeroespacial é com o peso de suas peças, uma vez que cada grama de massa representa um custo alto recorrente de consumo adicional de combustível ao longo da vida da aeronave (LIPSON e MALONE, 2002). Outras preocupações características dessas indústrias são a complexidade da geometria de suas peças (STRANO et al., 2013) e a utilização de materiais avançados (VAYREA, VIGNATA e VILLENEUVA, 2012), como cerâmicas de alta temperatura, superligas de titânio e de níquel e aços especiais. Além disso, em geral as peças utilizadas devem ser produzidas em baixos lotes (GUO e LEU, 2013). Essas necessidades têm o potencial de serem bem atendidas com tecnologias de manufatura aditiva e, portanto, isso explica por que as empresas de tais setores estão entre as mais interessadas em utilizar essas tecnologias (MARTINAA et al., 2012; METZGER, MUSCATELLO e MUELLER, 2013).

Os exemplos de aplicações da manufatura aditiva nessas duas indústrias contemplam a produção de peças metálicas fabricadas diretamente, peças fabricadas utilizando moldes, peças plásticas e de polímeros e a reparação de peças. Alguns casos apresentados pela fabricante EOS (EOS, 2014) mostram aplicações de SLS para produzir peças complexas de turbinas fabricadas com uma superliga de cobalto e cromo (Figura 13 (a)) e com as superligas de níquel Inconel 625 e Inconel 718 (Figura 13 (b)).

Figura 13 - Peças metálicas para aeronaves fabricadas pela EOS

Fonte: EOS (2014)

A fabricante ARCAM (ARCAM, 2014) apresenta peças produzidas pelo processo EBM para aplicação em diversos componentes de aeronaves comerciais e militares. Como exemplo são mostradas paletas de turbina feitas de liga de titânio com alumínio (Figura 14 - Peças de turbina produzida por ARCAM

(a)) e envoltórios de turbinas a gás fabricados com Ti6Al4V (Figura 14 (b)).

Figura 14 - Peças de turbina produzida por ARCAM

Fonte: Arcam (2014)

Dentre as peças produzidas com processos que utilizam moldes, destacam-se as apresentadas pelas empresas ProMetal (Figura 15 (a)) e Voxeljet (Figura 15 (b)), fabricadas utilizando moldes cerâmicos obtidos por meio de manufatura aditiva para posterior produção de peças por métodos convencionais para aplicação em aeronaves (PROMETAL, 2014; VOXELJET, 2014). As peças foram produzidas com menor *lead time*, menor utilização de matéria-prima e igual resistência mecânica (PROMETAL, 2014; VOXELJET, 2014).

Figura 15 - Peças fabricadas utilizando moldes cerâmicos

(a)

(b)

Fonte: (a) ProMetral (2014); (b) Voxeljet (2014)

Os exemplos de peças plásticas e de polímeros produzidos utilizando manufatura aditiva e aplicados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial são diversos. Dentre eles, se destacam as peças produzidas para a NASA (NASA, 2014) para a montagem de um protótipo de robô (Figura 16 (a)), com economia do tempo de produção, que seria de 32 semanas por meio de processos tradicionais, mas que requer 2 semanas por meio da manufatura aditiva, e as peças de polímero para o motor de um satélite (Figura 16 (b)), que demorariam 40 semanas por meio de processos tradicionais e demoraram apenas uma semana por meio da manufatura aditiva.

Figura 16 - Peças plásticas e de polímeros fabricadas para a NASA

(a)

(b)

Fonte: NASA (2014)

Por fim, há ainda as aplicações da manufatura aditiva na reparação de peças das indústrias aeronáuticas e aeroespaciais. A empresa Optomec (OPTOMECH, 2014) apresenta em um de seus casos o reparo de um rotor dentado de uma turbina a gás (Figura 17 (a)), e a empresa EOS (EOS, 2014) apresenta o caso do reparo de um componente de turbina a gás (Figura 17 (b)).

Figura 17 - Peças consertadas utilizando manufatura aditiva

(a)

(b)

Fonte: (a) Optomec (2014); (b) EOS (2014)

Vale ressaltar que estas aplicações são apenas alguns exemplos de casos apresentados pelos principais fabricantes e prestadores de serviço de tecnologias de manufatura aditiva, não exaurindo todas as possibilidades de aplicações e de materiais utilizáveis. Na sequência, são apresentadas as principais aplicações para a indústria automotiva.

Automotiva

Na indústria automotiva podem ser destacadas duas necessidades distintas, que oferecem grande potencial de aplicação da manufatura aditiva (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009): produção de peças para carros e motos esportivas (e.g. Fórmula 1, MotoGP); e a produção de protótipos no desenvolvimento de produtos. A primeira aplicação é justificada pelos mesmos motivos que justificam o interesse da indústria

aeronáutica pela manufatura aditiva: o peso de suas peças, uma vez que cada aumento de massa representa um aumento no peso do veículo (LIPSON e MALONE, 2002); a complexidade da geometria das peças (STRANO et al., 2013); a utilização de materiais avançados (VAYREA, VIGNATA e VILLENEUVA, 2012); e a produção em baixos lotes (GUO e LEU, 2013). Já a produção de protótipos tem o potencial de se beneficiar da manufatura aditiva pois esta permite encurtar o prazo de produção e assim agilizar o tempo de desenvolvimento do produto (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009).

As empresas ProMetal (PROMETAL, 2014) e Voxeljet (VOXELJET, 2014) apresentam diversos casos da indústria automotiva nos quais a manufatura aditiva foi utilizada para fabricar moldes cerâmicos e a peça final desejada foi fundida utilizando o molde fabricado por meio da manufatura aditiva. A Figura 18 (a) apresenta um bloco de motor automotivo produzido a partir de um molde (PROMETAL, 2014), com uma redução de 4 para 3 semanas no tempo de fabricação, e a Figura 18 (b) apresenta um *manifold* de geometria complexa também produzido a partir de um molde (VOXELJET, 2014), com redução do peso da peça devido a otimização de projeto que somente foi possível com a manufatura aditiva.

Figura 18 - Peças produzidas a partir de moldes para a indústria automotiva

Fonte: (a) ProMetal (2014); (b) Voxeljet (2014)

Dentre os exemplos de peças produzidas para a indústria automotiva de maneira direta, ou seja, sem a utilização de moldes, se destacam as peças produzidas para

veículos esportivos especiais, como por exemplo as peças de titânio produzidas pela CRP para carros de Fórmula 1 (CRP, 2014) e as peças de motor da liga Ti6Al4V produzidas pela ARCAM para outros carros de corrida (ARCAM, 2014).

Energia

As empresas integrantes da indústria de energia caracterizam-se por algumas peculiaridades do negócio que operam. De maneira geral, empresas integrantes desta indústria têm necessidades por peças de alto valor agregado. Além disso, esta indústria tem necessidades similares às da indústria aeronáutica: complexidade da geometria das peças (STRANO et al., 2013); necessidade utilização de materiais avançados (VAYREA, VIGNATA e VILLENEUVA, 2012); e a produção em baixos lotes (GUO e LEU, 2013). Acrescenta-se ainda a necessidade de baixo *lead time* na reposição das peças e o alto custo de estoque delas (REEVES, 2008). O baixo *lead time* se justifica pelo alto custo de parada de uma máquina por conta da falta de uma peça, e o alto custo de estoque se deve ao alto valor agregado das peças (HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013; SERRES, 2011).

Grande parte das aplicações já desenvolvidas na indústria de energia são peças de turbinas, similares as apresentadas anteriormente nas aplicações das indústrias aeronáutica e aeroespacial. Um exemplo de aplicação diferente destes é o caso apresentado pela EOS (EOS, 2014), no qual a manufatura aditiva é utilizada para fabricar um trocador de calor com *design* complexo Figura 19.

Figura 19 - Trocador de calor produzido pela EOS

Fonte: EOS (2014)

Os casos apresentados nesta seção contemplam a grande maioria das aplicações comerciais conhecidas para a indústria de transformação⁵ e ajudam a embasar as principais justificativas para a utilização da manufatura aditiva nas indústrias estudadas. Na sequência são discutidos os materiais conhecidos para utilização com as tecnologias aditivas de manufatura.

2.2.5. Materiais

As primeiras máquinas que utilizavam manufatura aditiva foram desenvolvidas para trabalhar com plástico, e visavam, principalmente, a construção de protótipos (KRUTH, LEU e NAKAGAWA, 1998). A evolução dessas tecnologias teve como uma de suas consequências a ampliação dos materiais com que as máquinas de manufatura aditiva podem trabalhar. Dessa forma, hoje são conhecidos diversos materiais passíveis de serem utilizados pelas máquinas de manufatura aditiva, e ainda há muito espaço para o desenvolvimento/descoberta de novos materiais (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009). Na sequência é apresentada uma breve descrição dos principais materiais aplicados em manufatura aditiva.

⁵ Existem outras aplicações comerciais na área da saúde que não estão no escopo deste trabalho

Polímeros

Polímeros são estruturas compostas de moléculas repetidas, podendo ser naturais ou sintéticos (CAULFIELD, McHUGH e LOHFELD, 2007). Nas tecnologias de manufatura aditiva, polímeros como resinas, poliamida, elastômeros, plástico ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) e cera podem ser usados com as tecnologias SLA, SLS, FDM e 3DP (KRUTH et al., 2007).

A poliamida (Nylon) é o mais utilizado na tecnologia SLS, pois permite produzir peças com maior solidez (KRUTH et al., 2007). Os plásticos ABS são muito utilizados nos processos de FDM, e sua destinação é usualmente para a produção de protótipos e outras aplicações de projeto e arquitetura (AHN et al., 2002). Polímeros fotocuráveis, como ceras e elastômeros, são processados com as tecnologias SLA e 3DP, e são normalmente utilizados para protótipos ou para a produção de moldes (LAM et al., 2002). A utilização de polímeros biocompatíveis têm sido estudada com as tecnologias de SLS (SCHMIDT, POLE e RECHTENWALD, 2007), FDM (RAMANATH, 2008) e 3DP (LAM et al., 2002).

Metais

Existem três tipos de processos que utilizam manufatura aditiva para produzir peças metálicas: (i) indiretos, nos quais um material é utilizado para unir as partes metálicas da peça; (ii) diretos, nos quais o metal é fundido por completo; (iii) ferramental rápido, nos quais a manufatura aditiva produz o molde e a peça metálica é produzida por fundição (CHEA et al., 2005; GUO e LEU, 2013).

Os processos indiretos podem ser aplicados para manufaturar peças tanto pela fusão de um metal auxiliar que garante a união das partes como pela fusão parcial do metal utilizado como matéria-prima, nos processos denominados sinterizantes (KRUTH et al., 2007). O pó de metal é a matéria-prima utilizada, e é necessário que haja um pós-processamento quando se utilizam processos indiretos para construir peças metálicas (ALLEN e SACHS, 2000; KRUTH et al., 2007). Dentre os materiais utilizados nestes processos estão o Aço Inox GP1, PH1 e 17-4, ligas de cobalto cromo MP1, titânio

Ti6Al4V, ligas de Inconel 718, aço MS1 e ligas de alumínio AlSi20Mg (GUO e LEU, 2013). A resistência das peças assim produzidas se limita a esforços de compressão na direção perpendicular às camadas construídas (GUO e LEU, 2013).

Dentre os processos diretos estão o SLM, EBM e LMD/LENS/DMD. Tais processos realizam a fusão completa do metal para produzir a peça (KRUTH et al., 2007; KRUTH et al., 2005). No SLM e no EBM, uma camada de pó de metal é espalhada por toda a superfície, a cada camada de peça construída, enquanto no LMD/LENS/DMD o pó de metal é alimentado de maneira contínua (ARCAM, 2014; MTT, 2009; MUDGE e WALD, 2007). Dentre os materiais que podem ser utilizados nos processos diretos estão aço H13, 17-4 PH, PH 13-8 Mo, 316L e 420, alumínio 4047, titânio TiCP, Ti-6-4, Ti-6-2-4-2 e Ti6-2-4-6, ligas de Inconel 625, Inconel 617 e de Cu-Ni (KRUTH et al., 2005). Esses processos produzem peças com densidade e propriedades mecânicas similares às produzidas por processos de manufatura convencionais (GUO e LEU, 2013).

Por fim, os processos de ferramentais rápidos utilizam a manufatura aditiva para fabricar o molde com que a peça será produzida, podendo este ser de cerâmica ou de polímero (CHEAH et al., 2005). Os materiais cerâmicos e os polímeros com os quais são feitos os moldes possuem alta resistência a reagentes químicos e a altas temperaturas. No entanto, tais materiais são frágeis e muito duros, o que dificulta a sua utilização nos processos de manufatura tradicional, especialmente para produzir moldes de geometrias complexas (RANGARAJAN et al., 2000). A manufatura aditiva tem se provado uma alternativa de processo capaz de produzir tais ferramentais mais rapidamente e com menor custo (RUDRARAJU, DEPTOWICZ e DAS, 2011; YUAN et al., 2009).

Cerâmica

Cerâmicas são materiais sólidos, inorgânicos e não metálicos (GUO e LEU). Alguns exemplos incluem a alumina, a sílica e a zircônia (ALLAHVERDI et al., 2001). Materiais cerâmicos possuem elevada resistência química a altas temperaturas, e são aplicados de diversas maneiras na indústria. Por outro lado, estes materiais são frágeis e muito duros, o que dificulta o trabalho com as tecnologias de manufatura tradicionais

(RANGARAJAN et al., 2000). O desenvolvimento de manufatura aditiva traz inovações ao processo destes materiais, tornando mais rápido e barato fabricar peças de cerâmica, mesmo aqueles de geometria complexa (RUDRARAJU, DEPTOWICZ e DAS, 2011; YUAN et al., 2009).

Os processos FDM, SLS, 3DP e SLA são capazes de processar cerâmicas industriais (RANGARAJAN et al., 2000), como Si_3N_4 , Al_2O_3 , SiO_2 e ZrB_2 , cerâmicas avançadas (Allahverdi et al., 2001), como o PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) e cerâmicas biocompatíveis (GOODRIDGE, DALGARNO e WOOD, 2006), como a hidroxiapatita. Vale ressaltar que as peças que utilizam tais materiais são produzidas por um processo indireto, no qual a matéria prima utilizada contém agentes aglutinantes para garantir a solidez da peça (DUFAUD e CORBEL, 2002). A fabricação de peças por processos diretos, ou seja, que realizam a fusão do pó cerâmico puro, ainda são aplicações laboratoriais, sendo que peças de zircônia já foram produzidas experimentalmente com o processo de SLM (WILKES, 2013) e peças de alumina já foram fabricadas experimentalmente pelo processo LENS (BALLA, BOSE E BANDYOPADHYAY, 2008).

Compostos

Compostos são materiais desenvolvidos ou encontrados na natureza que tem por característica serem constituídos por dois tipos diferentes de materiais com uma significativa diferença física ou química entre eles, de forma que esta diferença possa ser vista de maneira macroscópica ou microscópica (STEVINSON, BOURELL e BEAMAN, 2008). Os compostos que geralmente são utilizados na manufatura aditiva são matrizes de polímeros, cerâmica, metais e fibras (KUMAR e KRUTH, 2010). Inúmeros tipos de compostos podem ser criados e utilizados nos processos conhecidos de manufatura aditiva (para exemplos ver Guo e Leu (2013)).

Uma vez estudados os materiais conhecidos para utilização na manufatura aditiva, a seção a seguir discute os principais impactos dessas tecnologias de manufatura na sustentabilidade dos processos produtivos.

2.2.6. Impactos na sustentabilidade

Esta seção apresenta as principais conclusões das pesquisas relacionadas aos impactos da manufatura aditiva na sustentabilidade. Um melhor detalhamento do conceitos aqui discutidos pode ser visto em Mancanares, Zancul e Miguel (2015). Como foi apresentado nas seções anteriores, a manufatura aditiva é uma tecnologia de fabricação relativamente nova e com interesse crescente na área de engenharia (LEVY, 2010). Dessa forma, este tema ainda carece de pesquisas em diversas áreas mais específicas, de modo que ainda existem diversas lacunas a serem supridas no campo da pesquisa (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009). Uma dessas áreas com oportunidade de aprofundamento das pesquisas é a de sustentabilidade aplicada à manufatura aditiva, que apesar de já explorada por alguns estudos, ainda apresenta lacunas amplas e variadas (SREENIVASAN, GOEL e BOURELL, 2010).

Existem potenciais benefícios da manufatura aditiva para a sustentabilidade que podem ser claramente identificados (BOURELL, LEU e ROSEN, 2009):

- Utilização mais eficiente de matéria prima, decorrente do fato de que a manufatura aditiva utiliza pó/líquido para construir uma peça, ao invés de utilizar um bloco grande de matéria prima, como na manufatura subtrativa;
- Substituição de processos produtivos não eficientes em utilização de energia como fundição e usinagem com tornos CNC;
- Processos que não precisam de fluidos auxiliares;
- Possibilidade de fabricação em qualquer lugar geográfico, sem a necessidade de mão de obra ou máquinas especiais, e permitindo a fabricação próxima ao consumidor, reduzindo custos de transporte e impactos negativos da cadeia logística;
- Peças mais leves, aumentando a eficiência de combustível da indústria aeronáutica;
- Possibilidade de fabricação de componentes de geometrias complexas que podem ser mais eficientes que os tradicionais.

A manufatura aditiva possibilita fabricar peças com peso reduzido, uma vez que permite que certos componentes sejam fabricados com baixo preenchimento de material (LIPSON e MALONE, 2002), ou então permitindo que sejam utilizadas geometrias impossíveis de serem conseguidas com a manufatura tradicional (STRANO et al., 2013; VAYREA, VIGNATA e VILLENEUVA, 2012). A utilização destas tecnologias de fabricação permite reduzir o peso dos componentes aeronáuticos e aeroespaciais, reduzindo o custo de enviar aeronaves ao espaço e o consumo de combustível (MARTINAA et al., 2012; METZGER, MUSCATELLO e MUELLER, 2013).

No âmbito social, alguns estudos apontam que com a manufatura aditiva torna-se possível fornecer soluções para o setor de saúde que antes não eram possíveis, como a produção de próteses e implantes feitos sob medida (HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013; OLIVEIRA, 2008; SINGARE et al., 2004). Além disso, com estas tecnologias é possível reduzir o tempo de desenvolvimento das próteses e implantes (HE, YE e WANG, 2006). Diversos trabalhos apresentam aplicações da manufatura aditiva na fabricação destes objetos, como próteses para articulações (HE, YE e WANG, 2006), cotovelo (TRUSCOTT et al., 2007), quadril (POPOV e ONUH, 2009; RAHMATI, ABBASZADEH e RAFAHMAND, 2012) e para a área odontológica (LIU, LEU e SCHMITT, 2006).

Na vertente ambiental, estudos avaliaram que a manufatura aditiva pode causar menos impactos ambientais que os processos tradicionais (HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013; ZHAO et al., 2010). Por utilizar a quantidade exata de material necessária para a produção de peças e por não requerer fluidos auxiliares, são reduzidos os resíduos gerados no processo de fabricação (HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013; LUO et al., 1999). Alguns estudos de caso avaliaram os impactos ambientais da fabricação de peças por processos tradicionais e compararam com os impactos da fabricação utilizando tecnologias de manufatura aditiva, e concluíram que as tecnologias aditivas geram até 70% menos impacto (MAZUMDER, SCHIFFERER e CHOI, 1999; MORROW et al., 2006; XIONG e SCHOENUNG, 2010; SERRES, 2011). Não deve ser entendido que tais resultados podem ser generalizados. O entendimento é o de que a manufatura aditiva

tem potencial de gerar menos impactos no processo produtivo e, portanto, motiva o desenvolvimento de mais investigações.

Estudos da cadeia de distribuição e da cadeia de suprimentos da manufatura aditiva ainda apontam que essas tecnologias podem apresentar a vantagem de produção mais próxima do consumidor (REEVES, 2008). Algumas pesquisas comprovam que esta característica é vantajosa especialmente para mercados de peças de reposição de alto valor agregado cujo custo de estoque é bastante elevado – a obtenção de tais peças pode ser otimizada com a utilização da manufatura aditiva para sua fabricação (HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013; SERRES, 2011).

A produção mais próxima do consumidor é facilitada quando se utiliza a manufatura aditiva pois uma só máquina, com um tempo de *setup* baixo, pode produzir peças completamente distintas, justificando a adoção da produção em baixa escala descentralizada das peças, ou seja, mais próxima à demanda (HUANG, LIU e MOKASDAR, 2013). Dessa forma, são reduzidos os custos de transporte e também os impactos ambientais negativos dessa etapa do processo, além de permitir a operação com estoques reduzidos (SERRES, 2011).

Adicionalmente, nota-se que as tecnologias de manufatura aditiva podem ser usadas na reparação de peças, permitindo a reutilização de peças que seriam normalmente descartadas (ILYAS, 2013).

Outra área explorada nos estudos da sustentabilidade na manufatura aditiva é a remanufatura. Estudos de caso comprovam a capacidade da manufatura aditiva de reparar peças, e concluíram que, dentre outros, estes processos apresentam redução dos impactos ambientais quando comparados aos processos tradicionais (MORROW et al., 2006). Além disso, a remanufatura é justificada como forma de atender necessidades de responsabilidade social, atender normas e legislações, e reduzir o custo da reposição de peças (SEITZ, 2006; SELIGER, KERNBAUM e ZETTL, 2006). Entretanto, é apontado na literatura que devem ser adotadas diferentes estratégias na remanufatura, de acordo com cada produto, devido as diferenças nos processos de reparo e na (re)obtenção dos

produtos, o que dificulta a adoção desta prática (O'STLIN, SUNDIN e BJORKMAN, 2009).

3. Método de pesquisa

Este capítulo apresenta o método utilizado nesta pesquisa e tem o objetivo de apresentar ao leitor a forma como foi planejado e conduzido o desenvolvimento do trabalho. Tal apresentação é feita em duas seções: 3.1. Caracterização da pesquisa; e 3.2. Etapas da pesquisa. A caracterização da pesquisa apresenta a abordagem utilizada neste trabalho considerando as diferentes abordagens de pesquisa existentes, enquanto a seção de etapas da pesquisa descreve em detalhe como foi realizada cada etapa deste trabalho.

3.1. Caracterização da pesquisa

A escolha do método de pesquisa é uma decisão importante a ser tomada no início do trabalho, e interfere inclusive nos pontos técnicos da pesquisa (KARLSSON, 2009).

Este trabalho tem natureza exploratória. A natureza exploratória tem relação com o objetivo e ao grau de cristalização do problema (MIGUEL, 2008). A pesquisa visa explorar um novo fenômeno, que é a sistematização da avaliação para adoção da manufatura aditiva em empresas da indústria de alto valor agregado. Ainda, a caracterização da pesquisa como exploratória não prejudica a escolha do método de pesquisa, sendo que tais classificações não são excludentes (MIGUEL, 2008).

Na escolha do método de pesquisa é necessário definir se esta será quantitativa ou qualitativa. As técnicas quantitativas utilizam ferramentas matemáticas e estatísticas para avaliar dados numéricos. Por meio de medições e procedimentos oficiais, podem ser realizados testes de causalidade entre variáveis. Neste tipo de pesquisa, variáveis observáveis, tangíveis e claramente definíveis, são examinadas e testadas (KARLSSON, 2009). Por outro lado, as pesquisas qualitativas se baseiam na definição, coleta e análise de dados por meio da percepção dos pesquisadores dos fenômenos estudados e da interpretação destes fenômenos de maneira menos quantificável que as interpretações feitas em abordagens quantitativas (KARLSSON, 2009). Neste trabalho é utilizada a abordagem qualitativa, na qual são selecionados modelos de processo que servem de

base para a construção de um modelo, de maneira que a análise e percepção dos pesquisadores quanto aos modelos estudados têm grande peso no processo de construção.

Em termos de procedimentos de pesquisa específicos, foram utilizados principalmente dois procedimentos principais na condução da pesquisa: (i) revisão bibliográfica sistemática; e (ii) avaliação com especialistas da área. Tais procedimentos permitiram atender aos objetivos de pesquisa propostos. A Figura 20 apresenta a relação de cada objetivo específico do trabalho com o procedimento utilizado para cumprir tal objetivo.

Figura 20 - Relação entre objetivos específicos e procedimentos adotados

Fonte: Elaborada pelo autor

Uma vez apresentados os procedimentos realizados para atender cada objetivo específico do trabalho, são apresentadas, na sequência, as etapas da pesquisa.

3.2. Etapas da pesquisa

Esta seção apresenta cada etapa da pesquisa desenvolvida. A Figura 21 apresenta a lógica de desenvolvimento da pesquisa e as quatro etapas deste trabalho.

Fonte: Elaborada pelo autor

Na sequência são apresentadas em maior detalhe cada uma das quatro etapas do trabalho e são discutidos os objetivos, o desenvolvimento e os resultados de cada uma dessas etapas.

3.2.1. Revisão bibliográfica

A etapa de revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar o referencial teórico para o desenvolvimento do trabalho. Os resultados dessa etapa são apresentados no capítulo 2.

Primeiro, são pesquisados e avaliados, por meio de uma revisão sistemática da literatura, os principais trabalhos referentes ao tema de modelos de processo de adoção de AMTs (*Advanced Manufacturing Technologies*). São discutidos os principais conceitos relacionados ao tema, apresentadas as justificativas mais relevantes para a adoção de tecnologias avançadas de manufatura e avaliados os principais modelos de processo de adoção de tais tecnologias. Os resultados são apresentados na seção 2.1 Adoção de AMT (*Advanced Manufacturing Technologies*).

Em seguida, são apresentados os resultados da revisão sistemática da literatura sobre manufatura aditiva. São discutidos os conceitos mais relevantes para o entendimento do tema, apresentadas as tecnologias de manufatura aditiva conhecidas, suas aplicações industriais, os materiais com os quais trabalham e os impactos dessas tecnologias na sustentabilidade. Os resultados são apresentados na seção 2.2 Manufatura aditiva: estado da arte.

A revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2 deu suporte a outros trabalhos relacionados com este. O trabalho Mancanares, Zancul e Cauchick (2013) utiliza os conceitos de manufatura aditiva apresentados no capítulo 2 deste trabalho para apoiar a implantação de um ambiente de desenvolvimento de produtos para uso em cursos de graduação em engenharia de produção. Em Mancanares et. al (2013) é proposto um método de seleção de prototipagem rápida que parte do levantamento de dados de tecnologias e máquinas apresentado no capítulo 2. A revisão bibliográfica sobre os impactos da manufatura aditiva na sustentabilidade foi apresentada em maior detalhe em Mancanares, Zancul e Cauchick (2015). Mancanares et al. (2015) apresenta um processo de seleção de máquinas baseado em critérios de peças com a aplicação do processo de seleção em três diferentes peças. Tal processo constitui um dos passos do modelo apresentado neste trabalho. Por fim, Zancul et. al (2016) apresenta o estado da arte da manufatura aditiva e propõe um *framework* de aplicação desse processo de

fabricação. Para isso, é utilizada a revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2 do presente trabalho.

O item seguinte apresenta o método de construção do modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado.

3.2.2. Construção do modelo

Esta etapa tem como objetivo descrever o modelo de processo de avaliação para a adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado. A Figura 22 apresenta o método de construção de tal modelo.

Figura 22 - Método de construção do modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

Para o desenvolvimento do modelo foram utilizados quatro modelos de processo de adoção de AMTs como base. Tais modelos foram selecionados na revisão

bibliográfica sistemática sobre AMTs. Foram então identificadas e estudadas as principais características de cada um deles.

Em paralelo, foram estudadas as principais características da manufatura aditiva, por meio de outra revisão bibliográfica sistemática. O estudo das principais características da manufatura aditiva permitiu conhecer as peculiaridades desse processo de fabricação. Dessa forma, foi possível avaliar a adequação dos elementos dos modelos base para o modelo em construção, e identificar lacunas que necessitavam ser supridas.

Por fim, foi desenvolvido um modelo de processo de avaliação para a adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado a partir da adaptação dos principais elementos identificados nos quatro modelos selecionados como base e das principais características da manufatura aditiva. As lacunas que não podiam ser supridas com elementos dos modelos base foram supridas com o desenvolvimento de elementos inéditos pelo autor, apresentados na descrição do modelo.

Ainda, após a construção do modelo, foram realizadas três entrevistas para avaliar suas vantagens e desvantagens e também sua aplicabilidade na indústria de alto valor agregado. Como resultado das entrevistas, o modelo foi aperfeiçoado, e a descrição do modelo apresentada no próximo capítulo já incorpora as melhorias decorrentes das entrevistas com especialistas, evitando-se assim idas e vindas e resultando na descrição final do modelo desenvolvido.

O estudo dos quatro modelos base permitiu identificar oito passos principais na avaliação para adoção de tecnologias avançadas de manufatura. A avaliação com os especialistas permitiu identificar um passo adicional, que foi incluído no início do modelo como o primeiro passo a ser executado. Assim, o modelo desenvolvido contempla nove passos de execução: (i) avaliação das necessidades da empresa; (ii) avaliação das justificativas para adoção; (iii) avaliação da estratégia competitiva; (iv) avaliação dos indicadores; (v) avaliação de competências da empresa; (vi) avaliação de tecnologias; (vii) avaliação financeira; (viii) decisão; e (ix) planejamento da implementação.

A avaliação das necessidades da empresa é um passo inicial que visa avaliar se a empresa realmente apresenta uma necessidade que pode ser mais bem atendida com a utilização da manufatura aditiva.

A avaliação de justificativas é também um iniciador do processo de avaliação, sendo que ela é prevista em todos os modelos base estudados, embora apenas tenha sido melhor detalhada no modelo de Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006). A integração das justificativas de adoção de AMTs dos modelos base estudados ao modelo desenvolvido neste trabalho considerou a avaliação das justificativas encontradas na literatura específica de manufatura aditiva, apresentada no capítulo 2. Ainda, a avaliação com os especialistas permitiu descartar justificativas consideradas como não pertinentes e adicionar justificativas não identificadas anteriormente. A título de exemplo, as justificativas que abrangem a sustentabilidade na manufatura resultaram em uma publicação apartada do restante do trabalho (MANCANARES, ZANCUL e MIGUEL, 2015).

A avaliação da estratégia competitiva, a avaliação dos indicadores, a avaliação de competências da empresa, a avaliação de tecnologias e a avaliação financeira são passos que envolvem atividades de levantamento de dados e análise por parte dos usuários do modelo. Nesses cinco passos mencionados, cada um dos autores de cada modelo base estudado propõe diferentes técnicas e atividades de levantamento de dados e de análise para decisão.

Por técnica, entende-se o modo como a atividade é executada, enquanto atividade é entendida como um procedimento a ser executado ao longo do processo.

Para a definição das atividades que deveriam compor esses cinco passos foi realizada uma síntese das principais atividades indicadas em cada modelo base, que foram então agrupadas em passos a serem executados. Em cada passo procurou-se agregar as atividades comuns aos modelos base, suplementando com aquelas que eram únicas de cada um deles (e.g. avaliação de indicadores do modelo de Efstathiades, Tassou e Antoniou (2002); avaliação de riscos do modelo de Ordoobadi (2013) e avaliação de fatores ambientais do modelo de Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006)).

Ressalta-se a importância do modelo de Ordoobadi (2013) para a identificação da necessidade de inclusão da atividade de ranqueamento das tecnologias. Entretanto, a técnica de ranqueamento de tecnologias proposta foi embasada em estudo específico para manufatura aditiva, que faz parte dos frutos do presente trabalho (MANCANARES et al., 2015).

O oitavo passo consiste na decisão da adoção, que deve ser subsidiada pelas informações obtidas nos sete primeiros passos.

Por fim, o último e nono passo consiste no planejamento da implementação. Os modelos de Chen e Small (1994) e de Efstathiades, Tassou, e Antoniou (2002) foram utilizados como referência para esse passo pois eles definem as principais atividades do planejamento para implementação das tecnologias, ao passo que os outros dois se limitam a avaliar as tecnologias e ranqueá-las. Ressalta-se que o modelo de Efstathiades, Tassou, e Antoniou (2002) vai além do planejamento para implementação, definindo atividades na pós-implementação das tecnologias. Tais atividades também foram incorporadas no modelo desenvolvido dentro do passo de planejamento para implementação.

A Tabela 7 a seguir identifica a origem de cada passo do modelo proposto. É importante ressaltar que apesar de apenas o primeiro passo ser originado exclusivamente das entrevistas com os especialistas, todos os passos foram avaliados por eles.

Tabela 7 – Origem de cada passo do modelo

Passos	Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006)	Ordoobadi (2013)	Chen e Small (1994)	Efstathiades, Tassou, e Antoniou (2002)	Entrevistas com especialistas
1. Avaliação das necessidades da empresa					x
2. Avaliação das justificativas para adoção	x	x	x	x	x
3. Avaliação da estratégia competitiva	x	x	x	x	
4. Avaliação dos indicadores				x	

5. Avaliação das competências	x	x	x	x	
6. Avaliação das tecnologias	Desenvolvido pelo autor (MANCANARES et al., 2015)				
7. Avaliação financeira			x	x	
8. Decisão	x	x	x	x	
9. Planejamento da implementação			x	x	

Fonte: Elaborada pelo autor

A seguir são detalhadas as origens e formas de apresentação de cada passo do desenvolvimento do quadro referencial.

Cada passo do modelo contempla uma série de atividades. A Tabela 8 apresenta uma consolidação dos passos e atividades do modelo, indicando as principais fontes que embasaram cada uma das atividades.

Tabela 8 – Passos e atividades do modelo e principais fontes das atividades prescritas

Passos	Atividades	Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006)	Ordoobadi e Mulvaney (2001) e Ordoobadi (2008)	Chen e Small (1994)	Efstathiades, Tassou, e Antoniou (2002)	Entrevistas com especialistas
1. Avaliação das necessidades da empresa	Avaliação das necessidades da empresa					x
2. Avaliação das justificativas para adoção	Avaliação das justificativas para adoção	x	x	x	x	x
3. Avaliação da estratégia competitiva	Avaliação dos objetivos	x	x	x	x	
	Avaliação das oportunidades institucionais	x	x		x	
	Avaliação de potenciais novas oportunidades de negócio	x	x		x	
	Avaliação da adequação do produto ao mercado	x	x	x	x	
	Avaliação de novas oportunidades no aprimoramento da cadeia de suprimentos	x	x		x	
4. Avaliação dos indicadores	Identificação dos indicadores consistentes com as tecnologias				x	
	Revisão dos indicadores de manufatura existentes				x	
	Avaliação dos gaps de indicadores de manufatura				x	
5. Avaliação das competências	Avaliação dos recursos atuais	x		x	x	
	Avaliação das capacitações atuais	x		x	x	

Passos	Atividades	Sohal, Sarros, Schroder e O'Neill (2006)	Ordoobadi e Mulvaney (2001) e Ordoobadi (2008)	Chen e Small (1994)	Efstathiades, Tassou, e Antoniou (2002)	Entrevistas com especialistas
	Identificação de barreiras existentes	x	x	x	x	
6. Avaliação das tecnologias	Seleção das tecnologias	Desenvolvido pelo autor (MANCANARES et al., 2015)				
7. Avaliação financeira	Avaliação financeira			x	x	
8. Decisão	Decisão da adoção	x	x	x	x	
9. Planejamento da implementação	Planejamento para implementação			x	x	

Fonte: Elaborada pelo autor

Avaliação das necessidades da empresa

A necessidade de inclusão do passo avaliação das necessidades da empresa foi identificada nas entrevistas de validação do modelo com especialistas. Foi observado pelos especialistas que o modelo é aplicável apenas para empresas que apresentam pelo menos uma dentre quatro tipos de necessidades: (i) empresas que realizam atualmente ou necessitam realizar atividades de desenvolvimento de produtos; (ii) empresas que necessitam ou desejam utilizar serviços de manufatura aditiva para manutenção ou solução de problemas; (iii) empresas que necessitam ou estão dispostas a utilizar a manufatura aditiva como uma de suas tecnologias de chão de fábrica; (iv) empresas que necessitam ou desejam utilizar manufatura aditiva como tecnologia chave do seu processo produtivo. É apresentado um detalhamento das quatro necessidades definidas, e proposta uma atividade de avaliação, para que os executores do modelo possam avaliar se as necessidades da empresa se enquadram nas necessidades para as quais o modelo é considerado aplicável.

Avaliação das justificativas para adoção da manufatura aditiva

O desenvolvimento da avaliação justificativas utiliza os resultados das revisões sistemáticas das literaturas sobre AMTs e sobre manufatura aditiva. Foram estudadas

as justificativas para adoção de AMTs nos modelos base, e adaptadas as justificativas de acordo com a pertinência dessas para a manufatura aditiva, de acordo com as características estudadas. Por fim, as justificativas consolidadas foram avaliadas pelos especialistas, sendo que foram retiradas algumas e incluídas outras. As modificações realizadas após a avaliação com especialistas estão descritas no capítulo 5. No capítulo 4 é apresentada uma coletânea de justificativas que já incorpora as modificações realizadas.

A Tabela 9 a seguir apresenta as principais fontes que embasaram a relação das justificativas sugeridas no modelo.

Tabela 9 - Justificativas sugeridas para iniciar a avaliação para adoção de manufatura aditiva

Categoria	Justificativa	Principais fontes
Melhoria na flexibilidade	Aumento do número de tipos de produtos fabricados	COOK e COOK, 1994; CO, PATUWO e HU, 1998; SOHAL ET AL., 2001
	Melhoria na capacidade de produção de baixos lotes	CHEN e SMAL, 1996
	Menor <i>lead time</i>	UDO e EHIE, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998, SCHRODER e SOHAL, 1999
	Menor tempo de espera por peças	MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; CHEN e SMALL, 1996; JONSSON, 2000
	Menor quantidade de produtos em fabricação (<i>work in progress</i>)	SCHRODER e SOHAL, 1999; JONSSON, 2000
	Redução de estoques	CHEN e SMAL, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998; JONSSON, 2000
	Redução no ciclo de produção	CHEN e SMAL, 1996; JONSSON, 2000
Melhoria na qualidade	Redução de sucata	
	Redução de retrabalho	UDO e EHIE, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998
	Melhorias no controle da produção	UDO e EHIE, 1996; MONGE et al., 2006
Expansão do uso da tecnologia	Maior número de produtos que utilizam a tecnologia	SCHRODER e SOHAL, 1999; JONSSON, 2000
	Maior número de outros processos que podem utilizar a tecnologia	SCHRODER e SOHAL, 1999; MONGE et al., 2006
	Maior número de outras áreas que podem utilizar a tecnologia	SCHRODER e SOHAL, 1999; MONGE et al., 2006
	Aumento no número de novos negócios	SCHRODER e SOHAL, 1999
Melhoria na satisfação dos consumidores	Melhoria na confiabilidade da peça	
	Diminuição do tempo de entrega	MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; CHEN e SMALL, 1996; JONSSON, 2000
	Menor <i>lead time</i>	UDO e EHIE, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998, SCHRODER e SOHAL, 1999

Categoria	Justificativa	Principais fontes
Oportunidades de mercado	Melhoria na velocidade de resposta a mudanças no mercado	LINDBERG, 1994; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; UDO e EHIE, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998; JONSSON, 2000
	Melhoria na velocidade de lançamento de produtos	MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995
	Melhoria na flexibilidade de resposta	LINDBERG, 1994; MECHLING, PEARCE e BUSBIN, 1995; UDO e EHIE, 1996; CO, PATUWO e HU, 1998; JONSSON, 2000
Melhoria da operação da produção	Aumento da padronização da operação	
	Melhoria no controle da produção	UDO e EHIE, 1996
	Melhoria na utilização das máquinas	CO, PATUWO e HU, 1998; SLACK e LEWIS, 2001
	Melhoria de informações da produção	RAYMOND, 2005; UDO e EHIE, 1996
Qualidade do trabalho das pessoas	Melhoria na qualificação dos funcionários	UDO e EHIE, 1996
	Melhoria da produtividade	SCHRODER e SOHAL, 1999; RAYMOND, 2005
	Redução de acidentes	UDO e EHIE, 1996; RAYMOND, 2005
	Aumento no aprendizado intra-organizacional	SCHRODER e SOHAL, 1999

Fonte: Elaborada pelo autor

A avaliação das justificativas é ao mesmo tempo um passo e uma atividade, que visa auxiliar as empresas a decidirem se o início de um projeto de avaliação para adoção da manufatura aditiva pode ser justificado para a empresa executora do modelo. Caso a resposta seja positiva, as informações contidas na coletânea de justificativas serve ainda como material de apoio para os usuários do modelo justificarem o projeto de avaliação.

Avaliação da estratégia competitiva

O desenvolvimento da avaliação da estratégia competitiva utiliza os resultados das revisões sistemáticas das literaturas sobre AMTs e sobre manufatura aditiva. Foram estudadas as estratégias competitivas impactadas pela adoção de AMTs nos modelos base e adaptadas as estratégias de acordo com a pertinência dessas para a manufatura aditiva, de acordo com as características estudadas. Por fim, as estratégias competitivas consolidadas foram avaliadas pelos especialistas. As avaliações indicaram pertinência das estratégias competitivas identificadas, que foram então mantidas.

Para avaliar as estratégias competitivas foram definidos variáveis e fatores, sendo que cada atividade contempla fatores, e cada fator contempla variáveis. As relações de

cada variável com os fatores, atividades e passos foram definidas com base na revisão bibliográfica, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Fatores e variáveis da avaliação da estratégia competitiva e principais fontes

Passos	Atividades	Fator	Variável	Bourell, Leu e Rosen (2009)	Sreenivasan, Goel e Bourell (2010)	Guo e Leu (2013)	Huang, Liu e Mokasdar (2013)
3. Avaliação da estratégia competitiva	Avaliação dos objetivos	Objetivos e prioridades estratégicas	Valor agregado	x	x		
			Lead time	x	x	x	
			Flexibilidade no design	x	x	x	
			Flexibilidade do volume	x	x	x	
	Avaliação das oportunidades institucionais	Oportunidades institucionais	Possibilidade de aproveitamento de tecnologia existente na empresa	x			
			Possibilidade de sinergia entre departamentos	x			
	Avaliação de potenciais novas oportunidades de negócio	Potenciais novas oportunidades de negócio	Desenvolvimento de novo negócio	x			
	Avaliação da adequação do produto ao mercado	Adequação do produto ao mercado	Possibilidade de aumentar participação em mercado	x			
	Avaliação de novas oportunidades no aprimoramento da cadeia de suprimentos	Novas oportunidades no aprimoramento da cadeia de suprimentos	Possibilidade de fabricação próxima ao consumidor	x			x
			Existência do fornecimento da matéria-prima próxima ao consumidor	x			x

Fonte: Elaborado pelo autor

No capítulo 4 são apresentadas em detalhe as estratégias competitivas identificadas como aquelas com possibilidade de serem impactadas pela manufatura aditiva e é proposta a atividade de avaliação do alinhamento destas com as estratégias competitivas da empresa executora do modelo. A avaliação das estratégias competitivas

visa auxiliar as empresas a decidirem se a adoção da manufatura aditiva está alinhada com a estratégia competitiva da empresa usuária do modelo.

Avaliação dos indicadores

O desenvolvimento da avaliação dos indicadores utiliza os resultados das revisões sistemáticas das literaturas sobre AMTs e sobre manufatura aditiva. Foram estudados os indicadores impactados pela adoção de AMTs nos modelos base, e adaptados os indicadores de acordo com a pertinência desses para a manufatura aditiva, de acordo com as características estudadas. Por fim, os indicadores consolidados foram avaliados pelos especialistas. As avaliações indicaram pertinência dos indicadores identificados, que foram então mantidos. No capítulo 4 são apresentados em detalhe os indicadores identificados como aqueles com possibilidade de serem impactados pela manufatura aditiva e é proposta a atividade de avaliação dos indicadores atuais da empresa, para avaliar se estes refletem corretamente os possíveis impactos da adoção da manufatura aditiva. A avaliação dos indicadores visa auxiliar as empresas a decidirem se a adoção da manufatura aditiva poderá ser corretamente mensurada pela empresa executora do modelo. É apresentada ainda uma lista de indicadores capazes de mensurar os potenciais impactos da adoção da manufatura aditiva, que servem tanto como base para a avaliação dos indicadores atuais da empresa como de material de apoio para uma possível implementação de novos indicadores na empresa usuária do modelo.

Avaliação de competências da empresa

O desenvolvimento da avaliação das competências utiliza os resultados das revisões sistemáticas da literatura sobre AMTs e sobre manufatura aditiva. Foram estudadas as competências impactadas pela adoção de AMTs nos modelos base, e adaptadas as competências de acordo com a pertinência dessas para a manufatura aditiva, de acordo com as características estudadas. Por fim, as competências consolidadas foram avaliadas pelos especialistas. As avaliações indicaram pertinência das competências competitivas identificadas, que foram então mantidas.

Para avaliar as competências da empresa foram definidos variáveis e fatores, sendo que cada atividade contempla fatores, e cada fator contempla variáveis. As relações de cada variável com os fatores, atividades e passos foram definidas com base na revisão bibliográfica, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Fatores e variáveis da avaliação das competências e principais fontes

Passos	Atividades	Fatores	Variáveis	Bourell, Leu e Rosen (2009)	Sreenivasan, Goel e Bourell (2010)	Guo e Leu (2013)	Goldsberry (2009)	Levy (2010)	Martin et al. (2012)	Metzger, Muscatello e Mueller (2013)
5. Avaliação das competências	Avaliação dos recursos atuais	Recursos	Existência de projetistas para projetar para a nova tecnologia	x	x	x	x	x		
			Existência de operários para operação da nova tecnologia	x	x	x	x	x		
			Existência de supervisores para a nova tecnologia	x	x	x	x	x		
			Existência de coordenadores para a nova tecnologia	x	x	x	x	x		
			Existência de gestores para a nova tecnologia	x	x	x	x	x		
			Existência de computadores para a nova tecnologia	x	x	x	x	x		
			Existência de softwares para a nova tecnologia	x	x	x	x	x		
			Existência de espaço físico para a nova tecnologia	x	x	x	x	x		
			Existência de processos complementares ao de manufatura aditiva na empresa	x	x	x			x	
	Avaliação das capacidades atuais	Capacidades atuais	Existência de colaboradores com conhecimento de <i>design</i> para manufatura aditiva	x	x	x			x	x
			Existência de colaboradores com conhecimento de operação de máquinas de manufatura aditiva	x	x	x			x	x
			Existência de colaboradores com conhecimento de manutenção de	x	x	x			x	x

Passos	Atividades	Fatores	Variáveis	Bourell, Leu e Rosen (2009)	Sreenivasan, Goel e Bourell (2010)	Guo e Leu (2013)	Goldsberry (2009)	Levy (2010)	Martin aa et al. (2012)	Metzger, Muscatello e Mueller (2013)
	Identificação de barreiras existentes	Barreiras existentes	máquinas de manufatura aditiva							
			Requerimentos contratuais de clientes	x	x	x			x	x
			Problemas de contratação de funcionários qualificados	x	x	x			x	x
			Contratos de manutenção dos equipamentos existentes	x	x	x			x	x
			Contrato de fornecimento de matérias prima existentes	x	x	x			x	x

Fonte: Elaborada pelo autor

No capítulo 4 são apresentadas em detalhe as competências identificadas como necessárias para a adoção da manufatura aditiva, e é proposta a atividade de avaliação do alinhamento destas com as competências presentes na empresa usuária do modelo. A avaliação das competências visa auxiliar as empresas a verificarem se as competências necessárias para a adoção da manufatura aditiva estão presentes na empresa usuária do modelo. Ainda, as competências apresentadas, necessárias para a adoção da manufatura aditiva, servem como material de apoio para uma possível decisão de estruturação ou aquisição de novas competências na empresa usuária do modelo.

Avaliação das tecnologias

A avaliação das tecnologias trata da escolha da tecnologia de manufatura aditiva. Para a execução desse passo é proposto um processo de seleção desenvolvido pelo autor (MANCANARES ET. AL, 2015). Foi realizado um levantamento de todas as tecnologias de manufatura aditiva disponíveis no mercado, por meio de da revisão bibliográfica e também pela obtenção de dados secundários obtidos junto a catálogos de fornecedores. O levantamento das tecnologias inclui as capacidades de fabricação de

cada tecnologia (e.g. protótipos, peças finais ou moldes) os materiais que cada tecnologia pode processar e as utilizações atualmente conhecidas para cada tecnologia. Foi feito um levantamento detalhado de cada máquina disponível no mercado para fabricar utilizando cada uma destas tecnologias. Por ser considerado um levantamento muito extenso para o escopo do presente trabalho, foram apresentadas as principais características de cada tecnologia, excluindo as características de cada máquina disponível no mercado. Considerou-se que o presente modelo deve-se limitar a identificar a tecnologia mais adequada, sem identificar a máquina ou fornecedor. Para um exemplo da escolha da tecnologia mais adequada com a identificação da máquina e do fornecedor ver Mancanares et al. (2015). É apresentada no capítulo 4 uma base de dados com as características das tecnologias levantadas, e apresentada uma forma de ranqueamento das tecnologias desenvolvida pelo autor.

Avaliação financeira

A avaliação financeira é um passo incluído no modelo a partir dos modelos base estudados. No entanto, tal passo não é detalhado e contém apenas uma sugestão de técnica de avaliação financeira. A decisão de não detalhar o passo de avaliação financeira deriva da identificação, a partir do estudo dos modelos base, de que as atividades incluídas na avaliação financeira já são inerentes de cada empresa, e devem ser executadas da forma usualmente aceita pela empresa usuária do modelo. Não obstante, uma sugestão de técnica de avaliação financeira foi proposta pelo autor e é apresentada no capítulo 4.

Decisão

O passo da decisão da adoção contempla a atividade de decisão sobre a adoção ou não adoção da manufatura aditiva, e é um passo que têm como subsídio as informações levantadas nos sete passos anteriores, e têm como resultado uma decisão pela adoção ou pela não adoção da manufatura aditiva. Todos os modelos base estudados preveem que haja uma decisão sobre a adoção das tecnologias e mencionam

que é necessário executar essa atividade de decisão, mas nenhum deles sugere uma técnica para essa tomada de decisão. O presente modelo também prevê a atividade de decisão, sem sugerir uma técnica específica para executar essa atividade.

Planejamento da implementação

A construção do passo de planejamento da implementação utiliza os resultados das revisões sistemáticas das literaturas sobre AMTs e sobre manufatura aditiva. Foram estudadas as atividades de planejamento de implementação de AMTs nos modelos base, e adaptadas as atividades de acordo com a pertinência dessas para a manufatura aditiva, de acordo com as características estudadas. Por fim, as atividades consolidadas foram avaliadas pelos especialistas. As avaliações indicaram pertinência das atividades identificadas, que foram então mantidas. No capítulo 4 são apresentadas em detalhe as atividades identificadas para esse passo. A descrição das atividades de planejamento de implementação propostas serve como material de apoio para uma possível adoção da manufatura aditiva pela empresa usuária do modelo, contendo atividades a serem executadas de modo a garantir que a adoção seja feita de forma racionalizada.

3.2.3. Avaliação do modelo

O modelo proposto é avaliado por meio de entrevistas com especialistas na área. Para a realização das entrevistas foram definidos critérios para a seleção dos especialistas a serem entrevistados, o agendamento com os especialistas, a elaboração prévia de um roteiro de entrevistas, a realização das entrevistas e a sistematização dos resultados obtidos.

São definidos dois critérios para a seleção dos especialistas: (i) os especialistas devem ter experiência profissional ou acadêmica na seleção ou aplicação de tecnologias de manufatura aditiva; e (ii) os especialistas não podem atuar em nenhuma empresa fornecedora de máquinas que utilizam tecnologias de manufatura aditiva. Candidatos típicos para participar da validação são, portanto, funcionários de empresas que utilizam manufatura aditiva em seu processo produtivo, consultores e acadêmicos na área.

Optou-se por realizar três entrevistas para possibilitar a coleta de opiniões distintas. Cada entrevista é estruturada de forma que o entrevistado possa percorrer os passos do modelo e avaliar a adequação das técnicas e atividades propostas e as atividades de cada passo do modelo. Ao longo da entrevista, o modelo proposto neste trabalho é comparado com os modelos base utilizados e com as atividades que os entrevistados realizam no seu dia a dia. São avaliadas as vantagens e desvantagens do modelo proposto, bem como sua aplicabilidade, e propostas melhorias para o modelo apresentado. O roteiro de entrevista utilizada na avaliação do modelo encontra-se no APÊNDICE A. O capítulo 5 apresenta a análise das entrevistas.

Para atingir os objetivos pretendidos com as entrevistas foi seguido um protocolo de entrevista, garantindo a realização de maneira planejada e permitindo a documentação do processo de entrevista. O protocolo de entrevista inclui as atividades de contato com os especialistas, com uma explicação do trabalho desenvolvido, convite para a participação na entrevista, agendamento da data e horário da entrevista, envio de material prévio com tempo hábil para os especialistas se prepararem para a entrevista, confirmação do horário da entrevista e da preparação com o material enviado, realização das entrevistas utilizando o software Skype, controle do tempo e do escopo pretendido para a entrevista, avaliação do conteúdo discutido nas entrevistas, e desenvolvimento do relatório com os resultados das entrevistas.

A etapa seguinte foi a elaboração das conclusões do trabalho.

3.2.4. Conclusões do trabalho

Esta etapa envolve a elaboração das conclusões a respeito dos resultados apresentados e também a análise das contribuições desta pesquisa para o campo de conhecimento estudado. Também são sugeridos trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir do conhecimento gerado por este trabalho. Esses resultados são apresentados no capítulo 6. Com isso, concluiu-se o método de desenvolvimento do trabalho.

4. Modelo de processo

Este capítulo tem o objetivo de apresentar o modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado desenvolvido neste trabalho de mestrado. Tal modelo é apresentado em nove seções para facilitar seu entendimento, sendo que cada seção correspondente a um passo do modelo. Cada passo do modelo é composto de atividades. Uma atividade é um procedimento a ser executado.

O modelo proposto deve ser aplicado passo a passo, por uma equipe de no mínimo três integrantes com capacitações técnicas e institucionais para realizar cada uma das atividades propostas. As capacitações técnicas englobam conhecimentos de levantamento e de análise de dados. As capacitações institucionais envolvem acesso a informações da empresa consideradas como estratégicas. Tais informações são detalhadas na descrição das atividades. A equipe de um mínimo de três integrantes é sugerida para garantir uma avaliação com múltiplos pontos de vista, reduzindo assim o risco de que a avaliação seja enviesada.

Na sequência é apresentada uma figura que ilustra a relação dos passos e das atividades de execução do modelo (Figura 23).

Figura 23 - Relação entre passos e atividades do modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

Em seguida são descritos cada passo do modelo, incluindo a descrição das atividades que compõe cada um dos passos.

4.1. Avaliação das necessidades da empresa

O primeiro passo do modelo é a avaliação das necessidades da empresa. Deve ser avaliado se a empresa apresenta pelo menos uma dentre quatro tipos de necessidades.

O resultado desse passo é a decisão por continuar com a avaliação para adoção da manufatura aditiva na empresa ou não continuar.

Na sequência são apresentadas as quatro necessidades mencionadas:

- 1. Empresas que atualmente realizam ou necessitam realizar atividades de desenvolvimento de produtos** – As empresas que trabalham com desenvolvimento de produto, ainda que como atividade de suporte, têm indicativos de que a adoção da manufatura aditiva tem potenciais benefícios para certas atividades do seu negócio. Isso porque o projeto conceitual do produto, no desenvolvimento de produto, pode ter muitos ganhos com a utilização de manufatura aditiva para a fabricação de protótipos, gerando subsídios para discussão da equipe, entre equipes e também com clientes.

- 2. Empresas que necessitam ou desejam utilizar serviços de manufatura aditiva para manutenção de equipamentos ou solução de problemas** – As empresas que trabalham com processos produtivos que podem ser otimizados com a utilização da manufatura aditiva para a manutenção de equipamentos (e.g. reparos com manufatura aditiva ou fornecimento de peças de alto valor agregado com produção local, minimizando tempo de parada de máquinas por espera de peças importadas para manutenção), com a utilização de moldes que já podem ser fabricados com manufatura aditiva com menor gasto de material (ver exemplos de aplicação no capítulo

2) ou então com a utilização de peças de alta complexidade que apenas podem ser produzidas com manufatura aditiva e que podem reduzir o tempo de ciclo de produção (ver exemplos de aplicação no capítulo 2) têm indicações de que a adoção da manufatura aditiva pode trazer benefícios. Tais empresas têm uma motivação para utilização da manufatura aditiva, mas eventualmente não desejam necessariamente investir em máquina ou explorar as aplicações diversas dessas tecnologias. Essas empresas podem adotar a manufatura aditiva por meio de serviços de terceiros, que se tornam fornecedores integrados aos seus processos produtivos, e o modelo proposto pode auxiliar nessa decisão.

3. **Empresas que necessitam ou estão dispostas a utilizar a manufatura aditiva como uma de suas tecnologias de chão de fábrica** – As empresas que enxergam as aplicações existentes da manufatura aditiva como uma possibilidade de agregar um novo componente de produção ao processo produtivo atual, integrando a manufatura aditiva com os processos tradicionais, têm outras necessidades, diferentes, das duas primeiras. Tais empresas desejam avaliar a viabilidade da adoção da manufatura aditiva em seu fluxo de processos. Portanto, além das motivações para utilização do modelo apenas para auxiliar na decisão de adoção ou não da manufatura aditiva, tais empresas ainda podem se utilizar das informações do modelo como material de apoio para a implementação mais eficiente da manufatura aditiva como um de seus processos de produção. Por implementação mais eficiente entende-se uma implementação que atenda aos objetivos com menor gasto de recursos.
4. **Empresas que necessitam ou desejam utilizar manufatura aditiva como tecnologia chave do seu processo produtivo** – As empresas que desejam estabelecer um novo negócio utilizando a manufatura aditiva como um processo-chave também têm motivações para utilizar o modelo

proposto. Nesse caso estão englobadas empresas nascentes que desejam fornecer soluções utilizando manufatura aditiva ou então empresas já estabelecidas que necessitam ou desejam avaliar a possibilidade de adoção da manufatura aditiva em uma nova unidade de negócio, para também fornecer soluções utilizando esse processo produtivo. Para ambos os casos o modelo atende às necessidades e, portanto, pode ser utilizado como apoio à decisão, além de também conter informações que servem como material de apoio para a implementação mais eficiente da manufatura aditiva como um de seus processos.

A partir das quatro necessidades descritas, deve-se avaliar se as necessidades da empresa usuária do modelo se encaixam em alguma delas. Em caso positivo, a utilização do modelo é recomendada. Em caso negativo, muito provavelmente o modelo não tem aplicabilidade para a empresa e, portanto, não é recomendado que sejam executados os próximos passos.

Na sequência é apresentado o segundo passo.

4.2. Avaliação das justificativas para adoção

O segundo passo do modelo consiste na avaliação das justificativas para adoção da manufatura aditiva na empresa executora.

Este passo visa auxiliar as empresas a decidirem se a realização de um projeto de avaliação para adoção da manufatura aditiva pode ser justificada para a empresa executora do modelo.

O resultado desse passo é a decisão por continuar com a avaliação para adoção da manufatura aditiva na empresa ou não continuar.

Considera-se que a execução de um processo de avaliação de adoção de tecnologia na empresa depende de patrocínio institucional, que envolve dispêndio de recursos humanos e financeiros e abertura para discussão do projeto com pessoas responsáveis por tomar decisões desse porte na empresa.

Até a execução deste segundo passo o dispêndio de recursos é mínimo. No entanto, caso a empresa decida seguir para o terceiro passo do modelo, é recomendável que haja uma programação de necessidades de pessoas e necessidades financeiras para executá-los, além do consentimento dos responsáveis por tomar decisões na empresa.

Nesse contexto, neste segundo passo deve-se executar a atividade de avaliar as justificativas que a empresa usuária do modelo tem para iniciar um processo formal para avaliar a adoção da manufatura aditiva. Essa avaliação consiste em percorrer cada uma das justificativas sugeridas e questionar se cada uma delas está alinhada à missão, à visão ou aos objetivos e metas da empresa.

Como resultado dessa atividade deverá ser obtida uma lista das justificativas para a empresa avaliar a adoção da manufatura aditiva.

Em seguida é essencial que os usuários do modelo avaliem as justificativas obtidas na atividade mencionada para tomar a decisão se vale a pena ou não continuar com a aplicação do modelo. Tal decisão é subjetiva e depende do senso crítico dos usuários do modelo.

Quanto mais justificativas forem consideradas como alinhadas à missão, visão ou aos objetivos e metas da empresa, mais indicativos se têm de que a aplicação do modelo é recomendada e, por conseguinte, é também recomendada a avaliação para adoção da manufatura aditiva. Quanto menos justificativas forem consideradas como alinhadas, menos indicativos se têm para continuar a aplicação do modelo.

As informações contidas na tabela de justificativas sugeridas (Tabela 12) servem também como material de apoio para preparar uma apresentação para os tomadores de decisão decidirem sobre a iniciação ou não do processo de avaliação, caso seja necessário.

A Tabela 12 a seguir apresenta relação das justificativas sugeridas no modelo.

Tabela 12 - Justificativas sugeridas para iniciar a avaliação para adoção de manufatura aditiva

Categoria	Justificativa	Detalhamento
Melhoria na flexibilidade	Aumento do número de tipos de produtos fabricados	Uma só máquina pode produzir diferentes tipos de produtos
	Melhoria na capacidade de produção de baixos lotes	As máquinas podem fabricar diversas peças diferentes de uma só vez
	Menor <i>lead time</i>	Fabricação perto do local de consumo
	Menor tempo de espera por peças	Menor número de processos necessários reduz o tempo ocioso da peça
	Menor quantidade de produtos em fabricação (<i>work in progress</i>)	Menor número de processos necessários reduz o tempo ocioso da peça
	Redução de estoques	Produção agilizada pode ser feita sob demanda; Fabricação perto do local de consumo permite reduzir estoque
	Redução no ciclo de produção	Redução do número de processos necessários reduz o ciclo de produção
Melhoria na qualidade	Redução de sucata	Menor quantidade de resíduos
	Redução de retrabalho	Processo controlado por computador garante menor taxa de defeitos, reduzindo retrabalho
	Melhorias no controle da produção	Processo controlado por computador garante melhor controle
Expansão do uso da tecnologia	Maior número de produtos que utilizam a tecnologia	Aprendizado com tecnologia pode gerar novas oportunidades
	Maior número de outros processos que podem utilizar a tecnologia	Aprendizado com tecnologia pode gerar novas oportunidades
	Maior número de outras áreas que podem utilizar a tecnologia	Aprendizado com tecnologia pode gerar novas oportunidades
	Aumento no número de novos negócios	Aprendizado com tecnologia pode gerar novas oportunidades
Melhoria na satisfação dos consumidores	Melhoria na confiabilidade da peça	Processos são padronizados,
	Diminuição do tempo de entrega	Fabricação perto do consumo permite entregar mais rapidamente
	Menor <i>lead time</i>	Fabricação perto do consumo permite entregar mais rapidamente
Oportunidades de mercado	Melhoria na velocidade de resposta a mudanças no mercado	Aprendizado com tecnologia pode gerar novas oportunidades
	Melhoria na velocidade de lançamento de produtos	Tecnologia agiliza o desenvolvimento de produtos
	Melhoria na flexibilidade de resposta	Responder demanda de novo negócio mais rapidamente, mesmo sem ter o processo desenhado
Melhoria da operação da produção	Aumento da padronização da operação	Processo controlado por computador
	Melhoria no controle da produção	Controle pode ser feito à distância, em tempo real
	Melhoria na utilização das máquinas	Uma só máquina atende diversas demandas de peças
	Melhoria de informações da produção	Informações da produção em tempo real
Qualidade do trabalho das pessoas	Melhoria na qualificação dos funcionários	Alta especialização dos funcionários
	Melhoria da produtividade	Maior valor agregado por funcionário
	Redução de acidentes	Funcionário não tem contato com máquina em funcionamento
	Aumento no aprendizado intra-organizacional	Aprendizado com tecnologia pode gerar novas oportunidades

Fonte: Elaborada pelo autor

Muitas vezes, a dificuldade de iniciar um processo de avaliação de adoção de nova tecnologia por parte dos gestores recai no convencimento das outras áreas sobre os potenciais benefícios de tal tecnologia para a empresa. Pretende-se, neste segundo passo, fornecer informações que auxiliem os responsáveis nas empresas a justificar um processo interno de avaliação para adoção da manufatura aditiva, caso essa seja a decisão resultante deste passo.

Caso a decisão resultante neste segundo passo seja a de não execução do processo, não deve ser executado o terceiro passo. Caso a decisão seja positiva para a execução do processo, deve-se então executar os passos de três a seis, sendo que não há prejuízos para a execução do modelo se eles forem executados em paralelo. Na sequência é apresentado o terceiro passo.

4.3. Avaliação da estratégia competitiva

A avaliação da estratégia competitiva é um passo que envolve a avaliação tanto de fatores internos quanto de fatores externos à organização. Dentre os fatores internos estão os objetivos, as prioridades estratégicas da organização e oportunidades institucionais. Os fatores externos englobam potenciais novas oportunidades de negócio, adequação do produto ao mercado e novas oportunidades no aprimoramento da cadeia de suprimentos. A avaliação de cada um desses fatores corresponde a uma atividade do passo de avaliação da estratégia competitiva.

Para avaliar cada um desses fatores foram definidas variáveis que os compõem. Dessa forma, a consolidação da avaliação das variáveis que compõem um fator permite a avaliação do fator em si.

Como resultado deste passo obtém-se uma avaliação quantitativa de cada variável, permitindo então que os usuários do modelo tenham subsídio para entender se a adoção da manufatura aditiva pode ou não contribuir para a persecução da estratégia competitiva da empresa.

É necessário levar em conta os objetivos e as prioridades estratégicas a fim de avaliar adequadamente a tecnologia. Deve-se avaliar o alinhamento da manufatura aditiva com as necessidades estratégicas da empresa. Sugere-se que as seguintes variáveis sejam avaliadas nessa atividade: valor agregado; *lead time*; flexibilidade no *design*; e flexibilidade de volume.

As oportunidades institucionais se referem à possibilidade de aproveitar o conhecimento adquirido com a manufatura aditiva para outra utilização na empresa

ou então à possibilidade de unir diferentes áreas, processos, divisões ou departamentos para usufruir conjuntamente os benefícios da tecnologia. Deve ser avaliado se existe alguma dessas oportunidades na empresa.

As novas oportunidades de negócio se referem à possibilidade de fabricação de novos produtos com a manufatura aditiva. Dessa forma, a avaliação de novas oportunidades deve verificar a possibilidade de desenvolvimento de um novo produto utilizando a manufatura aditiva.

No mesmo sentido deve ser realizada a avaliação da adequação do produto ao mercado, que se diferencia da avaliação da nova oportunidade de negócio por contemplar a avaliação de oportunidade de novo mercado para um produto já existente, mas que pode atender um novo mercado com a utilização da manufatura aditiva.

As oportunidades na cadeia de suprimentos se referem às possibilidades de produção próxima ao consumidor desde que haja a possibilidade de mudanças no fornecimento de matéria-prima que gerem benefícios para a empresa. Assim, deve-se avaliar a existência de uma dessas oportunidades.

Na sequência, é apresentada uma tabela para auxiliar a aplicação deste passo. A Tabela 13 apresenta uma forma de avaliar cada uma das variáveis relacionadas aos fatores enumerados.

Tabela 13 - Avaliação das prioridades estratégicas		
Baixo (1); Médio (2); Alto (3)		
Variável	Avaliação	Forma de avaliar
Valor agregado		Quanto maior o valor agregado da peça maior a nota
<i>Lead time</i>		Quanto maior a necessidade de <i>lead time</i> curto maior a nota
Flexibilidade de <i>design</i>		Quanto maior a necessidade de flexibilidade de <i>design</i> , maior a nota
Flexibilidade de volume		Quanto maior a necessidade de flexibilidade de volume, maior a nota
Possibilidade de aproveitamento de tecnologia existente na empresa		Quanto maior o conhecimento que pode ser aproveitado, maior a nota
Possibilidade de sinergia entre departamentos		Quanto mais departamentos puderem aproveitar a tecnologia, maior a nota
Desenvolvimento de novo negócio		Quanto maior a possibilidade, maior a nota
Possibilidade de aumentar participação em mercado		Quanto maior a possibilidade, maior a nota
Possibilidade de fabricação próxima ao consumidor		Quanto maior a possibilidade, maior a nota
Existência de fornecimento da matéria-prima próxima ao consumidor		Se já houver fornecedor a nota deve ser mais alta

Fonte: Elaborada pelo autor

A avaliação das variáveis deve ser realizada por colaboradores capacitados a responder tais questionamentos. Caso seja necessário, devem ser envolvidos outros

colaboradores para esse passo além dos usuários do modelo, para que as avaliações reflitam efetivamente a situação da empresa. A lógica de interpretação dos resultados deve ser a de que notas altas representam possíveis vantagens que a adoção da manufatura aditiva pode trazer para a persecução da estratégia competitiva da empresa, enquanto notas baixas indicam que a manufatura aditiva não contribuirá para a persecução da estratégia competitiva da empresa.

4.4. Avaliação dos indicadores

A avaliação dos indicadores de manufatura contempla as atividades de identificação dos indicadores consistentes com as tecnologias, revisão dos indicadores de manufatura existentes e a identificação de indicadores de manufatura não considerados.

Como resultado desse passo são identificadas as lacunas referentes a indicadores de manufatura, que correspondem a indicadores que não são utilizados na empresa, mas que são considerados necessários para mensurar corretamente os impactos da adoção da manufatura aditiva na empresa. Dessa forma, caso se decida pela adoção da manufatura aditiva, o resultado desse passo servirá de guia para uma adoção mais eficiente.

A primeira atividade consiste na identificação dos indicadores capazes de mensurar os impactos da manufatura aditiva na empresa. Para isso, é apresentada na sequência uma lista de indicadores associados com a manufatura aditiva, desenvolvido pelo autor, com base na revisão bibliográfica apresentada na seção 2.2, que já cumpre o propósito dessa atividade. Segue a lista:

1. *Lead time* de cotações;
2. *Lead time* de *design*;
3. *Lead time* do *design* para manufatura (tempo que demora para um *design* ser fabricado);
4. Capacidade de produzir um produto novo;
5. Rendimento de material;
6. Conformidade do produto comparado ao projeto;
7. Requisitos de ferramental;
8. Tempo de fabricação;
9. Retrabalho gerado;
10. Tamanho do lote;

11. Espaço requerido para fabricação;
12. Tempo de parada das máquinas;
13. Tempo de *setup* das máquinas;
14. Custo direto de funcionários;
15. Estoque de produtos acabados;
16. Estoque de matéria prima;
17. Utilização de supervisores;
18. *Work in progress*;
19. Resposta ao controle da qualidade;
20. Utilização de coordenadores.

A segunda atividade desse passo consiste na revisão dos indicadores de manufatura existentes na empresa. É necessário, para isso, avaliar se cada um dos indicadores da lista está presente nos indicadores atuais da empresa.

Por fim, a terceira atividade consiste em definir a relação de indicadores necessários para mensurar os impactos da manufatura aditiva, mas que ainda não são utilizados pela empresa.

Esse passo, durante a execução do modelo, não leva a nenhuma ação imediata ou decisão. Ele apenas serve de subsídio para uma decisão final sobre a adoção ou não da manufatura aditiva, que deverá considerar também a necessidade de acrescentar os indicadores relacionados às lacunas de indicadores definidas nesse passo aos indicadores atuais de manufatura.

4.5. Avaliação de competências

A avaliação de competências contempla as atividades de avaliação dos recursos atuais, capacitações atuais e das barreiras existentes.

Para a execução desse passo foi utilizada abordagem similar ao passo de avaliação da estratégia competitiva. Foram definidos fatores a serem avaliados, são eles: (i) recursos atuais; (ii) capacitações atuais; e (iii) barreiras existentes. A avaliação de cada um desses fatores corresponde a uma atividade do passo de avaliação de competências.

Para avaliar cada um desses fatores foram definidas variáveis que os compõem. Dessa forma, a consolidação da avaliação das variáveis que compõem um fator permite a avaliação do fator em si.

Como resultado desse passo obtém-se uma avaliação quantitativa de cada variável, permitindo então que os usuários do modelo tenham subsídio para entender se a empresa possui ou não as competências necessárias para a adoção da manufatura aditiva.

Os recursos disponíveis devem ser avaliados de forma a entender sobre a existência de projetistas, operários, supervisores, coordenadores e gestores suficientes para operar e controlar o processo de manufatura aditiva, além de computadores e *softwares* compatíveis, um espaço onde as máquinas possam ser dispostas nas condições de operação ideais para seu funcionamento e de processos complementares ao de manufatura aditiva na empresa.

A avaliação das capacitações atuais diz respeito às capacitações dos colaboradores. É necessário avaliar a existência de colaboradores com o conhecimento técnico adequado para projetar *designs* compatíveis com a manufatura aditiva, capazes de operar as máquinas de manufatura aditiva e realizar manutenção nas mesmas.

Por fim, deve-se avaliar as barreiras existentes, no âmbito das competências da empresa. As barreiras sugeridas para avaliação são: (i) requerimentos contratuais do cliente de peça a ser produzida; (ii) problemas de contratação de funcionários qualificados; (iii) contratos de manutenção dos equipamentos existentes; (iv) contratos de fornecimento de matéria-prima existentes.

Na sequência, é apresentada uma tabela para auxiliar a execução desse passo. A Tabela 14 apresenta uma forma de avaliar cada uma das variáveis associados aos fatores enumerados.

Tabela 14 - Avaliação das competências

Baixo (1); Médio (2); Alto (3)		
Variável	Avaliação	Forma de avaliar
Existência de projetistas para projetar para a nova tecnologia		Quanto maior a disponibilidade de pessoal, maior a nota
Existência de operários para operação da nova tecnologia		Quanto maior a disponibilidade de pessoal, maior a nota
Existência de supervisores para a nova tecnologia		Quanto maior a disponibilidade de pessoal, maior a nota
Existência de coordenadores para a nova tecnologia		Quanto maior a disponibilidade de pessoal, maior a nota
Existência de gestores para a nova tecnologia		Quanto maior a disponibilidade de pessoal, maior a nota
Existência de computadores para a nova tecnologia		Quanto maior a disponibilidade, maior a nota
Existência de <i>softwares</i> para a nova tecnologia		Quanto maior a disponibilidade, maior a nota
Existência de espaço físico para a nova tecnologia		Quanto maior a disponibilidade, maior a nota
Existência de processos complementares ao de manufatura aditiva na empresa		Quanto maior a disponibilidade de processos necessários, maior a nota
Existência de colaboradores com conhecimento de <i>design</i> para manufatura aditiva		Quanto maior o conhecimento existente, maior a nota
Existência de colaboradores com conhecimento de operação de máquinas de manufatura aditiva		Quanto maior o conhecimento existente, maior a nota
Existência de colaboradores com conhecimento de manutenção de máquinas de manufatura aditiva		Quanto maior o conhecimento existente, maior a nota
Requerimentos contratuais de clientes		Quanto mais requerimentos impeditivos houver, menor a nota
Problemas de contratação de funcionários qualificados		Quanto mais dificuldade neste ponto houver, menor a nota
Contratos de manutenção com equipamentos existentes		Quanto mais contratos substanciais houver, menor a nota
Contrato de fornecimento de matéria prima existentes		Se houver contrato substancial, menor a nota

Fonte: Elaborada pelo autor

A avaliação das variáveis deve ser realizada por colaboradores capacitados a responder tais questionamentos. Caso seja necessário, devem ser envolvidos outros colaboradores para esse passo além dos usuários do modelo, para que as avaliações reflitam efetivamente a situação da empresa. A lógica de interpretação dos resultados deve ser a de que notas altas representam que a empresa possui, em maior grau, as competências necessárias para a adoção da manufatura aditiva como um de seus processos produtivos, enquanto notas baixas indicam que a empresa não possui ou possui em menor grau as competências necessárias para a adoção da manufatura aditiva como um de seus processos produtivos.

4.6. Avaliação das tecnologias

A avaliação das tecnologias consiste na escolha da tecnologia de manufatura aditiva mais adequada para a empresa, de acordo com suas necessidades. Cada

tecnologia tem características técnicas distintas e de grande especificidade técnica. As principais tecnologias conhecidas são apresentadas na revisão bibliográfica.

Essa avaliação deve levar em conta a especificação de cada tipo de máquina disponível no mercado e as características da peça que se deseja produzir. A partir do levantamento dessas informações devem ser identificadas as tecnologias capazes de fabricar a peça desejada.

Para avaliar as tecnologias capazes de fabricar a peça desejada, é necessário obter os dados técnicos de materiais da peça, suas dimensões e as necessidades da utilização final da peça, como resistência e resiliência. Utilizando tais requisitos técnicos é possível então selecionar as tecnologias de manufatura aditiva mais apropriadas para fabricar a peça.

Para realizar essa avaliação das tecnologias recomenda-se a utilização de um banco de dados que contenha as tecnologias, suas capacidades de fabricação, os materiais com os quais cada tecnologia consegue trabalhar e as utilizações que podem ser dadas as peças fabricadas por meio de cada tecnologia. Foi construída uma base de dados para auxiliar nessa atividade (Tabela 15).

Tal banco de dados foi construído com base na literatura estudada, que incluiu publicações acadêmicas e catálogos de fornecedores e prestadores de serviços.

Tabela 15 - Banco de dados de tecnologias para seleção

Tecnologia	Natureza do objeto fabricado	Material	Utilizações
<i>Stereolithography(SLA)</i>	Peças finais	Polímeros fotossensíveis	Protótipos
	Moldes	Polímeros fotossensíveis	Moldes poliméricos para <i>investment casting</i>
		Zircônia; Sílica; Alumina	Moldes cerâmicos para <i>sand casting</i>
<i>Multi-jet Modeling (MJM)</i>	Peças finais e moldes	Acrílico fotossensível; Plástico; Cêra	Protótipos, moldes não industriais
<i>Rapid Freezing Prototyping (RFP)</i>	Peças finais e moldes	Água	Protótipos, moldes não industriais
<i>Modelação por extrusão de plástico (FDM)</i>	Peças finais	Termoplásticos	Protótipos, moldes não industriais
	Moldes	Alumina; PZT; Zircônia; Sílica	Moldes cerâmicos para <i>investment casting</i>
<i>Robocasting</i>	Peças finais	Pasta cerâmica	Protótipos
<i>Freeze-form Extrusion Fabrication (FEF)</i>	Peças finais	Pasta cerâmica; Água	Protótipos
<i>Sinterização seletiva a laser (SLS)</i>	Peças finais	Alumida; Fibra de carbono; PA 1101; PA2200/2201; PA 2221; PA2202; PA 2210; PA3200; PAEK; Poliestireno	Protótipos; Partes aeronáuticas; Partes motores automotivos; Peças especiais para a indústria em geral;
	Moldes	Alumina; Sílica; Zircônia; ZrB2; Grafita; outros grãos	Moldes cerâmicos para <i>sand casting</i>
		Poliamida 12; GF Polyamida; Poliestireno	Moldes poliméricos para <i>investment casting</i>
<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	Peças finais	Stainless steel 316L e 17-4PH; H13 tool steel; Aluminium Al-Si-12 e Al-Si-10; Titanium CP, Ti-6Al-4V e Ti-4Al-7Nb; Cobalt-chrome ASTM75; Inconel 718 e 625	Implantes médicos; Partes aeronáuticas; Partes de motores automotivos; Trocadores de calor; Peças especiais para indústria
	Moldes	Compostos cerâmicos	Moldes cerâmicos para <i>sand casting</i>
<i>Electron Beam Melting (EBM)</i>	Peças finais	Cobalt-chrome ASTM F75; Titanium Ti-6Al-4V, Grade 2;	Implantes médicos; Partes aeronáuticas; Partes automotivas
<i>Laser Metal Deposition (LMD)/ Laser Engineered Net Shaping (LENS)/ Direct Metal Deposition (DMD),</i>	Peças finais	Aluminium Al-Si-10Mg; Cobalt-chrome MP1 e SP2; Maraging Steel; Inconel 718 e 625; Stainless steel 17-4PH e 15-5PH; Titanium Ti-6Al-4V	Implantes médicos; Partes aeronáuticas; Partes de motores automotivos; Trocadores de calor; Moldes; Peças especiais para a indústria em geral
Impressão Tridimensional (3DP)	Peças finais	Polímeros, metais, cerâmica e outros pós	Protótipos; Ferramental para indústria
	Moldes	Zircônia; Sílica; Alumina; Ti3SiC2, Outros grãos	Moldes cerâmicos para <i>sand casting</i>
		Plásticos acrílicos; Cêra	Moldes poliméricos para <i>investment casting</i>
<i>Manufatura de objeto em lâminas (LOM)</i>	Protótipos	Papel, plástico, metal	Protótipos
	Moldes	Papel, plástico, metal	Moldes não industriais

Fonte: Elaborada pelo autor

Nesse passo deve ser realizado um ranqueamento das tecnologias, restando assim uma lista ordenada das tecnologias mais adequadas para fabricar a peça desejada.

Para realizar o ranqueamento das tecnologias foi desenvolvida uma técnica pelo autor deste trabalho, que pode ser melhor entendida consultando Mancanares et al. (2015). Tal técnica é considerada complementar ao presente trabalho, e é explicada de forma resumida na sequência.

A lógica de solução da técnica desenvolvida para ranquear as tecnologias é baseada no AHP (*Analytic Hierarquy Process*), e tem duas etapas: fatores restritivos, que eliminam máquinas não capacitadas para a fabricação; e seleção multicritério, que ranqueia as máquinas em ordem decrescente de adequação, sendo a primeira do ranking a mais adequada para fabricação de determinada peça. A Figura 24 mostra a lógica da seleção de máquinas de manufatura aditiva a partir de critérios de peças.

Figura 24- Lógica da seleção de máquinas de manufatura aditiva

Fonte: Adaptado de Mancanares et al. (2015)

A seleção de máquinas de manufatura aditiva compreende a definição de fatores restritivos para fabricação e a seleção multicritério, baseada em peso dos critérios. Os fatores restritivos da peça devem ser comparados com as máquinas existentes, e só as máquinas aprovadas nessa seleção avançam para o próximo passo de seleção multicritério. Os pesos definidos para os critérios da peça são utilizados na seleção multicritério para ranquear as máquinas seguindo a lógica AHP, sendo as melhores ranqueadas as mais adequadas para produzir determinada peça.

Em Mancanares et al. (2015) foi incluído o mesmo banco de dados apresentado no presente trabalho, com a diferença de que tal banco de dados apresenta maiores detalhamentos de cada máquina, como por exemplo as dimensões e os nomes de

fornecedores. Como exemplo, Mancanares et al. (2015) apresenta a seleção de tecnologias e máquinas para três peças: uma paleta de turbina, uma arruela e uma maquete de projeto arquitetônico.

4.7. Avaliação financeira

A avaliação financeira deve avaliar a viabilidade financeira da adoção da manufatura aditiva pela empresa.

É importante que este passo seja executado após a execução dos anteriores pois ele necessita de informações levantadas pelos passos cinco e seis, pois os resultados desses passos fornecem informações que devem impactar na avaliação financeira da adoção da manufatura aditiva.

Como resultado deste passo deverá ser obtida uma comparação financeira da adoção da manufatura aditiva com a manutenção do processo produtivo atual sem a adoção da manufatura aditiva.

A atividade de avaliação financeira é essencial no processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva, e consiste em avaliar os cenários financeiros pré e pós adoção da manufatura aditiva, como por exemplo o faturamento previsto com os produtos, os custos de operação e de manutenção, os riscos envolvidos e o investimento necessário. Deve ser feita então uma análise financeira da adoção da tecnologia.

A técnica de análise financeira para execução dessa atividade depende do que já é usualmente utilizado pela empresa. Cada empresa têm uma técnica já aceita e institucionalizada para avaliação financeira de novos projetos e, portanto, sugere-se que a avaliação financeira da adoção da manufatura aditiva seja feita utilizando as técnicas e critérios usuais da empresa.

Não obstante, é sugerida, a título de exemplo, a técnica de análise do valor presente do fluxo de caixa descontado para a avaliação financeira. Para isso é necessário levantar, em primeiro lugar, os valores do investimento, da operação e da manutenção das máquinas que estão sob avaliação junto aos fornecedores. Também é necessário estimar o faturamento previsto com a comercialização dos produtos fabricados utilizando o processo de manufatura aditiva. Para viabilizar uma comparação, deve-se obter os dados de custo de operação e custo de manutenção do processo produtivo atual e também a estimativa de faturamento previsto com a comercialização dos produtos. Caso a análise seja para um novo negócio que apenas

seja viável com a utilização da manufatura aditiva, os custos e o faturamento atuais serão iguais a zero. Em seguida, deve-se comparar este valor com o valor presente do processo atual.

Pode ser necessário considerar o ciclo de vida de utilização das peças. Por exemplo, peças mais leves utilizadas em aviões podem proporcionar benefício de redução de consumo de combustível durante toda a sua utilização. Para o fabricante da peça, isso pode representar maior valor de venda da peça para fabricantes de aeronaves. Para empresas aéreas operadoras de aviões, o reflexo pode ser o entendimento de que a aeronave tem maior valor, o que ajudaria a justificar o investimento necessário na adoção da tecnologia.

Não é objetivo deste trabalho discutir a elaboração de uma análise de valor presente pelo método do fluxo de caixa descontado, portanto a técnica sugerida nesse passo não será detalhada.

4.8. Decisão

O passo de decisão deverá utilizar como fontes de informação os resultados de todos os passos anteriores. Dessa forma, a execução do modelo proposto até o passo anterior deverá fornecer subsídio para a tomada de decisão sobre a adoção ou não da manufatura aditiva.

Assim, os resultados gerados nos passos anteriores devem ser reunidos e discutidos pela equipe executora do modelo, que deve chegar à uma conclusão sobre a adoção da manufatura aditiva. A forma de avaliar os resultados não é objetiva, e depende de uma análise qualitativa que deve ser realizada pela equipe usuária do modelo. No entanto, os resultados gerados já contemplam as principais informações necessárias para a tomada de decisão.

Como resultado deste passo têm-se a decisão de adotar ou de não adotar a manufatura aditiva na empresa.

Caso a decisão seja pela não adoção, a aplicação do modelo deve ser interrompida. Caso a decisão seja pela adoção, deve ser executado o próximo passo do modelo, que trata do planejamento para implementação.

Na sequência é apresentado o último passo do modelo, que trata do planejamento para adoção da manufatura aditiva.

4.9. Planejamento da adoção

A adoção da manufatura aditiva deve seguir um cronograma de projeto definido para contato com fornecedores das máquinas, aquisição das máquinas, instalação, operação assistida e, por fim, de operação sem assistência. Tal cronograma deve prever um prazo de aproximadamente seis meses desde o início dos contatos até a fase de operação, a depender dos trâmites burocráticos para viabilizar a compra do equipamento pela empresa. Tal prazo foi estimado por meio de contatos com fornecedores, realizado ao longo da execução deste trabalho.

A atividade deste passo é a de definição de atividades críticas para que a adoção da manufatura aditiva seja realizada de maneira eficaz e eficiente. O modelo proposto contempla uma sugestão de atividades críticas para cumprir essa atividade. A adoção da tecnologia selecionada é tratada apenas pelo modelo de Efstathiades, Tassou e Antoniou (2002), dentre os quatro modelos base estudados. Dessa forma, foi utilizado tal modelo para definição das atividades críticas deste passo.

Assim, na execução do passo de planejamento da adoção recomenda-se estruturar e acompanhar as seguintes atividades críticas para garantir o sucesso do processo de adoção da tecnologia:

1. Supervisão operacional contínua;
2. Planejamento de recursos humanos;
3. Ajustes contínuos na operação;
4. Medição contínua e controle com base em indicadores;
5. Alocação de recursos para treinamento e supervisão;
6. Apoio do fabricante da máquina;
7. Treinamento dos funcionários;
8. Conhecimento técnico da tecnologia;
9. Melhorias realizadas nos indicadores de produtividade e nos procedimentos de produção;
10. Definição de indicadores de produtividade para avaliar a implementação da tecnologia.

Dessa forma, conclui-se a apresentação do modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado. O próximo capítulo apresenta a avaliação do modelo.

5. Avaliação do modelo

Na avaliação do modelo optou-se pela realização de três entrevistas com especialistas.

O primeiro passo para a realização das entrevistas foi a escolha dos especialistas a serem entrevistados. Com base nos critérios previamente estabelecidos (seção 3.2.4) o Especialista A, Especialista B e Especialista C foram selecionados.

O Especialista A é formado e pós-graduado (mestrado, doutorado e pós-doutorado) em engenharia mecânica. É pesquisador há mais de 11 anos na área de manufatura aditiva, prototipagem rápida, bioengenharia e modelagem BioCAD 3D e trabalha por igual período em um instituto de tecnologia que utiliza manufatura aditiva para atender interesses da indústria e da saúde.

O Especialista B também é formado e pós-graduado (mestrado, doutorado e pós-doutorado) em engenharia mecânica. É docente há mais de 16 anos na área de engenharia mecânica e pesquisador na área de manufatura aditiva.

O Especialista C é formado em engenharia de produção e cursa pós-graduação na mesma área. É pesquisador na área de Indústria 4.0 com foco na implementação de manufatura aditiva.

O protocolo de entrevista foi descrito no método de pesquisa, e inclui informações sobre como foram agendadas e estruturadas as entrevistas.

As entrevistas de avaliação foram baseadas em um roteiro previamente elaborado. Tal roteiro é composto de duas partes. A primeira parte da entrevista consiste na apresentação, pelo entrevistador, tanto da lógica do modelo proposto como das atividades propostas em cada passo do modelo. Na primeira parte são debatidos a pertinência de cada atividade, fator e variável selecionadas e a necessidade de atividades adicionais. A segunda parte contempla três questões abertas para discussão. A primeira questão verifica as vantagens do modelo proposto em relação aos modelos tradicionais de avaliação para adoção de tecnologias de manufatura avançada. A segunda questão, trata das desvantagens do modelo proposto. Por fim, a terceira questão discute a aplicabilidade do modelo proposto na prática.

As entrevistas foram precedidas da preparação dos entrevistados. Neste sentido, os entrevistados receberam previamente um conjunto de informações

referentes à entrevista, contendo o roteiro, um resumo descritivo do modelo proposto para avaliação para adoção da manufatura aditiva e a descrição dos parâmetros utilizados no modelo.

Durante a entrevista, foram discutidas as etapas do modelo e os parâmetros. Os dados coletados durante as entrevistas estão sistematizados na Tabela 16, que é organizada em três colunas que resumem as vantagens, as desvantagens e a aplicabilidade do modelo na indústria.

Tabela 16 - Resultados das entrevistas de avaliação do modelo proposto

Questão	Principais pontos levantados	Especialista		
		A	B	C
Vantagens	Contém uma grande quantidade de informações relevantes para serem utilizadas pela indústria.	x	x	x
	Auxilia na aproximação do que é estudado com o que é utilizado na indústria, quebrando mitos sobre a tecnologia e limitações de acesso à informação.		x	
	Possibilita empresas adiantarem sua escolha, ao invés de esperarem fornecedores e concorrentes pressionarem.	x		
	Gerar resultados que podem embasar com segurança uma política de estado para desenvolvimento da tecnologia.	x		
	Possibilidade de diferenciar os diversos tipos de aplicação da manufatura aditiva.			x
	Traz indicadores para comparar aspectos não financeiros.	x	x	x
	As informações reunidas podem apoiar indústrias, governos e também empresas nascentes.	x		
Desvantagens	Tem limitações de tipos de indústria e tipos de negócio que podem utilizá-lo.	x		
	Não prevê o cruzamento de tecnologias no processo produtivo (utilizar mais de uma tecnologia para produzir uma peça).	x		
	Depende da institucionalização da utilização de certas ferramentas para executar o processo proposto.	x	x	
	A avaliação financeira não é detalhada, embora seja especialmente relevante na decisão das empresas.			x

Aplicabilidade na indústria	Pode ser aplicado, considerando as limitações de tipos de indústria.	x	x	x
	Com a maior mobilização da indústria para utilização de produtos que necessitam da manufatura aditiva, torna-se necessário atender novas demandas, e modelo ganha relevância.		x	
	Se houver reversão da tendência de produção em baixa escala para a produção em alta escala, o modelo não atenderá a indústria.		x	
	Considerando que a evolução da manufatura aditiva com utilização de peças finais se dará por volta de 2020, este modelo ganhará cada vez mais importância.		x	x
	Aplicável de imediato em indústrias que buscam flexibilização e customização da produção e também na fase de projeto do produto.	x	x	x

Fonte: Elaborada pelo autor

As principais vantagens do modelo proposto citadas nas entrevistas estão ligadas à grande quantidade de informações relevantes reunidas. Na visão dos entrevistados, as informações reunidas podem apoiar indústrias, governos e também empresas nascentes.

O apoio às indústrias ocorre na avaliação para adoção da manufatura aditiva em seu processo produtivo, alinhado com o objetivo principal do trabalho. Os indicadores propostos e o banco de dados de tecnologias foram citados como as maiores vantagens da utilização do modelo pela indústria. A lógica do modelo não foi citada como uma vantagem, enquanto as justificativas, as estratégias competitivas, as competências e o planejamento para implementação foram vistos como vantagens da utilização do modelo, que contempla fatores relevantes dentro destas dimensões.

Foi mencionado pelo *Especialista A* que o modelo proposto também pode servir de subsídio para a formulação de políticas de estado, trazendo segurança aos gestores públicos para desenvolver políticas de fomento à manufatura aditiva, pois contém uma grande quantidade de informações que mostram a relevância das tecnologias aditivas para o desenvolvimento industrial.

Ainda dentre as vantagens, foi mencionada a possibilidade de utilização do modelo por empresas nascentes (*Especialista A*). A tendência observada é a de surgimento de empresas prestadoras de serviços de manufatura aditiva, que utilizam essa tecnologia como espinha dorsal do negócio e o modelo prevê tais utilizações.

Dentre as principais desvantagens da utilização do modelo estão as limitações de tipos de indústria e tipos de negócio (*Especialistas A, B e C*). A manufatura aditiva

é recomendada apenas a certos tipos de indústria, com características muito específicas de negócio. Portanto, o modelo se restringe a indústrias de produção de peças em baixo volume e de alto valor agregado, que possuam desenvolvimento de produtos dentre suas atividades ou ainda que desejem distribuir geograficamente sua produção.

Outra desvantagem citada está a necessidade de institucionalização de certas ferramentas para a completa utilização do modelo (*Especialistas A e B*). Adicionalmente, o modelo não prevê o cruzamento de tecnologias, ou seja, como resultado da aplicação do modelo não está prevista a fabricação de peças utilizando múltiplas tecnologias em conjunto. Além disso, outra desvantagem é o não detalhamento da avaliação financeira pelo modelo (*Especialista C*).

Em relação à aplicabilidade do modelo, os entrevistados citaram que o maior potencial de aplicação imediata é para empresas que realizam desenvolvimento de produtos, empresas que desejam flexibilizar, customizar ou distribuir geograficamente a produção, empresas que possam utilizar a manufatura aditiva como processo auxiliar e empresas nascentes que desejam atender o mercado crescente de peças que somente podem ser fabricadas utilizando tecnologias aditivas de manufatura.

Foram apontadas pelos especialistas, durante as entrevistas, quatro formas de utilização do modelo que são delineadas por quatro tipos de negócio nos quais a manufatura aditiva poderia ser adotada e, por consequência, o modelo poderia ser aplicado para decidir sobre essa adoção.

Foi sugerido que o modelo contemplasse, em um de seus passos, tais formas de utilização, que se configuram em quatro necessidades diferentes de empresas para as quais o modelo é aplicável. Assim, o modelo foi aperfeiçoado com a adição de um passo inicial, que é o passo de Avaliação das necessidades. O modelo apresentado já incorpora essa mudança. Seguem as quatro aplicações discutidas, que foram traduzidas em necessidades:

1. Empresas que realizam atualmente ou necessitam realizar atividades de desenvolvimento de produtos (*Especialista B*) – O modelo tem aplicabilidade imediata para estes tipos de empresa, uma vez que as deficiências do modelo (e.g. falta de detalhamento da avaliação financeira, necessidade de institucionalização de ferramentas) têm menor relevância para empresas que desejam utilizar a manufatura aditiva no desenvolvimento de produtos. Os impactos negativos da adoção da

manufatura aditiva para essa utilização são inexistentes para o processo produtivo da empresa e o investimento é baixo. Portanto, o modelo pode ser usado de maneira ágil, uma vez que ele impactaria apenas o desenvolvimento de produtos.

2. Empresas que necessitam ou desejam utilizar serviços de manufatura aditiva para manutenção ou solução de problemas (*Especialista A*) – O modelo auxilia empresas que enxergam a manufatura aditiva como importante, mas não desejam quebrar o paradigma que envolve o investimento em equipamentos e qualificações. Tais empresas têm necessidade de utilização da manufatura aditiva para obter moldes com menos gasto material em seu processo produtivo ou trabalhar com peças de complexidade que só podem ser produzidas com essas tecnologias, mas utilizariam prestadores de serviço de manufatura aditiva para obter as peças necessárias. Essas empresas podem utilizar apenas partes do modelo, sendo que as informações detalhadas de cada dimensão são mais importantes do que a lógica de avaliação do modelo.

3. Empresas que necessitam ou estão dispostas a utilizar a manufatura aditiva como uma de suas tecnologias de chão de fábrica (*Especialista A*) – O modelo também auxilia empresas que investiram em equipamentos e qualificação dos funcionários. As necessidades dessas empresas exigem que a manufatura aditiva seja um processo internalizado e, portanto, compromete recursos, matéria-prima específica, competências específicas, indicadores específicos e implementação específica. Nessas empresas, o modelo tem aplicabilidade mais ampla, e deve ser utilizado para decidir pela integração da manufatura aditiva aos processos produtivos tradicionais existentes.

4. Empresas que necessitam ou desejam utilizar manufatura aditiva como tecnologia chave do seu processo produtivo (*Especialista A*) – O modelo pode ser usado por empresas nascentes que desejam basear seu negócio em produtos de manufatura aditiva. Tais empresas necessitam estruturar toda a lógica do negócio em torno das dimensões que envolvem a manufatura aditiva. Nesses casos, o modelo pode ser aplicado como um teste do plano de negócios da empresa, que deve então avaliar se é viável ou não a criação desse negócio.

Ainda durante as entrevistas cada passo do modelo foi avaliado, sendo que foram propostas mudanças no passo de avaliação das justificativas. Tais mudanças se constituem de sugestões de retirar justificativas pouco ou não pertinentes e

adicionar justificativas não listas inicialmente (Tabela 17). O modelo apresentado neste trabalho já incorpora tais mudanças (Tabela 9 da seção 4.2).

Tabela 17 - Alterações sugeridas por especialistas nas justificativas do modelo original

Categoria	Modificação	Justificativa	Detalhamento	Especialista		
				A	B	C
Melhoria na flexibilidade	Remover da lista	Diminuição do tempo de <i>setup</i>	A integração da máquina com o computador permite fabricar a partir de um arquivo, agilizando o tempo de <i>setuo</i> da máquina	x		
Melhoria na qualidade	Remover da lista	Menor taxa de defeitos	Processo controlado por computador garante menor taxa de defeitos	x		x
	Remover da lista	Redução de custos de inspeção	Processo controlado por computador garante menor taxa de defeitos	x		
	Remover da lista	Melhoria na precisão	Processo controlado por computador permite maior precisão	x	x	
Melhoria no custo de produção	Remover da lista	Menor custo de mão de obra	Redução do número de funcionários para produção	x	x	x
	Remover da lista	Menor custo com matéria-prima	Utilização apenas do material necessário para a peça	x	x	x
	Remover da lista	Menor gasto com serviços auxiliares	Redução do número de processos necessários	x	x	x
	Remover da lista	Menor utilização de espaço	Redução do número de processos necessários reduz o número de máquinas necessárias	x		
Atingir objetivos estratégicos	Remover da lista	Aumento no cumprimento de objetivos estratégicos	Tecnologia pode ajudar a alcançar objetivos	x	x	x
Melhorias de vendas	Remover da lista	Aumento das vendas	Atendimento a mercado com necessidades específicas	x	x	
	Remover da lista	Aumento do <i>market share</i> do mercado alvo	Melhoria na satisfação dos consumidores	x		
	Remover da lista	Diminuição de defeitos	Processo controlado por computador garante menor taxa de defeitos	x	x	x
Oportunidades de mercado	Adicionar à lista	Melhoria na flexibilidade de resposta	Responder demanda de novo negócio mais rapidamente, mesmo sem ter o processo desenhado	x	x	
Melhoria da operação da produção	Remover da lista	Ordens de produção integradas	Processo integrado por computador	x		

Fonte: Elaborada pelo autor

A discussão das vantagens, desvantagens e do potencial de aplicação do modelo proposto para o processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria encerra a apresentação dos resultados desta pesquisa. No próximo capítulo são discutidos os resultados obtidos.

6. Conclusões do trabalho

Este trabalho teve como pergunta de pesquisa a seguinte questão: *Como conduzir a avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado?* Para responder à pergunta de pesquisa, identificou-se a necessidade de atendimento a seis objetivos específicos, descritos na seção 1.2. Os resultados que atendem a cada objetivo específico são partes do modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado. Dessa forma, considera-se que a pergunta de pesquisa foi respondida com o modelo proposto.

O modelo foi desenvolvido a partir de um levantamento bibliográfico, que incluiu a revisão bibliométrica sistemática para identificar e selecionar modelos base para o desenvolvimento do modelo proposto, o estudo detalhado de quatro modelos de avaliação de adoção de tecnologias avançadas de manufatura, a revisão bibliométrica sistemática exploratória sobre manufatura aditiva e o estudo detalhado de cada dimensão identificada nesta segunda revisão bibliométrica sistemática para consolidar o conhecimento do tema principal deste trabalho, a manufatura aditiva.

Após a avaliação com especialistas, conclui-se que o modelo pode apoiar empresas condução da avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado.

O modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado é constituído de nove passos essenciais para decidir sobre a adoção ou a não adoção da manufatura aditiva. Além de o modelo apoiar a avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado, o processo de construção do modelo permitiu que outros objetivos específicos fossem atendidos, gerando resultados adicionais ao modelo em si.

A relação entre os objetivos específicos do trabalho e os resultados obtidos é apresentada na Tabela 18. Cada um dos objetivos específicos e resultados do trabalho são discutidos em seguida.

Tabela 18 - Relação entre objetivos específicos do trabalho e resultados obtidos

Pergunta de pesquisa	Objetivos específicos	Resultado
<i>Como apoiar a avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado?"</i>	Identificar principais justificativas para adoção de tecnologias avançadas de manufatura	Passo 2 modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva (Seção 4.2)
	Identificar e selecionar processos de adoção de tecnologia de manufatura avançada na indústria	Revisão bibliográfica sistemática - Adoção de AMT (Seção 2.1)
	Identificar principais variáveis necessárias para avaliar a adoção de tecnologias de manufatura avançada	Atividades do modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva (capítulo 4)
	Avaliar principais características da manufatura aditiva	Revisão bibliográfica sistemática - Manufatura aditiva (Seção 2.2)
	Desenvolver modelo de processo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado	Modelo de processo de avaliação para adoção de manufatura aditiva (Capítulo 4)
	Avaliar a adequação do modelo desenvolvido	Avaliação do modelo (Capítulo 5)

Fonte: Elaborada pelo autor

A pesquisa gerou, até o momento de seu término, resultados acadêmicos e resultados práticos. Os resultados acadêmicos incluem cinco publicações (Zancul et al., 2016; Mancanares et al., 2015; Mancanares, Zancul e Miguel, 2015; Mancanares et al., 2013; Mancanares, Zancul e Cauchick, 2013). Os resultados práticos se referem aos resultados gerados para utilização comercial, como a construção de base de dados de tecnologias e a descrição de aplicações conhecidas para a manufatura aditiva, as quais incluem fornecedores, máquinas e materiais conhecidos.

Particularmente, o método de avaliação apresentado neste trabalho pode ser aplicado em conjunto com o método de seleção de tecnologias apresentado por Mancanares et al. (2015), de forma sequencial. Ou seja, aplica-se o modelo apresentado neste trabalho para direcionamento macro sobre a adoção de manufatura aditiva. Em seguida, o método citado, baseado em AHP, pode ser aplicado para a seleção de uma tecnologia específica (dentre as descritas na seção 4.6) e uma máquina para produção de uma dada peça, dadas as suas características geométricas, de material e de acabamento, dentre outras. Como exemplo, Mancanares et al. (2015) apresentam a seleção de tecnologias e máquinas para três peças: uma paleta de turbina, uma arruela e uma maquete de projeto arquitetônico.

Como limitação, a pesquisa se limitou à proposição conceitual do modelo de processo, carecendo de validação de aplicação prática do modelo proposto em uma situação real de empresa.

A partir das conclusões da pesquisa, são discutidas na sequência sugestões de trabalhos futuros.

A discussão sobre trabalhos futuros envolve três frentes diferentes: (i) evolução da literatura; (ii) teste e validação prática dos parâmetros; (iii) aplicação do modelo.

A literatura sobre manufatura aditiva e sobre a avaliação para adoção de AMTs é base para construção do modelo proposto. Dessa forma, a evolução da literatura pode contribuir para aprimoramento do modelo atual, levando a uma construção diferente da proposta nesta pesquisa. Considera-se, portanto, que trabalhos futuros podem aprimorar o modelo de acordo com as novas descobertas da área, alterando tanto os elementos utilizados como os modelos base, podendo inclusive alterar as dimensões e atividades do modelo proposto.

Os elementos utilizados em cada passo do modelo também podem gerar novos trabalhos. A partir dos elementos propostos podem ser desenhados experimentos de teste e validação prática nas indústrias de alto valor agregado que utilizam manufatura aditiva em seus processos produtivos. Ainda, a partir dos elementos definidos para as indústrias de alto valor agregado, podem ser testados como estes elementos se comportam no caso de indústrias de outros setores distintos.

Por fim, o modelo de avaliação para adoção da manufatura aditiva na indústria de alto valor agregado pode ser estudado em casos de aplicação prática, podendo validar a adequação do modelo em uma necessidade real da indústria.

Referências Bibliográficas

Abdul-Gader, A., e Kozar, K. The impact of computer alienation on information technology investment decisions: an exploratory cross-national analysis. *MIS Quarterly*, 19(4), pp. 535-60, 1995.

Abe, F. et al. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 111, pp. 210–213, 2001.

Ahn, S. H. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8, pp. 248-257, 2002.

Allahverdi, M. et al. Processing of advanced electroceramic components by fused deposition technique. *Journal of the European Ceramic Society*, 21, pp. 1485-1490, 2001.

Allen, S. M., Sachs, E. M. Three-dimensional printing of metal parts for tooling and other applications. *Metals and Materials*, 6, pp. 589–594, 2000.

ARCAM. Acesso em 06 de maio de 2014, disponível em <http://www.arcam.com/>. 2014

Ariss, S., Raghunathan, T., e Kunnathar, A. Factors affecting the adoption of advanced manufacturing technology in small firms. *S.A.M. Advanced Management Journal*, 65 (2), pp. 14-29, 2000.

ARTIS. Tecnologias de prototipagem: Estereolitografia (SLA). Acesso em 30 de Agosto de 2012, disponível em Clínica de Odontologia Integrada Artis: <http://www.artis.com.br>. 2012.

Balla, V. K., Bose, S., Bandyopadhyay, A. Processing of bulk alumina ceramics using laser engineered net shaping. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 5, pp. 234-242, 2008.

Balla, V. K. et al. Fabrication of compositionally and structurally graded Ti-TiO₂ structures using laser engineered net shaping (LENS). *Acta Biomaterialia*, 5, pp. 1831–1837, 2009.

Bourell, D., Leu, M. e Rosen, D. Identifying the Future of Freeform Processing. Roadmap for Additive Manufacturing. Austin: The University of Texas, 2009.

Boyer, K. L. Unlocking the potential of advanced manufacturing technologies. *Journal of Operations Management*, 15, pp. 331-347, 1997.

Boyer, K., e Pagell, M. Measurement issues in empirical research: improving methods of operations strategy and advanced manufacturing technology. *Journal of Operations Management*, 18, pp. 361-374, 2000.

Brandyberry, A., Rai, A., e White, G. Intermediate performance impacts of advanced manufacturing technology: an empirical investigation. *Decision Sciences*, 30(4), pp. 993-1020, 1999.

Brewerton, P., Millward, L. *Organisational Research Methods*. Great Britain: Sage Publications Ltd, 2001.

Brown, S. Managing process technology—further empirical evidence from manufacturing plants. *Technovation*, 21(8), pp. 467-478, 2001.

Carter, C., Easton, P. L. Sustainable supply chain management: evolution and future directions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 41, pp. 46-62, 2011.

Carter, W. To invest in new technology or not? New tools for making the decision. *Journal of Accountancy*, 173(5), pp. 58-64, 1992.

Caulfield, B., McHugh, P. E., Lohfeld, S. Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process. *Journal of Materials Processing Technology*, 182, pp. 477–488, 2007.

Chan, F., Chan, M. e Tang, N. Evaluation methodologies for technology selection. *Journal of Material Processing Technology*, 107, pp. 330-337, 2000.

Cheah, C. M. et al. Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, pp. 308-320, 2005.

Chen, I., Small, M. Implementing Advanced Manufacturing Technology: An Integrated Planning Model. *International Journal of Management Science*, 22, pp. 91-103, 1994.

_____. Planning for advanced manufacturing technology: a research framework. *International Journal of Operations & production management*, 16(5), pp. 4-24, 1996.

Choi, J., Han, L., e Hua, Y. Modeling and experiments of laser cladding with droplet injection. *Journal of heat transfer-transactions of the asme*, 127, pp. 978-986, 2005.

Chua, C., Leong, K., Lim, C. Rapid Prototyping: Principles and Applications. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2010.

Co, H., Patuwo, B., e Hu, M. The human factor in advanced manufacturing technology adoption – an empirical analysis. *International Journal of Operations & Production Management*, 18(1), pp. 87-106, 1998.

Cook, J., e Cook, L. Achieving competitive advantages of advanced manufacturing technologies. *Benchmarking for Quality Management & Technology*, 1(2), pp. 42-63, 1994.

Cormier, D., Harrysson, O., West, H. Characterization of H13 steel produced via electron beam melting. *Rapid Prototyping Journal*, 10, pp. 35-41, 2004.

Cormier, D. et al. Characterization of thin walled Ti-6Al-4V components produced via electron beam melting. In: *Proceeding of Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX, 2004.

Crowther, M., Cook, D. Trials and tribulations of systematic reviews and meta-analysis. *Hematology*, pp. 493-507, 2007.

CRP. Acesso em 06 de maio de 2014, disponível em <http://www.crp.eu>. 2014

Dane, F. *Research Methods*. Los Angeles, CA: Brooks/Cole Pub. Co. California University, 1990.

Dean, J., Yoon, S., e Susman, G. Advanced manufacturing technology and organization structure: empowerment or subordination? *Organization Science*, 3, pp. 203-229, 1992.

Dimitrov, D., Schreve, K., Beer, N. Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives. *Rapid Prototyping Journal*, 12, pp. 136-147, 2006.

Dinda, G. P. Dasgupta, A. K.; Mazumder, J. Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability. *Materials science and engineering*, 509, pp. 98-104, 2009.

Domack, M. e Baughman, J. Development of nickel-titanium graded composition components. *Rapid prototyping journal*, 11, pp. 41-51, 2005.

Dufaud, O., Corbel, S. Stereolithography of PZT ceramic suspensions. *Rapid Prototyping Journal*, 8, pp. 83-90, 2002.

Efstathiades, A., Tassou, S., Antoniou, A. Strategic planning, transfer and implementation of Advanced Manufacturing Technologies (AMT). Development of an integrated process plan. *Technovation*, 22, pp. 201-212, 2002

Elbertsen, L., e van Reekum, R. To ERP or not to ERP? Factors influencing the adoption decision. *International Journal of Management and Enterprise Development*, 5(3), pp. 310-330, 2008.

EOS. Acesso em 06 de maio de 2014, disponível em <http://www.eos.info/en>. 2014.

Fink, A. Conducting research literature reviews: From paper to the Internet. Thousand Oaks, CA: Sage, 2005.

Gasser, A. et al. Laser additive manufacturing: laser metal deposition (LMD) and selective laser melting (SLM) in turbo-engine applications. *Laser Material Processing*, 2, pp. 58-63, 2010.

GE. Acesso em 09 de maio de 2014, disponível em <http://www.3ders.org/articles/20130611-ge-challenges-makers-to-design-jet-engine-parts-3d-print-complex-components.html>. 2014.

Georgakellos, D. Technology selection from alternatives: a scoring model for screening candidates in equipment purchasing. *International Journal of Innovation Technology Management*, 2(1), pp. 1-18, 2005

Giannatsis, J., Dedoussis, V. Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, pp. 116-127, 2009.

Goldsberry, C. Rapid change in additive manufacturing landscape. *Plastic Today*, pp. <http://www.plasticstoday.com/articles/rapid-change-additive-manufacturing-landscape>, 2009.

Goodridge, R. D., Dalgarno, K. W., Wood, D. J. Indirect selective laser sintering of an apatite-mullite glass-ceramic for potential use in bone replacement applications. *Journal of engineering in medicine*, 220, pp. 57-68, 2006.

Gorni, A. Introdução à Prototipagem Rápida e Seus Processos. *Revista Plástico Industrial*, 31, pp. 230-239, 2001.

Guo, N., Leu, M. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. . *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013.

Han, L., Liou, F., Phatak, K. Modeling of laser cladding with powder injection. *Metallurgical and materials transactions b-process metallurgy and materials processing science.*, 35, pp. 1139-1150, 2004

Harrysson, O. et al. Direct metal fabrication of titanium implants with tailored materials and mechanical properties using electron beam melting technology. *Materials Science and Engineering C*, pp. 28(3): 366–373, 2008.

He, Y., Ye, M., Wang, C. A method in the design and fabrication of exact-fit customized implant based on sectional medical images and rapid prototyping technology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, pp. 504-508, 2006.

Heinl, P. et al. Cellular titanium by selective electron beam melting. *Advanced Engineering Materials*, 9, pp. 360-364, 2007.

_____. Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting. *Acta Biomaterialia*, 4, pp. 1536-1544, 2008.

Hofmanna, C., e Orr, S. Advanced manufacturing technology adoption—the German experience. *Technovation*, 25, pp. 711-724, 2005.

Hu, D., Kovacevic, R. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. *International journal of machine tools & manufacture*, 43, pp. 51-60, 2003.

Huang, S., Liu, P., Mokasdar, A. Additive manufacturing and its societal impact. *International Journal of Advanced Manufacturing*, 67, pp. 1191–1203, 2013.

Huang, T. et al. Aqueous based freeze-form extrusion fabrication of alumina components. *Rapid Prototyping Journal*, 15, pp. 88-95, 2009.

Ilyas. 3D Machine Vision and Additive Manufacturing: Concurrent. *Materials Science and Engineering* , pp. 20-29, 2013.

Jonsson, P. An empirical taxonomy of advanced manufacturing technology. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(12), pp. 1446-1474, 2000.

Karlsson, C. *Researching Operations Management*. New York: Routledge. 2009.

Kobryn, P., Semiatin, S. The laser additive manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of the minerals metals & materials society*, 53, pp. 40-42, 2001.

Kolbe, R., Burnett, M. S. Content-analysis research: An examination of applications with directives for improving research reliability and objectivity. *Journal of Consumer Research*, pp. 243-250, 1991.

Kotha, S. Strategy, manufacturing structure and advanced manufacturing technology. *Best Paper Proceedings, National Conference of the Academy of Management*, 293-297, 1991.

Kotha, S., e Swamidass, P. Strategy, advance manufacturing technology and performance: empirical evidence from U.S. manufacturing firms. *Journal of Operations Management*, pp. 255-277, 2000.

Kruth, J. P. et al. Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, pp. 616-622, 2004.

_____. Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques. In: *Proceedings of International Conference. Polymers & Moulds Innovations (PMI)*. Gent: Belgium, 2005.

_____. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11, pp. 26-36, 2005b.

_____. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 56, pp. 730-759, 2007.

Kruth, J., Leu, M., Nakagawa, T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47, pp. 525-540, 1998.

Kumar, S., Kruth, J. P. Composites by rapid prototyping technology. *Materials & Design*, 31, pp. 850-856, 2010.

Kumar, V. M. An investment decision process the case of advanced manufacturing technologies in Canadian manufacturing firms. *International Journal of Production Research*, 34(4), pp. 947–958, 1996.

Lam, C. X. et al. Scaffold development using 3D printing with a starch-based polymer. *Materials Science and Engineering C*, 20, pp. 49-56, 2002.

Lee, M., Dunn, J. C., Wu, B. M. Scaffold fabrication by indirect three-dimensional printing. *Biomaterials*, 26, pp. 4281-4289, 2005.

Lefley, F. An assessment of various approaches for evaluating project strategic benefits: recommending the strategic index. *Management Decision*, 42(7), pp. 850-862, 2004.

Leu , M. Rapid freeze prototyping. *Materials World Journal*, pp. 9-11, 2000.

Leu, M., Zhang, W., Sui, G. An experimental and analytical study of ice part fabrication with rapid freeze prototyping. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 49, pp. 147-150, 2000.

Levy, G. N. The role and future of the Laser Technology in the Additive Manufacturing environment. *Physics Procedia*, 5, pp. 65-80, 2010.

Levy, G., Schindela, R., Kruth, J. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (lm) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52, pp. 589-609, 2003.

Lewis, G. K., Schlienger, E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. *Materials & Design*, 21, pp. 417-423, 2000.

Liao, Y. S., Li, H. C., Chiu, Y. Y. Study of laminated object manufacturing with separately applied heating and pressing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27, pp. 703-707, 2006.

Lindberg, P. Management of uncertainty in AMT implementation: the case of FMS. *Logistics Information Management*, 7(5), pp. 10-21, 1994.

Lipson, H., Malone, E. Autonomous self-extending machines for accelerating space exploration. Ithaca, NY: Cornell University, 2002.

Liu, H., Leu, M. Liquid phase migration in extrusion of aqueous alumina paste for freeze-form extrusion fabrication. *International Journal of Modern Physics B*, 23, pp. 1861-1866, 2009.

Liu, H., Leu, M. Research on extrusion velocity in freeform extrusion fabrication of aqueous alumina paste. *Key Engineering Materials*, pp. 125-128, 2009b.

Liu, Q., Leu, M., Schmitt, S. Rapid prototyping in dentistry: technology and application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29, pp. 317-335, 2006.

Liu, Q., Sui, G., Leu, M. Experimental study on the ice pattern fabrication for the investment casting by rapid freeze prototyping. *Computers in Industry*, 48, pp. 181-197, 2002.

Lu, L. et al. In situ formation of TiC composite using selective laser melting. *Materials Research Bulletin*, 35, pp. 1555-1561, 2000.

Luo, Y. et al. Environmental performance analysis of solid freeform fabrication processes. *The 1999 IEEE Int Symp on Electron and the Environ* (pp. 1-6). New York: IEEE, 1999.

Mancanares, C. G. ; DE S. ZANCUL, E. ; CAVALCANTE DA SILVA, J. ; CAUCHICK MIGUEL, P. A. . Additive manufacturing process selection based on parts selection criteria. *International Journal, Advanced Manufacturing Technology*, v. 80, p. 1007-1014, 2015.

Mancanares, C. G. ; ZancuL, E. S. ; Miguel, P. A. C. . Sustainable Manufacturing Strategies: A Literature Review on Additive Manufacturing Approach. *Product (IGDP)*, v. 13, p. 47-56, 2015

Mancanares, C. G. ; Silva, J. C. ; ZancuL, E. S. ; Cauchick, P. A. M. . Proposta de um método de seleção do processo de prototipagem rápida para fabricar uma peça a partir de especificações técnicas. In: XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2013, Salvador. Anais, 2013.

Mancanares, C. G. ; Zancul, E. S. ; Cauchick, P. A. M. . Projeto e implantação de um ambiente de desenvolvimento de produtos para uso em cursos de graduação em engenharia. In: XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE, 2013, Gramado. Anais, 2013.

Martinaa, F. et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer. . *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1377-1386, 2012.

Martins, J. Manufatura Rápida – Avaliação das tecnologias de impressão 3D e FDM na fabricação de moldes rápidos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlo, USP, São Carlos, 2005.

Mason, M. et al. Aqueous based extrusion of high solids loading ceramic pastes: process modeling and control. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, pp. 2946-2957, 2009.

Mazumder, J., Schifferer, A., Choi, J. Direct materials deposition: designed macro and microstructure. *Material Resistance Innovation*, 3, pp. 118-131, 1999.

Mechling, G., Pearce, J., e Busbin, J. Exploiting AMT in small manufacturing firms for global competitiveness. *International Journal of Operations & Production Management*, 15(2), pp. 61-76, 1995.

Mercelis, P., Kruth, J.-P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, 12, pp. 254-265, 2006.

Metzger, P., Muscatello, A., Mueller, R. Affordable, Rapid Bootstrapping of the Space Industry. *Journal of Aerospace Engineering*, 26, pp. 18-29, 2013.

Miguel, P.A.C. Pesquisa-ação como um meio para a cooperação entre a universidade e a empresa – fatores relevantes. *Revista Ciências Exatas – Universidade de Taubaté (UNITAU)*, v. 2, n. 1. 2008

Monge, C. et al. Performance measurement of AMT: a cross-regional study. *Benchmark International Journal*, 13, pp. 135-146, 2006.

Morais, I.N. Cadeias produtivas globais e agregação de valor: A posição da China na indústria eletrônica de consumo. *Revista tempo do mundo*, v. 4, n. 3. 2012.

Morrow, W. et al. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 15, pp. 932-943, 2006.

MTT, T. G. MTT selective laser melting, 2009.

Mudge, R. P., Wald, N. R. Laser engineered net shaping advances additive manufacturing and repair. *Welding Journal-New York*, 86, pp. 44-48, 2007.

Murr, L. E. et. al. Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays. *Philosophical transactions of the royal society a-mathematical physical and engineering sciences*. 368, pp. 1990-2032, 2010

NASA. Acesso em 06 de maio de 2014, disponível em <http://www.nasa.gov>. 2014.

Neely, A. The evolution of performance measurement research: developments in the last decade and a research agenda for the next. *International. Journal of Operations & Production Management*, 25, pp. 1264-1277, 2005.

Newman, D., Lavelle, J., Eschenbach, T. Engineering economic analysis. Austin: Engineering, 2000.

Norma ASTM, F.-1. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International, 2012

Oliveira, M. F. Aplicações da prototipagem rápida em projetos de pesquisa. Dissertação de Mestrado. Campinas, SP: Unicamp, 2008.

Optomec. Acesso em 06 de maio de 2014, disponível em <http://www.optomec.com>. 2014.

Ordoobadi, S. M. Fuzzy logic and evaluation of advanced technologies. *Industrial Management and Data Systems*, 108(7), pp. 928-946, 2008.

_____. Application of AHP and Taguchi loss functions in evaluation of advanced manufacturing technologies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, pp. 2593-2605, 2013.

Ordoobadi, S. M., Mulvaney, N. Development of a justification tool for advanced manufacturing technologies: system-wide benefit analysis. *Journal of Engineering & Technology Management*, 18, pp. 154-184, 2001.

Osakada, K., Shiomi, M. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, pp. 1188-1193, 2006.

O'stlin, J., Sundin, E., Bjorkman, M. Product life-cycle implications for remanufacturing strategies. *Journal of Cleaner Production*, pp. 999-1009, 2009.

Park, J., Tari, M. J., Hahn, H. T. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. *Rapid Prototyping Journal*, 6, pp. 36-50, 2000.

Pattison, J. et al. Cold gas dynamic manufacturing: A non-thermal approach to freeform fabrication. *International journal of machine tools & manufacture*, 47, pp. 627-634, 2007.

Pinkerton, A. Li, L. Modelling the geometry of a moving laser melt pool and deposition track via energy and mass balances. *Journal of physics d-applied physics*, 37, pp. 1885-1895, 2004.

Popov, I., Onuh, S. Reverse engineering of pelvic bone for hip joint replacement. *Journal of Medical Engineering Technology*, 33, pp. 454-459, 2009.

Prechtel, M., Otto, A., Geiger, M. Rapid tooling by laminated object manufacturing of metal foil. *Advanced Materials Research*, 6, pp. 303-312, 2005.

PROMETAL. Acesso em 06 de maio de 2014, disponível em <http://www.prometal-rct.com>. 2014.

Rahmati, S., Abbaszadeh, F., Farahmand, F. An improved methodology for design of custom-made hip prostheses to be fabricated using additive manufacturing technologies. *Rapid Prototyping Journal*, pp. 389-400, 2012.

Ram, G. D. et al. Use of ultrasonic consolidation for fabrication of multi-material structures. *Rapid prototyping journal*, 13, pp. 226-235, 2007.

Ramanath, H. S. et al. Melt flow behaviour of poly- ϵ -caprolactone in fused deposition modelling. *Journal of Materials Science. Materials in Medicine*, 19, pp. 2541–2550, 2008.

Rangarajan, S. et al. Powder processing, rheology, and mechanical properties of feedstock for fused deposition of Si₃N₄ ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 83, pp. 1663-1669, 2000.

Rännar, L. E., Glad, A., Gustafson, C. G. Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting. *Rapid Prototyping Journal*, 13, pp. 128-135, 2007.

Raymond, L. Operations management and advanced manufacturing technologies in SMEs: a contingency approach. *International Journal of Technology Management*, 16, pp. 936-955, 2005.

Reeves, P. Additive Manufacturing — A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability. Derbyshire, UK: Econolyst Limited, 2008.

Robocasting Enterprises, L. L. Acesso em 29 de Abril de 2014, disponível em <http://www.robocasting.net/>. 2014

Rodriguez, A. R., Navarro, J. R. Changes in the intellectual structure of strategic management research: a bibliometric study of strategic management journal. *Strategic Management Journal*, 25, pp. 981-1004, 2004.

Rudraraju, A., Deptowicz, D., Das, S. Strategies for fabricating next-generation multifunctional airfoil designs through LAMP. In: *Proceedings of the International Solid Freeform Fabrication Symposium*. . Austin, TX, 2011.

Russias, J. et al. Fabrication and in vitro characterization of three-dimensional organic/inorganic scaffolds by robocasting. *Journal of Biomedical Materials Research*, 83, pp. 434-445, 2007.

Sachlos, E., Czernuszka, J. T. Making tissue engineering scaffolds work. Review: the application of solid freeform fabrication technology to the production of tissue engineering scaffolds. *European Cells & Materials*, 5, pp. 29–39, 2003.

Schmidt, M., Pohle, D., Rechtenwald, T. Selective laser sintering of PEEK. *Annals- Manufacturing Technology*, 56, pp. 205-208, 2007.

Schroder, R., Sohal, A. Organizational characteristics associated with AMT adoption: Towards a contingency framework. *International Journal of Operations and Production Management*, 19(12), pp. 1270-1291, 1999.

Seitz, M. A critical assessment of motives for product recovery: the case. *Journal of Cleaner Production*, pp. 1147-1157, 2006

Seliger, G., Kernbaum, S., Zettl, M. Remanufacturing Approaches Contributing to Sustainable Engineering. *Gestão e Produção*, 13, pp. 367-384, 2006.

Serres, N. T. Environmental comparison of MESO-CLAD process and conventional machining implementing life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 19, pp. 1117-1124, 2011.

Seuring, S., e Müller, M. From a Literature Review to a Conceptual Framework for Sustainable Supply Chain Management. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 16(No. 15), pp. 1699–1710, 2008.

Singare, S. et al. Design and fabrication of custom mandible titanium tray based on rapid prototyping. . *Medicine Engineering and Physics*, 26, pp. 671-676, 2004.

Slack, N., e Lewis, M. Operations strategy: reconciling market requirements and operations resources . Prentice Hall, 2001.

Small, M. Planning, justifying, and installing advanced manufacturing technology: a managerial framework. *Journal of Manufacturing Technology Managament*, 18(5), pp. 513-537, 2007.

Small, M., e Yasin, M. Advanced manufacturing technology: implementation policy and performance. *Journal of Operations Management*, 15, pp. 349-370, 1997.

Small, M., e Yasin, M. Human factors in the adoption and performance of advanced manufacturing technology in unionized firms. *Industrial Management and Data System*, 100(2), 389, 2000.

Snell, S., e Dean, J. Integrated manufacturing and human resource management: a human capital perspective. *Academy Management Journal*, 35, pp. 467-504, 1992.

Sohal, A. S., Sarros, J., Schroder, R., O'Neill, P. Adoption framework for advanced manufacturing technologies. *International Journal of Production Research*, 44, pp. 5225-5246, 2006

Sohal, A. et al. Comparing American and British practices in AMT adoption. *Benchmarking: An International Journal*, 6(4), pp. 310-324, 1999.

Sohal, A. et al. Adoption of AMT by South African manufacturers. *Integrated Manufacturing Systems*, 12(1), pp. 15-34, 2001.

Song, Y. et al. Manufacturing of the die of an automobile deck part based on rapid prototyping and rapid tooling technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 120, pp. 237-242, 2002.

Sreenivasan, R., Goel, A., Bourell, D. Sustainability issues in laser-based additive manufacturing. *Physics Procedia*, 5, pp. 81-90, 2010.

Stevinson, B. Y., Bourell, D. L., Beaman, J. J. Over-infiltration mechanisms in selective laser sintered Si/SiC preforms. *Rapid Prototyping Journal*, 14, pp. 149-154, 2008.

Strano, G. et al. A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, pp. 1247-1254, 2013.

Sudarmadji, N. et al. Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in selective laser-sintered polyhedral for functionally graded scaffolds. *Acta biomaterialia*, 7, pp. 530-537, 2011.

Sullivan, W., Bontadelli, J., e Wicks, E. *Engineering economy*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2000.

Sun, H. Current and future patterns of using advanced manufacturing technologies. *Technovation*, 631–641, 2000.

Suresh, N., e Meredith, J. Justifying multi-machine systems: an integrated strategic approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 4(2), pp. 117-134, 1985.

Thijs, L. et al. A study of the micro structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta materialia*, 58, pp. 3303-3312, 2010.

Thomas, C. L., et al. Rapid prototyping of large scale aerospace structures. *Proceedings of Aerospace Applications Conference* (pp. 219-230). Aspen, CO: IEE, 1996.

Tigre, J. C. O processo de adoção de tecnologias avançadas de manufatura na indústria de autopeças no Brasil: Um estudo de casos (Dissertação de Mestrado). 162. Rio de Janeiro: COPPEAD/UFRJ, 2003.

Truscott, M. et al. Using RP to promote collaborative design of customised medical implants. *Rapid Prototyping Journal*, 13, pp. 107-114, 2007

Udo, G., Ehie, I. Advanced manufacturing technologies: determinants of implementation success. *International Journal of Operations & Production Management*, 6(12), pp. 6-26, 1996.

Vayrea, B., Vignata, F., Villeneuvea, F. Designing for Additive Manufacturing. . *CIRP Conference on Manufacturing Systems*, pp. 632 – 637, 2012.

Volpato, N. Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações. São Paulo: Edgar Blücher, 2007.

Voxeljet. Acesso em 06 de maio de 2014, disponível em <http://www.voxeljet.de>. 2014.

Weber, R. Basic Content Analysis. Newbury Park, CA: Sage Publications, 1990.

Wilkes, J. et al. Additive manufacturing of ZrO₂–Al₂O₃ ceramic components by selective laser melting. Rapid Prototyping Journal, 19, pp. 51-57, 2013.

Xiong, Y., Schoenung, J. Process cost comparison for conventional and near net-shape cermet fabrication. Advanced Engineering Materials, 12, pp. 235-241, 2010.

Yin, R. K. (2005). Estudo de caso: planejamento e métodos. Porto Alegre: Bookman.

Yuan D, K. et al. Experimental investigations on a photocurable ceramic material system for large area maskless photopolymerization. In: Proceedings of the International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, TX, 2009.

Zammuto, R., e O'Connor, E. Gaining advanced manufacturing technologies benefits the roles of organization design and culture. Academic Management Review, 17, pp. 701-728, 1992.

Zancul, E.S. et. al. Manufatura aditiva: estado da arte e *framework* de aplicações. Revista GEPROS. 2016. No prelo.

Zhang, H., Xu, J., Wang, G. Fundamental study on plasma deposition manufacturing. Surface & coatings technology, 171, pp. 112-118, 2003.

Zhang, K., Liu, W., Shang, X. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping. Optics & Laser Technology, 39, pp. 549-557, 2007.

Zhang, W. et al., Rapid freezing prototyping with water. Materials & Design, 20, pp. 139-145, 1999.

Zhao, F. et al. Environmental assessment of laser assisted manufacturing: case studies on laser shock peening and laser assisted turning. Journal of Cleaner Production, pp. 1311-1319, 2010.

Apêndice A

Roteiro para entrevista

Este roteiro foi desenvolvido para ser utilizado em conjunto com o entrevistador, para servir como material de apoio durante a entrevista. Ele contém os principais aspectos do modelo desenvolvido para avaliação.

Contextualização

Deve ser explicado para o entrevistado o contexto da pesquisa. Mostrar o entendimento de que os processos de adoção de AMTs já são consolidados, enquanto a manufatura aditiva é um processo de fabricação novo, que não possui modelo de processo para avaliar sobre sua adoção especificamente

Avaliação dos passos

Devem ser avaliados os passos propostos no modelo. Percorrer com o entrevistado cada um dos passos propostos, explicando o papel de cada um no modelo, e entender a pertinência dos passos na opinião do entrevistado.

Entender com os entrevistados a real necessidade de execução de cada passo, as informações propostas como dados de entrada dos passos e os resultados propostos para cada passo. Devem ser avaliadas as atividades de cada passo e as técnicas de execução de atividade propostas.

Justificativas para adoção da manufatura aditiva

1. Avaliação das justificativas

As justificativas para adoção da manufatura aditiva devem ser avaliadas uma a uma pelos entrevistados. Essa avaliação visa entender quais justificativas, dentre as listadas, não são pertinentes para a manufatura aditiva.

2. Sugestões de justificativas adicionais

Devem também ser acrescentadas sugestões de outras justificativas não listadas.

Banco de dados de tecnologias

1. Validação da pertinência das tecnologias elencadas

Deve ser avaliada a pertinência de cada uma das tecnologias listadas no banco de dados, identificando aquelas que não possuem na prática as características identificadas na literatura e listada na tabela de banco de dados de tecnologias.

2. Sugestão de tecnologias adicionais

Devem ser identificadas tecnologias não listadas no banco de dados de tecnologia.

Avaliação do modelo

Questionar o entrevistado sobre os seguintes aspectos do modelo:

1. Vantagens
2. Desvantagens
3. Aplicabilidade na indústria
4. Outras considerações

São perguntas abertas, que tem a finalidade de obter dos entrevistados a percepção qualitativa que eles tiveram do modelo proposto.